

ISSN 2079-3928

Природо- пользование



1
2021

Государственное научное учреждение
«Институт природопользования
Национальной академии наук Беларусь»

Природопользование

2021. № 1

Основан в 1996 г. как сборник научных трудов.
В 2018 г. преобразован в журнал.
Выходит 2 раза в год

Главный редактор

Лысенко С. А. – доктор физико-математических наук, профессор

Редакционная коллегия

Хомич В. С. – доктор географических наук (заместитель главного редактора)
Томсон А. Э. – кандидат химических наук (заместитель главного редактора)
Высоценко А. В. – кандидат технических наук (ответственный секретарь)
Айзберг Р. Е. – член-корреспондент, доктор геолого-минералогических наук, профессор
Бровка Г. П. – доктор технических наук
Грибик Я. Г. – кандидат геолого-минералогических наук
Жогло В. Г. – доктор геолого-минералогических наук
Какарека С. В. – доктор технических наук, профессор
Камышенко Г. А. – кандидат технических наук
Курзо Б. В. – доктор технических наук
Кухарчик Т. И. – доктор географических наук
Лиштван И. И. – академик, доктор технических наук, профессор
Логинов В. Ф. – академик, доктор географических наук, профессор
Матвеев А. В. – академик, доктор геолого-минералогических наук, профессор
Струк М. И. – кандидат географических наук

Международный редакционный совет

Балтрунас В. – доктор наук (геология), профессор (Литва)
Гнеушев В. А. – кандидат технических наук (Украина)
Гожик П. Ф. – академик НАН Украины, доктор геолого-минералогических наук,
профессор (Украина)
Зилитинкевич С. С. – доктор физико-математических наук, профессор (Финляндия)
Зюзин Б. Ф. – доктор технических наук, профессор (Россия)
Клавинс М. – доктор наук (химия), профессор (Латвия)
Маркс Л. – доктор наук (геология), профессор (Польша)
Руденко Л. Г. – академик НАН Украины, доктор географических наук, профессор (Украина)
Снытко В. А. – член-корреспондент РАН, доктор географических наук, профессор (Россия)
Тишков А. А. – член-корреспондент РАН, доктор географических наук, профессор (Россия)
Черепанский М. М. – доктор геолого-минералогических наук, профессор (Россия)

Адрес

Ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск.
Тел. +375 17 215-26-32, факс +375 17 215-24-13.
info@nature-nas.by
<http://nature-nas.by/journal>

State Scientific Institution
“Institute of Nature Management
of the National Academy of Sciences of Belarus”

Nature Management

2021. № 1

Was founded in 1996 as a proceeding.
In 2018 was transformed into a journal.
Periodicity is 2 issues per year

Editor-in-Chief

Sergey Lysenko – D. Sc. (Physical and Mathematical), Professor

Editorial Board

Valery Khomich – D. Sc. (Geography) (*Associate Editor-in-Chief*)
Aleksey Tomson – Ph. D. (Chemistry) (*Associate Editor-in-Chief*)
Anna Vysochenko – Ph. D. (Technical) (*Executive Secretary*)
Roman Aizberg – Corresponding Member, D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor
Gennadiy Brovka – D. Sc. (Technical)
Yaroslav Gribik – Ph. D. (Geology and Mineralogy)
Sergey Kakareka – D. Sc. (Technical), Professor
Halina Kamyshenka – Ph. D. (Technical)
Boris Kurzo – D. Sc. (Technical)
Tamara Kukharchyk – D. Sc. (Geography)
Ivan Lishtvan – Academician, D. Sc. (Technical), Professor
Vladimir Loginov – Academician, D. Sc. (Geography), Professor
Aleksey Matveev – Academician, D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor
Mikhail Struk – Ph. D. (Geography)
Vasiliy Zhoglo – D. Sc. (Geology and Mineralogy)

International Editorial Council

Valentinas Baltrunas – D. Sc. (Geology), Professor (Lithuania)
Mikhail Cherepanskii – D. Sc. (Geology and Mineralogy), Professor (Russia)
Vladimir Gneushev – Ph. D. (Technical) (Ukraine)
Piotr Gozyk – Academician, D. Sc. (Geology and Mineralogy) (Ukraine)
Leszek Marks – Dr. Habil. (Geology), Professor (Poland)
Maris Klavins – Dr. Habil. (Chemistry), Professor (Latvia)
Leonid Rudenko – Academician, D. Sc. (Geography) (Ukraine)
Valerian Snytko – Corresponding Member, D. Sc. (Geography), Professor (Russia)
Arcadiy Tishkov – Corresponding Member, D. Sc. (Geography) (Russia)
Sergei Zilitenkevich – D. Sc. (Physical and Mathematical), Professor (Finland)
Boris Zuzin – D. Sc. (Technical), Professor (Russia)

Address

10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus.
Phone: +375 17 215-26-32, fax: +375 17 215-24-13.
info@nature-nas.by.
<http://nature-nas.by/journal>

СОДЕРЖАНИЕ CONTENTS

ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ GEOGRAPHY. GEOECOLOGY

Лысенко С. А., Камышенко Г. А. <i>Lysenko S. A., Kamyshenka H. A.</i>	Основные итоги выполнения подпрограммы «Природные ресурсы и экологическая безопасность» Государственной программы научных исследований «Природопользование и экология» на 2016–2020 годы <i>Main results of performance of the subprogram "Natural resources and environmental security" State program of scientific research «Environmental management and ecology» for 2016–2020</i>	5
Мельник В. И., Яцухно В. М., Червань А. Н., Камышенко Г. А., Пискунович Н. Г., Буяков И. В. <i>Melnik V. I., Yatsukhno V. M., Chervan A. N., Kamyshenka H. A., Piskunovich N. G., Buyakov I. V.</i>	Оценка увлажнения и уязвимости почв сельскохозяйственных земель Белорусского Полесья к засухам <i>Estimates of moisture and vulnerability of soils of agricultural lands of the Belarusian Polesie to drought</i>	27
Камышенко Г. А. <i>Kamyshenka H. A.</i>	Оценка влияния основных климатических факторов на урожайность озимых зерновых культур на территории Беларуси в прогнозных целях <i>Assessment of the influence of the main climatic factors on the yield of winter cereal crops on the territory of Belarus for forecasting purposes</i>	41
Волчек А. А., Окоронко И. В. <i>Volchak A. A., Okoronko I. V.</i>	Оценка экологической ситуации в пределах малых водосборов реки Ясельды <i>Assessment of ecological situation within the small drains in the Yaselda river basin</i>	49
Струк М. И., Живнach С. Г. <i>Struk M. I., Zhyunach S. G.</i>	Бассейновый критерий организации природного каркаса пригородной территории (на примере Минска) <i>The catchment basin criterion for the organization of the natural frame of the suburban territory (on the example of Minsk)</i>	62
Санец Е. В., Овчарова Е. П., Кравчук Л. А., Савченко С. В., Бокая Г. М. <i>Sanets E. V., Aucharova A. P., Kravchuk L. A., Savchenko S. V., Bokaya H. M.</i>	Состояние компонентов природной среды в пределах экологического коридора II порядка (долины р. Мышки, г. Минск) <i>State of natural environmental components within the ecological corridor of the order II (the Myshka River valley, Minsk)</i>	73
Басалай Е. Н. <i>Basalai E. N.</i>	Геоэкологическая оценка пригодности осадков городских сточных вод для различных видов использования (на примере Брестской области) <i>Geoecological assessment of suitability of urban wastewater sludge for various uses (on the example of Brest region)</i>	93
Чернюк В. Д., Кухарчик Т. И., Козыренко М. И. <i>Chernyuk V. D., Kukharchyk T. I., Kozyrenka M. I.</i>	Загрязнение почв в зонах воздействия предприятий по производству электронного и электротехнического оборудования и переработке отходов <i>Soil contamination in the impact zones of electronic and electrical equipment production and waste recycling</i>	118
Кравчук Л. А., Баженова Н. М., Гайшун А. Н. <i>Kravchuk L. A., Bazhenova N. M., Haishun A.N.</i>	Средоформирующие функции зеленой инфраструктуры г. Витебска <i>Environment-forming function of green infrastructure of Vitebsk</i>	127

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ GEOLOGY. MINERALS

Матвеев А. В. <i>Matveyev A. V.</i>	Особенности строения земной поверхности Белорусского Полесья в муравинское межледниковые <i>Features of the earth's surface structure of the Belarusian Polesie Area in the Muravian interglacial</i>	138
Грибик Я. Г. <i>Gribik Ya. G.</i>	Геологическая роль поискового метода «дикая кошка» в изучении углеводородного потенциала Припятского прогиба <i>The geological role of the search method "wild cat wells" in the study of the hydrocarbon potential of the Pripyat trough</i>	148

**ГЕОТЕХНОЛОГИИ. ДОБЫЧА, ПЕРЕРАБОТКА
И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ ИСКОПАЕМЫХ**
**GEOTECHNOLOGY. EXTRACTION, PROCESSING
AND THE USE OF SOLID FUEL MINERALS**

Лиштван И. И., Алейникова В. Н. Lishtvan I. I., Aleinikova V. N.	Реологические свойства гуминовых веществ торфа и бурого угля <i>Rheological properties of humic substances of peat and brown coal</i>	169
Першай Н. С., Янута Ю. Г. Pershay N. S., Yanuta Yu. G.	Сорбционные материалы на основе щелоченерастворимых компонентов торфа и бурого угля для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов <i>Sorption materials based on alkali-insoluble components of peat and brown coal for wastewater treatment from ions of heavy metal</i>	175
Лиштван И. И., Наумова Г. В., Жмакова Н. А., Макарова Н. Л., Овчинникова Т. Ф., Макеенко А. А. Lishtvan I. I., Naumova G. V., Zhmakova N. A., Makarova N. L., Ovchinnikova T. F., Makeenko A. A.	Исследование состава органической и минеральной частей твердых отходов от производства гуминовых препаратов <i>Investigation of the composition of the organic and mineral parts of solid waste from the production of humic preparations</i>	187
Макаренко Т. И., Кунцевич В. Б. Makarenko T. I., Kuntsevich B. V.	Метод выбора торфяного месторождения из нескольких пригодных на предпроектной стадии его подготовки к эксплуатации <i>The method of selecting of peatland from several suitable at the predesign of its preparation for exploitation</i>	198
Родькин О. И., Черненок Е. В., Сивко В. М., Ракович В. А. Rodzkin A. I., Chernenok E. V., Sivko V. M., Rakovitch V. A.	Оценка эколого-экономической эффективности производства композитных топливных брикетов из фрезерного торфа и биомассы <i>Assessment of ecological and economic efficiency of composite fuel production from the peat and biomass</i>	207
Томсон А. Э., Гончарова И. А., Тригубович А. М., Соколова Т. В., Сосновская Н. Е., Навоша Ю. Ю., Пехтерева В. С. Tomson A. E., Goncharova I. A., Trigubovich A. M., Sokolova T. V., Navosha Yu. Yu., Sosnovskaya N. E., Pekhtereva V. S.	Сорбция тяжелых металлов плесневым грибом <i>Aspergillus carbonarius</i> , меланизирующим картон <i>Sorption of heavy metals by mold fungus Aspergillus carbonarius melanizing cardboard</i>	221

**ХРОНИКА
CHRONICS**

Хомич В. С., Санец Е. В. Khomich V. S., Sanets E. V.	Полувековой юбилей первого географического академического структурного подразделения в Беларуси: результаты и перспективы исследований <i>Semi-centural anniversary of the first geographic academic structural unit in Belarus: results and prospects of research</i>	229
Лопух П. С., Гледко Ю. А., Матюшевская Е. В. Lopukh P. S., Gledko Yu. A., Matyushevskaya E. V.	Итоги Международной научно-практической очно-заочной конференции «Развитие географических исследований в Беларуси в XX–XXI вв.», посвященной 100-летию БГУ, 60-летию кафедры физической географии мира и образовательных технологий и 100-летию со дня рождения профессора О.Ф. Якушко <i>Results of the International scientific and practical conference "Development of geographical research in Belarus in the XX–XXI centuries", dedicated to the 100th anniversary of BSU, the 60th anniversary of the Department of Physical Geography of the World and Educational Technologies and the 100th anniversary of the birth of Professor O. F. Yakushko</i>	238

**ПАМЯТИ УЧЕНОГО
IN THE MEMORY OF A SCIENTIST**

Памяти Германа Ивановича Каратаева
In the Memory of German Ivanovich Karataev

241

**ГЕОГРАФИЯ. ГЕОЭКОЛОГИЯ
GEOGRAPHY. GEOECOLOGY**

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2021-1-5-26>
УДК 001.891(476)

Поступила в редакцию 06.03.2021
Received 06.03.2021

**ОСНОВНЫЕ ИТОГИ ВЫПОЛНЕНИЯ ПОДПРОГРАММЫ
«ПРИРОДНЫЕ РЕСУРСЫ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ»
ГОСУДАРСТВЕННОЙ ПРОГРАММЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
«ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ И ЭКОЛОГИЯ» НА 2016–2020 ГОДЫ**

С. А. Лысенко, Г. А. Камышенко

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. Кратко охарактеризованы структура и направленность государственной программы научных исследований «Природопользование и экология» на 2016–2020 годы, представлены сведения о важнейших показателях результативности выполнения подпрограммы «Природные ресурсы и экологическая безопасность», входящей в состав указанной программы. Приведены основные результаты выполненных фундаментальных исследований с указанием их практической значимости, сведений по использованию полученных научных разработок. Показаны перспективы развития фундаментальных исследований в области природопользования и охраны окружающей среды.

Ключевые слова: трансграничное загрязнение; урбанизированные территории; климатические изменения; гидроэкологические проблемы; реконструкция палеоландшафтов; современная геодинамика; экологические риски и устойчивое развитие территорий; экотехнологии.

Для цитирования. Лысенко С. А., Камышенко Г. А. Основные итоги выполнения подпрограммы «Природные ресурсы и экологическая безопасность» государственной программы научных исследований «Природопользование и экология» на 2016–2020 годы // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 5–26.

**MAIN RESULTS OF PERFORMANCE OF THE SUBPROGRAM
“NATURAL RESOURCES AND ENVIRONMENTAL SECURITY”
STATE PROGRAM OF SCIENTIFIC RESEARCH
“ENVIRONMENTAL MANAGEMENT AND ECOLOGY” FOR 2016–2020**

S. A. Lysenko, H. A. Kamyshenka

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The structure and direction of the state program of scientific research "Natural Resources Management and Ecology" for 2016–2020 are briefly described, information about the most important indicators of the performance of the subprogramme "Natural Resources and Environmental Safety", which is part of this program, is presented. The main results of fulfilled fundamental studies are given with their practical significance, information on the use of the obtained scientific developments are given. Prospects of development of fundamental research in the field of nature management and environmental protection are shown.

Keywords: transboundary pollution; urbanized areas; climate change; hydroecological problems; reconstruction of paleolandscapes; modern geodynamics; environmental risks and sustainable development of territories; ecotechnologies.

For citation. Lysenko S. A., Kamyshenka H. A. Main results of performance of the subprogram "Natural resources and environmental security" state program of scientific research "Environmental management and ecology" for 2016–2020. *Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 5–26.

Введение. В 2020 г. завершено выполнение государственных программ научных исследований (ГПНИ), утвержденных постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 10.06.2015 г. № 483 «Об утверждении перечня государственных программ научных исследований на 2016–2020 годы». В указанный перечень входила ГПНИ «Природопользование и экология», в рамках которой в 2016–2020 гг. велись фундаментальные исследования в области природопользования и охраны окружающей среды в соответствии с приоритетным направлением научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы «Экология и природопользование» (перечень утвержден постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12.03.2015 г. № 190). Государственными заказчиками ГПНИ «Природопользование и экология» являлись Национальная академия наук Беларуси, Министерство образования Республики Беларусь, Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь. Структурно программа состояла из четырех подпрограмм: «Природные ресурсы и экологическая безопасность», «Биоразнообразие, биоресурсы, экология», «Радиация и природные системы», «Структурно-вещественные комплексы Беларуси». В рамках ГПНИ «Природопользование и экология» в 2016–2020 гг. выполнялись 134 задания, в реализации которых участвовало более 30 организаций различной ведомственной принадлежности.

Более подробно остановимся на итогах выполнения подпрограммы «Природные ресурсы и экологическая безопасность», головными организациями-исполнителями которой являлись государственное научное учреждение «Институт природопользования Национальной академии наук Беларусь» и Белорусский государственный университет. Научными руководителями подпрограммы были утверждены академик профессор А. К. Карабанов (от Института природопользования) и доктор географических наук доцент Д. Л. Иванов (от БГУ). В дальнейшем в связи с произошедшими изменениями в руководстве географического факультета БГУ (в настоящее время – факультет географии и геоинформатики БГУ) подпрограммой руководили доктор сельскохозяйственных наук профессор Н. В. Клебанович, а затем кандидат географических наук доцент Д. М. Курлович. В связи с уходом из жизни А. К. Карабанова руководство ГПНИ «Природопользование и экология» в целом и подпрограммой «Природные ресурсы и экологическая безопасность» с августа 2019 г. осуществлял доктор физико-математических наук профессор С. А. Лысенко.

Цели подпрограммы: обеспечение экологически безопасного, высокоэффективного природопользования как основы устойчивого экономического развития Республики Беларусь, перехода к экологически ориентированному инновационному развитию страны, создание оптимальной территориальной организации промышленного и сельского хозяйства; получение новых знаний об основных закономерностях развития природной среды территории Республики Беларусь (утверждены постановлением Совета Министров Республики Беларусь 10.06.2015 г. № 483).

Подпрограмма «Природные ресурсы и экологическая безопасность» была сформирована как комплекс тематически объединенных заданий, направленных на углубление фундаментальных знаний о закономерностях функционирования природно-хозяйственных геосистем в современных условиях, разработку эффективных мер по защите окружающей среды, обеспечение безопасности жизнедеятельности населения, создание и развитие научной базы для более полного вовлечения в хозяйственный оборот природно-ресурсного потенциала страны, производство новых материалов и препаратов на основе органического сырья (торфа, сапропеля, бурых углей, растительного сырья).

В 2016–2020 гг. в рамках подпрограммы выполнено 38 научных заданий, в реализации которых участвовали ученые шести организаций НАН Беларуси, семи учреждений Минобразования, двух организаций Минприроды. Численность исполнителей составила 283 человека, из них академиков – 4, членов-корреспондентов – 3, докторов наук (без учета академиков и членов-корреспондентов) – 18, кандидатов наук – 96, включая 8 докторантов, без ученой степени – 162. Анализ состава исполнителей свидетельствует об их высокой научной квалификации (с ученой степенью – более 40 %).

Основные результаты выполнения подпрограммы «Природные ресурсы и экологическая безопасность».

Трансграничное загрязнение. Научно-исследовательские работы по созданию методов и моделей оценки трансграничного переноса загрязняющих веществ, картографированию выбросов выполнены с учетом международных тенденций учеными учреждений НАН Беларуси и Минобразования.

Разработаны информационно-методические основы использования моделей переноса и рассеяния загрязняющих веществ для выявления структуры загрязнения атмосферного воздуха и прогноза ее изменения. Впервые в Беларуси и других странах СНГ использована модель распространения примесей в атмосфере AERMOD для оценки воздействия разнотипных локальных источников выбросов в городах Беларуси. Основной особенностью данной модели является использование в ней достаточно детальной параметризации пограничного слоя атмосферы, позволяющей использовать в качестве входных данных измеряемые метеопараметры и отказаться от классов устойчивости атмосферы.

Уточнены и дополнены оценки выбросов стойких органических загрязнителей (диоксинов/фуранов полихлорированных бифенилов, гексахлорбензола), летучих органических соединений, в том числе формальдегида, тонкодисперсных твердых взвешенных частиц (ВЧ10, ВЧ2,5), аммиака и других, что необходимо для установления предельных уровней выбросов и оценки их достоверности.

Разработаны процедуры и алгоритмы получения карт выбросов загрязняющих веществ с различным разрешением (50×50 км, 10×10 км и по административным районам), как валовых, так и по категориям источников. Выявлены тренды содержания свинца, кадмия и других загрязняющих веществ в атмосферном воздухе фоновых и урбанизированных территорий в Беларусь за последний 30-летний период [1, 2]. Оценки, получаемые с помощью моделирования, представлены широким спектром характеристик: максимальные концентрации для различных периодов осреднения, их повторяемость, квантили концентраций, распределение расчетных концентраций во времени, по группам источников и т. д. Расчеты рассеяния выбросов формальдегида, выполненные для деревообрабатывающего предприятия с использованием модели AERMOD, показали перспективность ее применения в условиях Беларусь, в том числе для прогнозирования состояния атмосферного воздуха. Адаптированная модель AERMOD апробирована для моделирования рассеяния загрязняющих веществ от стационарных и мобильных источников выбросов в оазисе Вечерний, Земля Эндерби (Восточная Антарктика) [3] (*Институт природопользования НАН Беларусь*).

Впервые по результатам международного комплексного лидарного и радиометрического эксперимента с использованием наземных и спутниковых измерительных систем проведено исследование высотных профилей аэрозольных фракций на пространстве Евразийского континента, даны оценки статистической взаимосвязи высотных распределений аэрозольных параметров, восстановленных с использованием процедур пространственного и временного усреднения. Создана база данных лидарного и радиометрического зондирования атмосферы [4]. Разработан алгоритм реализации метода оптимальной интерполяции данных наблюдений и модельных расчетов с учетом статистического среднего, на основе которого создан программный комплекс для расчета полей распределения атмосферных примесей. С использованием созданного программного комплекса получены оценки и построены карты распределения объемной концентрации аэрозоля в Восточно-Европейском регионе (рис. 1). На основе данных международного комплексного наземного и спутникового эксперимента, проведенного в 2017–2018 гг. на пространстве Евразийского континента в сотрудничестве с иностранными научными группами, дана статистическая оценка различиям высотных профилей концентраций аэрозольных фракций в атмосфере, измеренных наземными и спутниковыми лидарными системами. Полученные результаты используются в Национальной системе мониторинга окружающей среды (НСМОС) в Республике Беларусь. Данные лидарного и радиометрического зондирования представлены в банк данных, формируемый для валидации моделей крупномасштабного переноса взвешенных частиц в Европейском регионе. Результаты важны для оценки применимости спутниковых данных для мониторинга атмосферных примесей при проведении природоохранных мероприятий (*Институт физики НАН Беларусь*).

Разработана методика статистической оценки влияния метеоусловий и антропогенного загрязнения воздуха на приземный озон. С использованием данных спутниковых наблюдений за период с 1980 по 2017 г. определены динамические климатические нормы и многолетние тренды общего содержания озона в средних широтах Северного полушария [5]. Показано, что в последние годы повсеместно отмечается увеличение общего содержания озона в зимний период, увеличение весной (за исключением северных широт Европы и Азии) и продолжающееся снижение летом (за исключением северных широт Америки). Построены многолетние тренды общего содержания озона в разных регионах и в целых широтных поясах в зависимости от сезона. Установлено, что антропогенное загрязнение воздуха в городах Беларусь в большинстве случаев не приводит к увеличению концентрации приземного озона до опасных значений. Продолжающее снижение общего содержания озона в летний период над Северным полушарием приводит к росту интенсивности солнечного ультрафиолетового излучения у поверхности Земли. Показано, что диоксид серы и твердые частицы снижают концентрацию приземного озона в городском воздухе на территории Беларусь, причем диоксид серы относится к ряду наиболее сильнодействующих на озон загрязняющих веществ. Обоснован прогноз поведения приземного озона на территории Беларусь в ближайшие годы (*ННИЦ МО БГУ*).

Природопользование на урбанизированных территориях, ландшафтоведение. Важными аспектами в обеспечении благоприятных условий для жизнедеятельности человека являются выявление закономерностей изменений окружающей среды в процессе городского развития и разработка управлеченческих механизмов его экологической оптимизации. Интенсификация использования природных ресурсов сопровождается увеличением техногенных нагрузок на окружающую среду и ухудшением ее состояния. В связи с этим являются актуальными и обоснованными исследования окружающей среды на урбанизированных территориях, работы по выявлению особенностей изменения естественных ландшафтов. В этом направлении получен ряд значимых для науки и практики результатов.

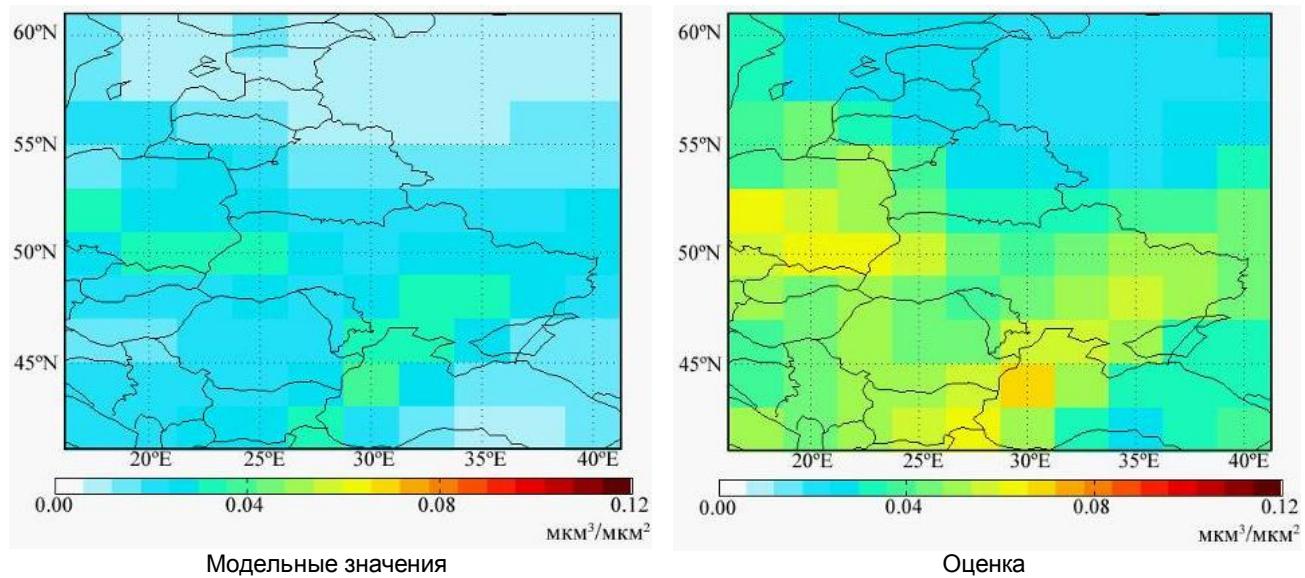


Рис. 1. Пример оценки объемной концентрации аэрозоля
 (авторы: канд. физ.-мат. наук Н. С. Метельская, канд. физ.-мат. наук А. П. Чайковский,
 канд. физ.-мат. наук А. И. Бриль)

Fig. 1. Example of evaluation of aerosol volume concentration
 (authors: Ph. D. N. S. Metelskaya, Ph. D. A. P. Tchaikovsky, Ph. D. A. I. Bril)

Разработана научная концепция организации и устойчивого функционирования природного каркаса урбанизированной территории. Определены современные и перспективные угрозы для пригородной составляющей каркаса, которые связаны с загрязняющими воздействиями на нее со стороны города и интенсивного сельского хозяйства, ростом численности населения территории, сопровождаемого увеличением ее застройки, усилением фрагментации природных угодий, повышением рекреационных нагрузок, развитием на данной территории городов-спутников, планируемым выносом в ее пределы экологоопасных предприятий из города [6]. Впервые для Беларуси разработаны типовые модели организации природных каркасов для городов различной величины и функционального типа (рис. 2). Разработано научное обоснование «Схемы экологических коридоров г. Минска», включающей систему взаимосвязанных наземных природных комплексов и водных экосистем, наиболее значимых для создания/поддержания благоприятных условий жизнедеятельности населения, а также режимы природопользования в пределах экологических коридоров и на прилегающих территориях, рекомендации по повышению эффективности выполнения ими экосистемных функций. Дифференциированную оценку средоформирующих функций природного каркаса предложено проводить на основании выделения на городской территории климатопов со сходными параметрами городских экосистем и типом градостроительного освоения территории. Разработаны критерии выделения климатопов для городских территорий Беларуси, учитывающие структуру и степень антропогенной трансформации природных экосистем, параметры застройки территории и ее функциональное использование, уровень озелененности, приуроченность к элементам гидро-графической сети. Проведена дифференциация территорий Минска и Витебска по типам и видам климатопов, созданы карты климатопов указанных городов. Полученные результаты использованы УП «Минскградо» в градостроительном проектировании на территории г. Минска [7] (Институт природопользования НАН Беларуси).

В целях оптимизации территориальной организации и сбалансированного развития регионов дано научное обоснование применения наиболее информативных диагностических и характеризующих биоиндикационных параметров для определения степени воздействия на компоненты хвойных биогеоценозов в зоне влияния цементных производств. Серия показателей: биоиндикационных диагностических (состояние эпифитной флоры, лесной подстилки, живого напочвенного покрова) и характеризующих (уровень pH почвенного субстрата, содержание Ca^{2+} в почве, коре и ассимилирующих органах растений, характеристика пигментного комплекса хвои и листьев деревьев и кустарников, анатомо-морфологические и физиолого-биохимические характеристики текущего прироста и ассимилирующих органов, санитарное состояние древостоя), позволила выполнить зонирование территории с выделением трех зон – необратимых последствий, видимых повреждений, скры-

тых повреждений – с целью разработки комплекса мероприятий по оптимизации промышленной среды и принятия обоснованных управленческих решений. Установлено, что средозащитный потенциал существующих зеленых насаждений промплощадок и санитарно-защитных зон цементных заводов Беларуси остается на невысоком уровне, неспособном действительно повлиять на важнейшие параметры (пылеулавливание, рассеивание пыли, устойчивость и др.) из-за низкого уровня видового разнообразия древесно-кустарниковой растительности, используемой в озеленении, а также характеризуется функциональной неспособностью противостоять негативной антропогенной нагрузке. Научно обоснованы и разработаны критерии подбора перспективных видов древесно-кустарниковой растительности для создания и реконструкции многофункциональных насаждений в зонах влияния цементных заводов [8] (ЦБС НАН Беларусь).

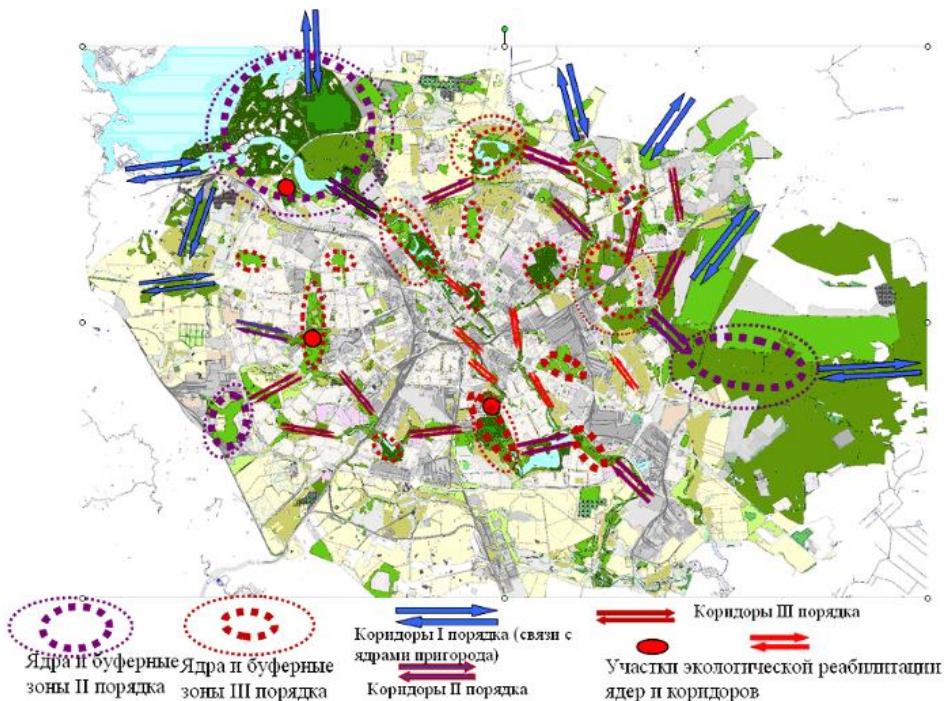


Рис. 2. Схема природного каркаса территории г. Минска
(авторы: д-р геогр. наук В. С. Хомич, канд. геогр. наук Е. В. Санец, канд. геогр. наук Л. А. Кравчук и др.)

Fig. 2. Diagram of the natural framework of the territory of Minsk
(authors: D. Sc. V. S. Khomich, Ph. D. E. V. Sanets, Ph. D. L. A. Kravchuk, etc.)

Выявлены закономерности развития городов Беларуси и особенности формирования структуры урбокаркасов, разработана методика изучения, картографирования и оценки урбокаркасов, предложена их классификация. Проведены геохимические исследования городских почв с целью установления в них содержания тяжелых металлов (Cu, Pb, Mn, Sn, Ni, Cr, Ti). Эти материалы использованы для оценки эколого-геохимического состояния урбокаркасов. Установлены историко-географические особенности формирования урбокаркафтной структуры крупного промышленного города, проявившиеся в сильной дифференциации видов урбокаркасов. Выявлена связь между структурой урбокаркасов и эколого-геохимическими ситуациями, отражающаяся в специфике формирования геохимических аномалий. Составлены карты урбокаркасов и геохимические карты содержания тяжелых металлов в почвах исследованных городов Беларуси, на основании которых созданы карты оценки эколого-геохимических ситуаций урбокаркасов, позволяющие районировать города по степени благоприятности/неблагоприятности экологических условий для проживания населения (рис. 3). Для территорий с конфликтными экологическими ситуациями предложен комплекс геохимических и фитомелиоративных мер для их смягчения и нейтрализации. Установлена зависимость формирования «островов тепла» от внутренней структуры урбанизированных ландшафтов. Так, в Слуцке на формирование «острова тепла» с температурами 32–38 °C в летний период оказывают влияние урбокаркафты исторического центра города с плотной застройкой, а также урбокаркафты с наличием промышленных предприятий и коммунально-складских помещений. Карты урбокаркасов, теплового загрязнения поверхности и эколого-геохимических ситуаций исследованных городов используются в учебном процессе БГУ [9] (БГУ).

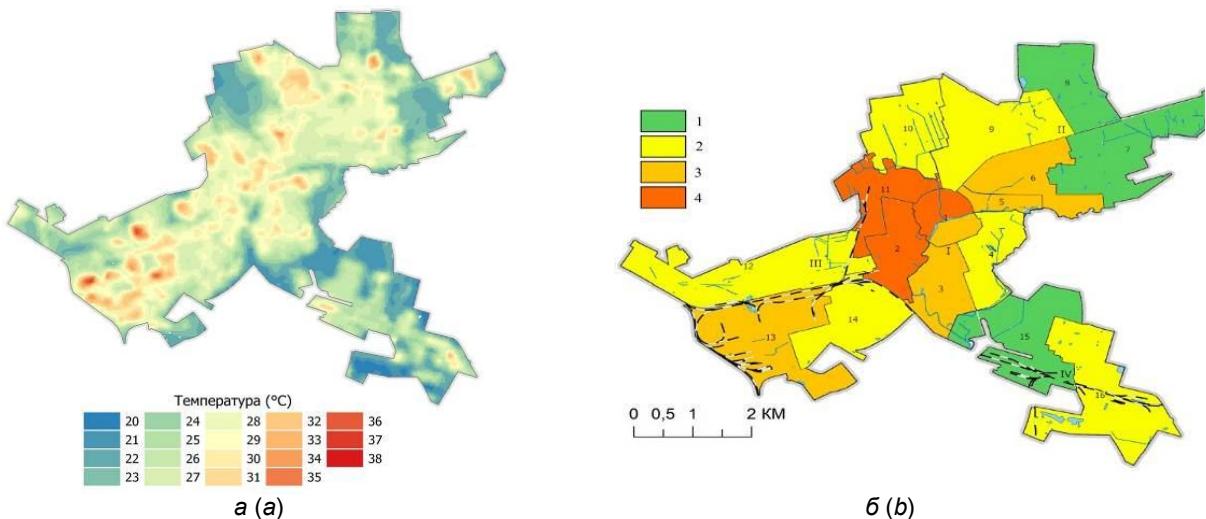


Рис. 3. Карты теплового загрязнения поверхности (а) и эколого-геохимических ситуаций (б) г. Слуцка:
1 – наиболее благоприятная, 2 – благоприятная, 3 – удовлетворительная, 4 – напряженная
(авторы: д-р. геогр. наук Г. И. Марцинкевич, канд. геогр. наук И. И. Счастная,
канд. геогр. наук А. А. Карпиченко)

Fig. 3. Maps of thermal contamination of surface (a) and environmental and geochemical situations (b) of Slutsk:
1 – the most favorable, 2 – favorable, 3 – satisfactory, 4 – intense
(authors: D. Sc. G. I. Martsinkevich, Ph. D. I. I. Shchasnaya, Ph. D. A. A. Karpichenko)

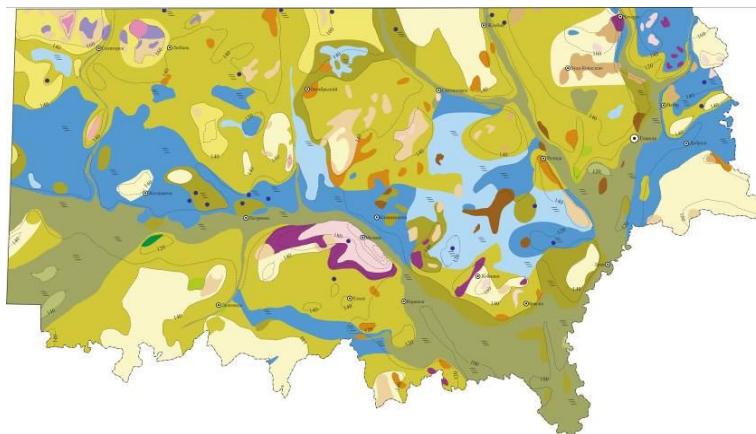
Разработана научная концепция выявления, оценки и картографирования редких и типичных ландшафтов, учитывающая иерархическое строение ландшафтов и зависимость их структурных элементов от масштаба исследования. Выделено четыре основных уровня формирования ландшафтных комплексов: страновой, региональный, районный, локальный. Предложен обновленный список редких и типичных ландшафтов Беларуси, в который включено 7 редких родов и 24 редких вида ландшафтов. Разработаны критерии выделения ландшафтов на каждом из уровней с привязкой к масштабам исследования и методика картографирования типичных и редких ландшафтов. Составлены карты «Ландшафтное разнообразие Республики Беларусь (на уровне родов ландшафтов)», «Пространственная структура редких видов ландшафтов по показателю встречаемости», «Типология природных ландшафтов Беларуси по преобладающим группам видов земель». Полученные результаты использованы: при оформлении паспортов и охранных обязательств; при разработке обоснований создания/преобразования природоохранных территорий; при подготовке решений о передаче выявленных типичных и редких природных ландшафтов под охрану [10] (БГУ).

Реконструкция палеоландшафтов. Выполнен анализ геологических, палинологических и археологических данных по территории Белорусского Полесья. Рассматривались западная часть (условно выделенная под названием Брестское Полесье) и на втором этапе исследований – восточная часть Полесья.

Реконструированы палеоландшафты, существовавшие на территории Белорусского Полесья в климатическом оптимуме муравинского межледникового (рис. 4), оптимуме и постоптимальной фазе голоцена, отражающие особенности распространения растительности в зависимости от приуроченности к определенным типам рельефа, характера подстилающих пород, глубины залегания грунтовых вод и других экологических условий. Выполненные реконструкции палеоландшафтов могут служить основой для выявления направлений дальнейших изменений природной обстановки на исследованной территории под воздействием климатических изменений, антропогенной деятельности и современных геологических процессов [11, 12].

Современная геодинамика. Исследовано влияние процессов современной геодинамики на степень комфортности геологической среды изученной территории для населения.

Разработаны и обоснованы критерии, позволяющие оценивать степень благоприятности современной природной среды для жизнедеятельности населения. Выполнено районирование территории Белорусского Полесья по степени экологической безопасности (комфортности для жизнедеятельности населения). Установлено, что комфортность природных условий для населения зависит в наибольшей степени от проявления экстремальных видов геодинамики, распространения болот и заболоченных земель. Влияние каждого из этих факторов оценено в баллах. При их минимальных значениях природные комплексы являются благоприятными для проживания и деятельности человека.



**Рис. 4. Схема палеоландшафтов восточной части Белорусского Полесья
в оптимуме муравинского межледникового**
(авторы: д-р геол.-минерал. наук Т. Б. Рылова, акад. А. В. Матвеев, А. В. Шидловская)

**Fig. 4. Scheme of paleolandscapes of the eastern part of the Belarusian Polesie Area
in the climatic optimum of the Muravian Interglacial
(authors: D. Sc. T. B. Rylova, D. Sc. A. V. Matveev, A. V. Shidlovskaya)**

На площадях с максимальными балльными оценками происходит существенная трансформация естественной среды, что может сопровождаться ростом заболеваний населения, существенными ограничениями в размещении новых инженерных сооружений, повышением материальных затрат, необходимых для минимизации неблагоприятных последствий проявления природных условий. Разработанные схемы районирования территории могут быть использованы при планировании и осуществлении крупных инженерно-строительных работ, разработке и реализации проектов рациональной организации территорий, природоохранных мероприятий, а также мероприятий по снижению неблагоприятных последствий проживания населения в зонах повышенной геодинамической активности [13] (Институт природопользования НАН Беларусь).

Изначально в рамках совместных исследований ученых Института природопользования НАН Беларуси и Института радиологии НАН Беларуси (позднее присоединенного к Институту радиобиологии НАН Беларуси) были выделены радоновые аномалии в приповерхностных отложениях, разработана схема районирования территории по степени радоновой опасности, что нашло отражение в монографии [14]. В развитие полученных результатов на уровне закономерности была установлена пространственная сопряженность зон разрывных тектонических нарушений с ландшафтными кластерами, характеризующимися повышенной радиоопасностью независимо от радонопродуцирующего потенциала грунтов. Разработаны подходы к картированию радонопродуцирующего потенциала грунтов, учитывающие не только содержание в грунтах радона и ^{226}Ra , но и коэффициенты эманирования радона, зависящие от дисперсности грунтов, а также влияние разрывных тектонических нарушений, формирующих зоны повышенной проницаемости в земной коре и способных создавать повышенные концентрации радона в приповерхностных грунтах. Учитывается также влияние спорадически выпадающих атмосферных осадков, вымывающих радон из атмосферы, что может исказить результаты оценки радонопродуцирующего потенциала грунтов. Построена картосхема радиоопасности M 1 : 100 000 территории Гомельской городской агломерации. Подана заявка на патент Республики Беларусь на изобретение «Способ локализации зоны разрывного тектонического нарушения» (Институт радиобиологии НАН Беларусь).

Климатические исследования. Оценка происходящих изменений климата и их влияния на природную среду и климатозависимые отрасли народного хозяйства (сельское, лесное и водное хозяйства) велась в рамках пятилетнего комплексного задания, в выполнении которого участвовали ученые из учреждений НАН Беларуси, Минобразования и Минприроды. Среди важнейших результатов выделим следующие.

Получены эмпирические оценки влияния лесистости и заболоченности территории Беларуси на температурный режим и количество осадков в вегетационный период, а также модельные оценки влияния местного испарения и общей циркуляции атмосферы на средние значения и долгопериодные изменения количества осадков в Беларуси и на территориях соседних государств, позволившие объяснить пространственно-временные особенности полей осадков на территории республики в вегета-

ционный период (рис. 5). На основании полученных результатов предложен комплекс мероприятий по улучшению ситуации с влагообеспеченностью Гомельской области (материалы переданы в Совет Министров Республики Беларусь, 2019 г.). Результаты исследований положены в основу Дорожной карты по осуществлению повторного заболачивания нарушенных торфяников и адаптации водных ресурсов Гомельской области к изменениям климата.

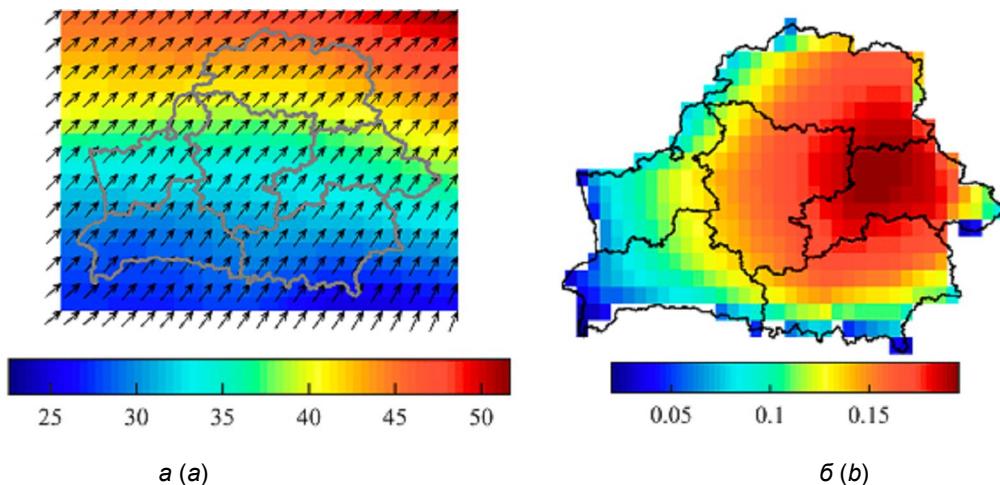


Рис. 5. Средние метеорологические поля в мае на территории Беларуси:
а – суммарный по высоте атмосферы поток влаги, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{s})$;
б – доля осадков из паров местного испарения

(авторы: д-р физ.-мат. наук С. А. Лысенко, акад. В. Ф. Логинов, канд. геогр. наук В. И. Мельник и др.)

Fig. 5. Average meteorological fields in May in Belarus:
a – total moisture flow by atmosphere height, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$;

b – share of precipitation from vapors of local evaporation

(authors: D. Sc. S. A. Lysenko, Academician V. F. Loginov, Ph. D. D. V. I. Melnik, etc.)

На основе данных спутниковых наблюдений впервые построены карты изменений листового индекса, дневной и ночной температуры подстилающей поверхности с 2000 г. для всей территории Беларуси с пространственным разрешением 1 км. Установлены различия в скорости потепления и изменении амплитуды суточного хода температуры для различных типов подстилающей поверхности в пределах каждой области. Выделены регионы со статистически значимым ростом температуры подстилающей поверхности и понижением листового индекса в вегетационный период ($p < 0,01$). Показано, что в настоящее время наиболее уязвимыми к изменениям климата регионами Беларуси являются Гомельская область и прилегающие к ней районы Могилевской области, центральная часть Брестской области, южная часть Минской области и западная часть Гродненской области. Полученные результаты позволили впервые спрогнозировать эффективность мероприятий по преобразованию подстилающей поверхности с целью смягчения неблагоприятных последствий изменения климата для всех областей и административных районов Беларуси, а также выявить регионы с наиболее высокими климатообусловленными рисками для сельского и лесного хозяйства.

Установлены закономерности влияния крупномасштабных мод общей циркуляции атмосферы и океана на температурно-влажностные характеристики климата Беларуси, что позволило учесть в прогнозах изменений климата Беларуси его естественные квазидесятилетние колебания, не описываемые современными климатическими моделями, и более точно оценить возможные негативные воздействия изменений температурно-влажностных условий на агроэкологическую обстановку в регионе [15–17] (Институт природопользования НАН Беларусь).

Уточнены границы агроклиматических областей на территории Республики Беларусь по суммам температур выше 10°C за период потепления с учетом физико-географического районирования территории; выделены новые агроклиматические районы в пределах агроклиматических областей; уточнены агроклиматические ресурсы и дана оценка агроклиматических условий произрастания основных сельскохозяйственных культур (рис. 6). Разработан комплекс мер, обеспечивающий смягчение воздействия экстремальных климатических изменений на состояние мелиорированных земель. Результаты исследований использованы при разработке Стратегии адаптации сельского хозяйства Республики Беларусь в рамках проекта Clima East [18] (Белгидромет).

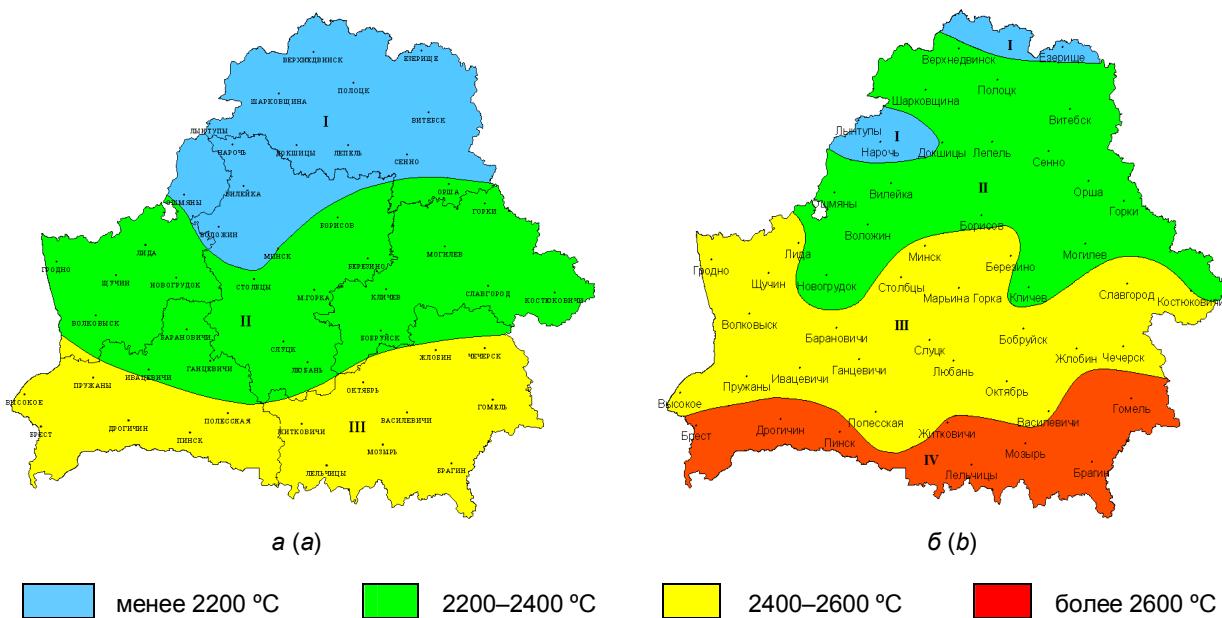


Рис. 6. Изменение границ агроклиматических областей Беларуси:
а – по А. Х. Шкляру (1973 г.); б – за период потепления 1989–2015 гг.;
I – Северная; II – Центральная; III – Южная; IV – Новая
(автор канд. геогр. наук В. И. Мельник)

Fig. 6. Changing the borders of the agroclimatic regions of Belarus:
a – according to A. H. Shklyar (1973); b – during the warming period of 1989–2015;
I – North; II – Central; III – South; IV – New
(author Ph. D. V. I. Melnik)

Выполнена оценка изменения речного стока Беларуси за период с 1961 г. Выявлено, что в среднем по стране произошло незначительное его увеличение на 0,5–4,0 % за счет бассейна р. Западной Двины, северной и северо-восточной части бассейна р. Днепр. В связи с изменением климата увеличилась неравномерность изменений речного стока как по территории Беларуси, так и по его внутригодовому распределению по сезонам года. Прогноз стока на период до 2035 г. показал возможность резкого различия между северной и южной частью республики, между малыми и большими реками (рис. 7). При незначительном изменении стока в среднем за год высока вероятность его неравномерности и разнонаправленности в сезоны и месяцы. Особенно значительно может изменяться сток в летние месяцы с его снижением во все сезоны на юге Беларуси. Вместе с тем для северной части Беларуси прогнозируются не столь значительные изменения стока, как для южной. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании объектов водохозяйственного и мелиоративного строительства, разработке целевых программ комплексного использования и охраны водных ресурсов, а также перспективны для использования в учебных программах учреждений образования. Разработки внедрены в учебный процесс Брестского государственного технического университета [19, 20] (БрГТУ).

Впервые для территории Беларуси установлены пространственно-временные особенности изменчивости радиального прироста деревьев сосны обыкновенной, дуба черешчатого, ели европейской, пихты белой, граба обыкновенного, ольхи серой, ясения обыкновенного, клена остролистного, липы мелколистной. Разработано дендрохронологическое районирование территории республики на основе годичного прироста деревьев сосны обыкновенной и построены региональные мастер-хронологии сосны, дуба. Установлены новые границы сплошного распространения ареальных древесных пород: ольхи серой и граба обыкновенного и проанализированы основные причины изменений границ. Разработаны функции отклика на климатические факторы прироста ольхи серой и граба обыкновенного и установлены основные климатические факторы, лимитирующие их распространение на границах ареалов. Выявлено усиление достоверной положительной связи прироста деревьев исследованных пород с температурами воздуха и ее ослабление с осадками при продвижении с юга на север на территории Беларуси. Моделирование показало, что в южных регионах Беларуси дальнейшее увеличение теплообеспеченности летних месяцев при сохранении или уменьшении количества осадков приведет не к увеличению, а снижению прироста деревьев, вплоть до их гибели. Выявленные закономерности позволили оценить перспективы использования различных древесных пород в лесном хозяйстве при возможном дальнейшем потеплении климата [21] (ИЭБ НАН Беларуси).

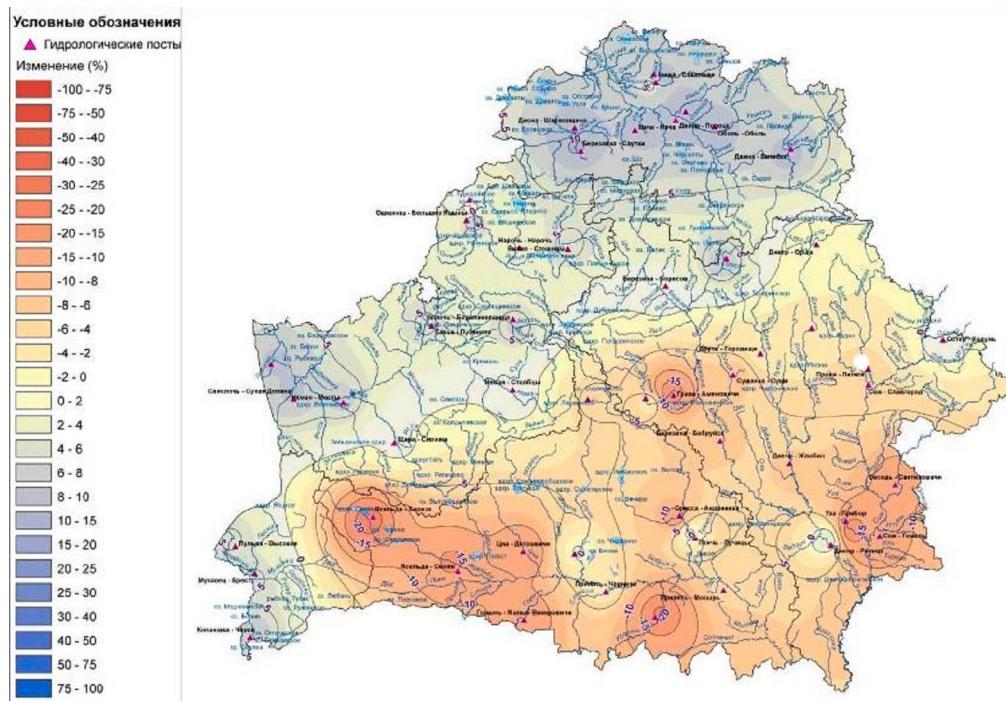


Рис. 7. Прогноз изменения поверхностного годового стока на период до 2035 г.
(авторы: д-р геогр. наук А. А. Волчек, В. Н. Корнеев и др.)

Fig. 7. Forecast of changes in surface annual runoff up to 2035.
(authors: D.Sc. A. A. Volchek, V. N. Korneev, etc.)

Показано, что проявление погодно-климатических аномалий в ближайшей и отдаленной перспективе будет приводить к кризисным явлениям в возобновляемых сосновых насаждениях на исключенных и исключаемых из сельскохозяйственного пользования кварцевопесчаных почвах. Установлено, что в условиях избыточного грунтового водного питания продукционный потенциал сосны мало зависит от погодно-климатических условий. Только экстремальные метеорологические условия оказывают на него подавляющее или стимулирующее воздействие. Потепление климата в последние 25 лет вызвало угнетение сосны, отразившись в сокращении радиального прироста почти в 2 раза. Полученные результаты могут быть полезны для принятия решений по ведению лесного хозяйства в Белорусском Полесье после водно-земельной мелиорации в изменяющихся климатических условиях и образовательных целях для подготовки специалистов в области экологии и рационального природопользования [22] (БГПУ).

Актуализированы дендрошки радиального прироста сосны, ели и лиственницы на территории Белорусского Полозерья, установлены лимитирующие радиальный прирост факторы. Разработаны модели радиального прироста, построенные на основе гармонического анализа дендрошкал хвойных пород с учетом элементов рельефа. Обоснованы возможности проведения адаптивных мероприятий мелиоративного характера на урбанизированных территориях (городское озеленение при реконструкции из гослесфонда, а также лесонасаждений санитарно-защитных зон послепожарного воздействия) для повышения устойчивости насаждений [23] (ПГУ).

Исполнителями БГТУ в 2019–2020 гг. были выполнены исследования реакции различных климатиков сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на изменение климатических условий и проведен отбор наиболее перспективных для селекции на устойчивость.

Гидроэкологические исследования. С целью повышения эффективности использования водных ресурсов и их качества выполнен ряд заданий по гидроэкологическим проблемам.

Разработана современная гидрогеологическая модель Оршанской впадины – наиболее крупного бассейна пресных и минеральных подземных вод на северо-востоке Беларуси (рис. 8). Установлено, что при общей мощности осадочных отложений в бассейне около 1800 м, почти 1200 м составляют рассоловоносные верхнепротерозойские отложения, остальная вышележащая толща представлена пресно- и солоноватыми средне-верхнедевонскими отложениями. Выделены и всесторонне охарактеризованы водоносные горизонты и комплексы. Установлено, что крепкие (до 167 г/дм³) рассолы представляют собой древний палеоконденсат (рестит) из сферы метагенетических процессов форми-

рования AR-PR1 кристаллического фундамента Оршанской впадины. При отсутствии в ней соленосных отложений этот вариант происхождения рассолов – единственно возможный. Оценены эксплуатационные запасы питьевых и минеральных вод, рекомендованы мероприятия по их охране от загрязнения и истощения. Результаты перспективны для использования Министерством жилищно-коммунального хозяйства (хозяйственно-питьевое водоснабжение) и Министерством здравоохранения (санаторно-курортная реабилитация населения) [24].

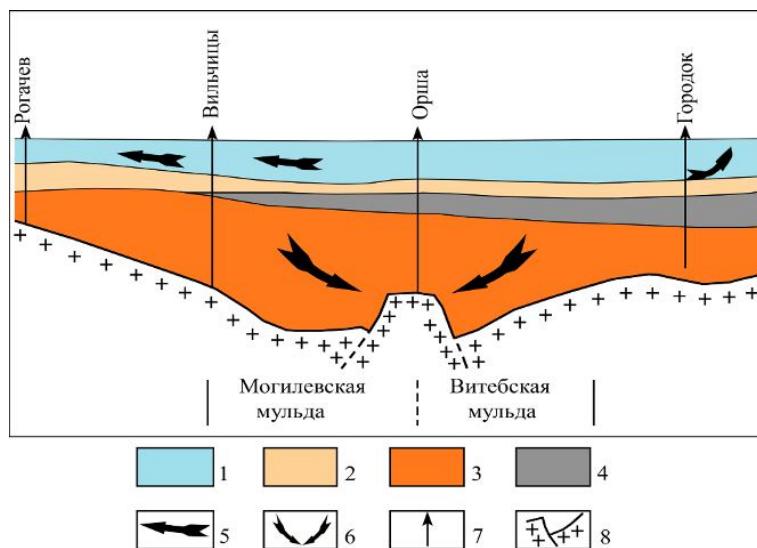


Рис. 8. Оршанская впадина.
Схема вертикальной гидрогеохимической зональности и подземной гидродинамики
(автор чл.-корр. А. В. Кудельский)

Fig. 8. Orsha depression.
Diagram of vertical hydrogeochemical zonality and underground hydrodynamics
(author D. Sc. A. V. Kudelsky)

Выполнен анализ современного состояния подземных вод Подляско-Брестского гидрогеологического бассейна на базе междисциплинарных основ геологии, анализа фактических данных наблюдений НСМОС, кадастра недр. Выделена зона гидрогеологической зональности, образованная под воздействием антропогенных факторов. Антропогенная зона характеризуется нарушенным гидрогеологическим режимом, затрагивает грунтовый горизонт и напорные горизонты, имеет локальный характер. Разработана схематическая карта поблочного питания и разгрузки грунтовых вод в реки. Результаты исследования могут быть применены для принятия решений по рациональному использованию подземных вод региона заинтересованными министерствами, а также местными органами управления г. Бреста и Брестской области (*Институт природопользования НАН Беларусь*).

Оценено загрязнение тяжелыми металлами донных отложений и высшей водной растительности рек и озер Беларусь, создана соответствующая база геоданных. Выявлены закономерности накопления тяжелых металлов высшей водной растительностью в зависимости от форм их нахождения в донных отложениях. Установлены характеристики водосборных территорий, влияющие на концентрацию металлов: преобладающие ландшафты, уровень лесистости, уровень сельскохозяйственной освоенности, наличие и расположение антропогенных источников. Определены фоновые концентрации тяжелых металлов. Аномальным содержанием элементов в погруженных макрофитах выделяются озера Снуды, Лосвидо, Малое Белое, Белое (Лунинецкий район), оз. Белое (Сурмино); контрольные участки рек Березины и Свислочи. Выявлены значимые различия между водосборами по содержанию Cr, Mn, Ni, Cu, Pb в донных осадках рек. Обнаружена прямая корреляционная связь между содержанием Zn в водах озер и тканях макрофитов. На основе многолетних наблюдений за содержанием элементов-металлов в современных донных отложениях р. Свислочи выявлена тенденция устойчивого снижения их техногенного загрязнения Cr и увеличения загрязнения Ni. Разработаны рекомендации по методам определения интегральных показателей оценки загрязнения донных осадков и высшей водной растительности рек и озер тяжелыми металлами. Полученные результаты перспективны для использования в НСМОС, а также могут быть применены при санитарно-гигиенической оценке состояния водных объектов, планировании размещения и оптимизации рекреационной инфраструктуры и др. [25, 26] (БГУ).

Выполнена оценка гидрологических и морфометрических характеристик оз. Лукомльское, оз. Нещердо, вдхр. Заславльское, оз. Выгонощанское. Проведен расчет норм допустимых рекреационных нагрузок в зонах отдыха с учетом критериев для оценки рекреационного потенциала водоемов. Предложены перспективные виды рекреации. Рекомендовано на водоемах, активно используемых в рекреационном отношении, осуществлять специализированную программу мониторинга, включающую дополнительные регионально адаптированные биологические параметры планктонных сообществ и периодичность наблюдения, согласованную с основными фазами вегетационного периода. На основе полученных результатов разработан проект ТКП «Комплексная оценка экологического риска и расчет норм допустимых рекреационных нагрузок на водоемы в зонах отдыха Беларусь», который позволит проводить расчет допустимой нагрузки на водный объект при проектировании зон рекреации на водных объектах для выполнения природоохранного законодательства в части охраны водных ресурсов [27] (РУП «ЦНИИКИВР»).

Решение проблем реабилитации нарушенных земель. В направлении реабилитации нарушенных земель наиболее активно велись работы в Полесском аграрно-экологическом институте НАН Беларусь, что позволило получить следующие важные результаты.

Определено содержание валовых и подвижных форм тяжелых металлов и микроэлементов в поверхностном (деятельном) слое основных типов почв природных и агротехногенных ландшафтов для условий юго-запада Беларусь, что обеспечивает реализацию гибкого подхода при оценке загрязнения почв [28]. Установлены субрегиональные фоновые концентрации тяжелых металлов и микроэлементов в лесных подстилках, растительном сырье, березовом соке, что позволяет осуществлять корректные сравнительные оценки при проведении мониторинговых исследований.

Установлено, что аэрогенный путь загрязнения растений тяжелыми металлами, в первую очередь свинцом, в импактных зонах некоторых предприятий по производству марочного свинца и свинцовых сплавов существенно превалирует над почвенно-корневым их поглощением и обуславливает многократное превышение содержания токсикантов в сравнении с фоновыми значениями, а также допустимыми уровнями их содержания в тканях растений. В целях минимизации соответствующих агроэкологических рисков необходима корректировка санитарно-защитных зон таких предприятий в сторону их увеличения.

Для модельных полигонов «Заболотье» и «Высокое» (Малоритский район) общей площадью около 920 га созданы электронные карты неоднородности почвенного покрова по показателям кислотности почв и их нуждаемости в известковании, а также по степени гидроморфности и карбонатности. Разработанные электронные карты позволяют с высокой точностью определять потребности отдельно взятого поля в мелиорантах с многолетним горизонтом планирования, а также использовать приемы точного земледелия, обеспечивающие дифференцированное их внесение (ПАЭИ НАН Беларусь).

Усовершенствованы математические и численные модели расчета трехмерных температурных полей во влажных дисперсных средах при отрицательных температурах, необходимые для научно обоснованного и эффективного прогноза температурных режимов при естественном и искусственном промерзании грунтов и горных пород. Разработанные численные модели позволяют управлять процессами преобразования структуры и фазового состава природных дисперсных сред при заморозке массивов горных пород для проходки шахтных стволов в сложных гидрогеологических условиях [29]. Разработано программное обеспечение прогноза и регулирования формирования температурно-влажностного режима и пучения в промерзающих горных породах при наличии в них минеральных солей (Институт природопользования НАН Беларусь).

Экологические риски и устойчивое развитие территорий. Одной из наиболее актуальных проблем формирования и развития «зеленой» экономики является снижение экологических рисков. Переход к «зеленой» экономике невозможен без действенного инструментария, обеспечивающего минимизацию социально-экономических потерь, обусловленных возникновением экологических рисков. В данном направлении разработаны методика экономической оценки экологических рисков с учетом выявленных особенностей проявления рисков природного и техногенного характера и рекомендации по формированию механизма управления экологическими рисками, возникающими в результате функционирования экологически опасных производств и стихийных бедствий, основанного на «страховой» концепции управления экологическими рисками и использовании организационно-методических, финансово-экономических и социально-психологических инструментов управления экологическими рисками [30] (БГТУ).

Впервые для Полесского региона разработана концепция агроэкологических рисков. Определено моделирование развития кормопроизводства в целях минимизации эколого-экономических рисков и повышения экономической эффективности предприятий регионального АПК. Показано, что формирование эффективной программы развития кормопроизводства с учетом существующих и потенциальных агроэкологических рисков необходимо реализовывать на основе оптимизации параметров и размеров отраслей; оно также предполагает формирование стабилизационных фондов кормов в периоды приемлемого риска на случай последующего пессимистического агроэкологического сце-

нария. Разработаны экономико-математическая модель верхнего уровня обоснования оптимальных параметров внутрихозяйственного землепользования в условиях проявления агроэкологических рисков и модельная программа оптимального внутрихозяйственного землепользования модельного объекта (на примере ОАО «Красный партизан» Малоритского района). Разработаны рекомендации по реструктуризации и оптимизации параметров внутрихозяйственного землепользования модельного объекта, обеспечивающие максимальную эффективность использования земельных ресурсов [31] (*ПАЗИ НАН Беларуси*).

Разработаны теоретические, методологические и методические основы воспроизводства экологического капитала в интересах устойчивого развития Республики Беларусь. Разработаны рекомендации по стоимостной оценке воспроизводимого природного капитала, включающие общий алгоритм проведения стоимостной оценки экологического капитала, методологический подход и методику оценки экологического капитала на основе воспроизводственной и экологической ренты. Выполнена стоимостная оценка воспроизводимого природного капитала Республики Беларусь, дана его структурная и экологическая характеристика. Выделены ключевые цели устойчивого развития, реализация которых влияет (прямо или косвенно) на воспроизводство экологического капитала. Предложен алгоритм расчета показателя ресурсоэффективности на основе экологически чистой добавленной стоимости, который апробирован на примере организаций Республики Беларусь. Практическое использование механизма воспроизводства экологического капитала позволит реализовать эффективную экологическую политику на разных уровнях управления, основанную на формировании экологического спроса и совершенствовании институциональных условий воспроизводства экологического капитала в интересах устойчивого развития [32] (*БГТУ*).

Разработано методическое обоснование необходимости применения эколого-экономической оценки деградации земель/почв, включающей не только стоимость убытков, обусловленных недобором растениеводческой продукции на пахотных и улучшенных луговых землях, но также потери, связанные с уменьшением предоставляемых землями/почвами экосистемных услуг, прежде всего за счет снижения в них питательных веществ, нарушенных многочисленных экологических функций (климато-, водо- и газорегулирующих, буферных, фильтрационных и др.). Выполнена классификация экосистемных услуг земель/почв применительно к природно-хозяйственным условиям Беларуси. Разработаны методические рекомендации по применению результатов эколого-экономической оценки сельскохозяйственных земель, включая предоставление почвами экосистемных услуг, в частности при определении размеров ущерба, нанесенного в результате проявления водно-эррозионных процессов. Полученные результаты позволяют более обоснованно решать вопросы в области совершенствования кадастровой оценки земель, определения ущерба, причиненного в результате деградации почв или изъятия земельных участков для нецелевого их использования, планирования и рациональной территориальной организации землепользования, предоставления государственных субсидий, привлечения инвестиций, формирования рынка страхования от неблагоприятных природных и техногенных процессов, оценки природного капитала, проведения рыночных сделок в системе земельных отношений и др. [33, 34] (*БГУ*).

Рациональное природопользование, создание новых технологий и препаратов. Значимое место в подпрограмме занимали вопросы рационального природопользования, разработки энерго- и ресурсосберегающих технологий получения новых материалов и препаратов, в частности конкурентоспособной продукции на основе глубокой переработки и активизации органического вещества торфа, сапропеля, бурого угля, растительных и животноводческих отходов для использования в сельском хозяйстве, топливной энергетике, химико-технологическом, природоохранном, бальнеологическом и медицинском направлениях.

Выполнено районирование территории республики по пригодности ресурсов торфа и сапропеля для комплексного использования, составлена картосхема их размещения и выделены регионы с запасами торфяного и сапропелевого сырья, перспективного для комплексной переработки (рис. 9). Разработаны методология и критерии разделения месторождений по степени перспективности для комплексной многоцелевой переработки торфяного сырья. Результаты используются в филиале «Белорусская комплексная геологоразведочная экспедиция» ГП «НПЦ по геологии» Минприроды Республики Беларусь при выполнении крупномасштабных геолого-съемочных работ [35] (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

С помощью данных дистанционного зондирования построены карты участков повторно заболоченного выработанного торфяного месторождения Докудовское и естественного болота в пойме р. Ясьельды для решения задач прогноза запасов выращенной растительной биомассы и учета источников и стоков диоксида углерода. Получение растительной биомассы с повторно заболоченных выработанных торфяных месторождений значительно уменьшает выделение в атмосферу диоксида углерода, решая тем самым важную экологическую проблему. Эколого-экономически обосновано использование фитомассы с повторно заболоченного выработанного торфяного месторождения Докудовское для производства пеллет в энергетических целях и компостов [36] (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

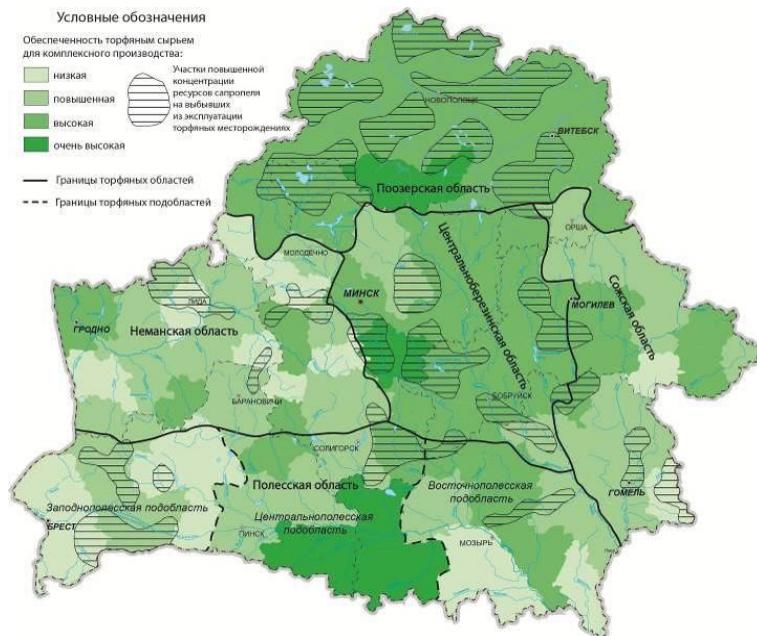


Рис. 9. Картосхема районирования территории Беларуси по обеспеченности торфо-сапропелевым сырьем для комплексного производства (авторы: д-р техн. наук Б. В. Курзо, канд. техн. наук О. М. Гайдукевич)

Fig. 9. Map of the zoning of the territory of Belarus on the provision of peat-sapropel raw materials for integrated production (authors: D. Sc. B. V. Kurzo, Ph. D. O. M. Gaydukevich)

Научно обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность использования верхового сфагнового торфа, ростков солода (отход пивоваренного производства) и кремнеземистого сапропеля в качестве компонентов новой биологически активной энтеросорбционной кормовой добавки. Подобрано местное исходное сырье и разработан состав новой кормовой добавки для поросят-отъемышей. Обоснован экструзионный способ гранулирования для получения новой кормовой добавки, разработаны лабораторный технологический регламент (ТР 100289079.038–2018) и проект технических условий на ее получение (ТУ BY 100289072.073–2018). Изучение таксономического состава микробиоты кормовой добавки показало, что основными контаминатами являются микроскопические мицелиальные грибы (микромицеты), обладающие способностью переносить условия низкой влажности, оставаясь жизнеспособными при сухом хранении довольно продолжительное время. В связи с этим для предотвращения плесневения кормовой добавки на основе торфа предложено соблюдать условия хранения и проводить регулярный микробиологический контроль. Показано, что при использовании разработанной кормовой добавки прирост живой массы в расчете на одно животное, а также среднесуточный прирост на 3,7 % выше по сравнению с контролем. Стоимость полученной дополнительной продукции за время опыта в расчете на одну голову (прибыль) по сравнению с контролем составила 0,66 у. е. [37] (Институт природопользования НАН Беларусь).

Впервые научно обоснован и экспериментально подтвержден способ модификации торфа с целью получения композиционного энтеросорбента с радиопротекторными свойствами на основе торфа и ферроцина (рис. 10). Разработаны лабораторная технология и лабораторный технологический регламент ТР 100289079.040-2020 получения композиционной кормовой добавки на основе торфа и ферроцина для снижения содержания ^{137}Cs и других техногенных токсикантов в молоке и продуктах убоя крупного рогатого скота, проект технических условий ТУ BY 100289079.083-2020 на этот продукт. Проведен научно-хозяйственный эксперимент применения разработанной добавки в рационе лактирующих коров в хозяйстве, расположенным на территории, загрязненной радионуклидами в результате аварии на ЧАЭС, показавший кратность снижения ^{137}Cs в молоке в 4,6 раза по сравнению с контролем. Применение кормовой добавки с радиопротекторными энтеросорбционными свойствами в рационе сельскохозяйственных животных позволит получать на загрязненной радионуклидами, в частности ^{137}Cs , территориях «чистую» животноводческую продукцию, а также снизить потребность в импорте из России ферроцина и, соответственно, снизить расходы на его приобретение [38] (Институт природопользования НАН Беларусь).

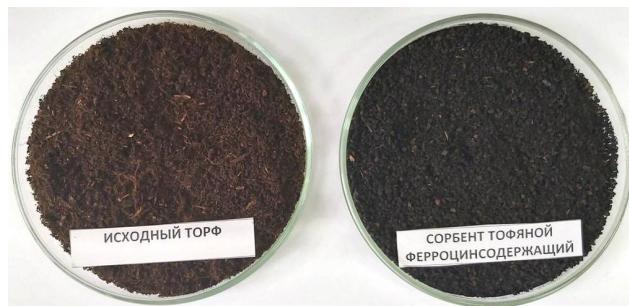


Рис. 10. Исходный торф и полученный на его основе сорбент торфяной ферроцинсодержащий
 (авторы: канд. хим. наук А. Э. Томсон, канд. техн. наук Т. В. Соколова,
 канд. техн. наук Н. Е. Сосновская и др.)

Fig. 10. Initial peat and peat ferrocinc-containing sorbent obtained on its basis
 (authors: Ph. D. A. E. Thomson, Ph. D. T. V. Sokolova, Ph. D. N. E. Sosnovskaya, etc.)

Получен новый известковый мелиорант на основе карбидной извести, установлена его высокая эффективность при известковании кислой дерново-подзолистой почвы. Использование дешевых (местных) известковых мелиорантов, получаемых из производственных отходов, позволяет решать экологические проблемы, связанные с увеличивающимся накоплением отходов в окружающей среде, а также перспективно для применения в аграрной отрасли (ПАЭИ НАН Беларуси).

В процессе термохимического превращения низкокачественных твердых горючих ископаемых и их смесевых композиций в различных сочетаниях, включающих такие комбинации, как торф – бурый уголь, торф – отходы биомассы, горючие сланцы – бурый уголь, обнаружен эффект неаддитивно высокой степени конверсии органического материала в смесевых сочетаниях, вызванный, вероятно, катализитическим действием минеральной составляющей одного компонента на органическую часть другого. Предложен способ утилизации полимерных отходов пиролизом торфополимерных композиций, позволяющий получать фракцию смолы с более высоким выходом и пиролизный газ с существенно большей теплотой сгорания, что дает основание рассматривать их в качестве высокоеффективных энергоносителей при получении тепловой и электрической энергии [39, 40] (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

Получены устойчивые во времени концентрированные медь-гуминовые (8–12 мес.), цинк-гуминовые (8–12 мес.), железо-гуминовые (8–12 мес.) и медь-цинк-гуминовые (2–3 мес.) удобрения на основе продуктов кислотного и щелочного гидролиза торфа и гуминовых кислот. Установлено, что наиболее стабильными являются жидкие микроэлементные удобрения, в которых гуминовые вещества выделены из осокового торфа 2%-ным раствором щелочи при температуре 96–98 °C в течение 1 ч. Для получения указанных жидких концентрированных гуминовых удобрений целесообразно использовать низинный торф ($R \geq 35\%$, $A < 15\%$). Аналогичные удобрения, приготовленные на основе гуминовых веществ верхового торфа, имеют меньшие сроки хранения (до 1–4 мес.) [41] (*Институт природопользования НАН Беларуси*).

Разработана предварительная технологическая схема переработки твердого остатка пиролиза резинотехнических изделий. Получены экспериментальные зависимости стадий дробления, грохочения и помола твердых продуктов пиролиза отходов резинотехнических изделий. Определены пути эффективного способа утилизации твердых продуктов, полученных на установке низкотемпературного пиролиза [42] (БГТУ).

Создана многоступенчатая сепарация тонкодисперсных частиц в центробежном пылеуловителе с применением коагуляции частиц (образованием агломератов) и рециркуляции газового потока. Предложена методика расчета эффективности сепарации частиц и влияния на нее режимных параметров; разработаны рекомендации по рациональным (оптимальным) конструктивным параметрам центробежного пылеуловителя с рециркуляционным контуром. Получены зависимости потерь давления и эффективности улавливания от скорости потока на входе и концентрации пыли в нем. По результатам исследований подготовлены и поданы две заявки на объекты права промышленной собственности: на центробежный сепаратор и циклон с рециркуляционным контуром. Разработки могут быть использованы для установления рациональных конструктивных и режимных параметров промышленных пылеуловителей при проектировании систем очистки газов в различных отраслях промышленности [43] (БГТУ).

Разработана структурная схема технологии утилизации пылепаровоздушной смеси при комплексной переработке твердых ископаемых на торфобрикетном заводе (рис. 11). Разработан комплексный подход по усовершенствованию аспирационных систем в технологии производства торфяных брикетов, позволяющих экономить ресурсы торфа, воды, тепла и электроэнергии. Эмпирически получены

математические модели взаимосвязанных параметров прямоточной двухзонной сушилки, рукавного фильтра и двухзонного противоточного теплообменника, позволяющие определять основные конструктивные параметры для проектирования аспирационных систем торфобрикетных заводов торфяной промышленности Республики Беларусь. Разработки внедрены в ГПО «Белтопгаз» – на торфобрикетных заводах используется 21 паровая трубчатая сушилка [44] (БНТУ).

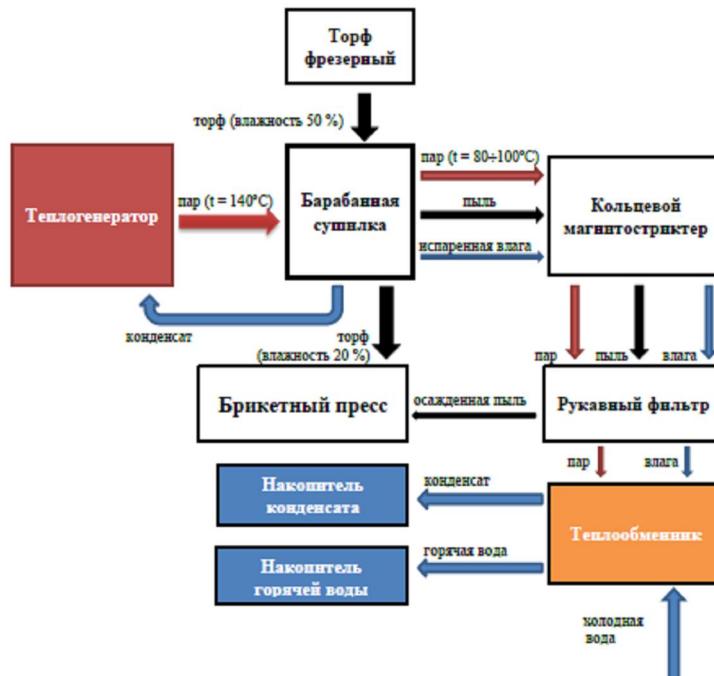


Рис. 11. Структурная схема технологического процесса утилизации пыли, тепла и влаги
(авторы: д-р техн. наук Н. И. Березовский, В. В. Борисейко)

Fig. 11. Structural diagram of the process of dust, heat and moisture recovery
(authors: D. Sc. N. I. Berezovsky, V. V. Boriseiko)

Приведенные выше отдельные результаты фундаментальных исследований в области природопользования и охраны окружающей среды дают общее представление об итогах выполнения подпрограммы «Природные ресурсы и экологическая безопасность» ГПНИ «Природопользование и экология» на 2016–2020 годы, однако не исчерпывают весь перечень достигнутых результатов.

В рамках выполнения заданий подпрограммы установлено 78 закономерностей развития природы, 145 зависимостей, разработано 50 новых методов и методик, 142 макета, создано более 80 экспериментальных образцов, 10 лабораторных технологий. Исполнители заданий активно публиковали результаты научных исследований: в 2016–2020 гг. издано 91 книжное издание, включая 34 монографии, 28 учебных пособий, 18 сборников научных трудов, 11 справочных изданий; издано 1312 научных статей, из них более 400 – за рубежом. Научная новизна разработок подтверждена 7 полученными патентами, из них 4 – на условиях охраны на территории Республики Беларусь, 3 – стран ЕАЭС (Беларусь, Россия, Казахстан), а также 12 поданными заявками на объекты права промышленной собственности. По тематике исследований, проводимых в рамках подпрограммы, подготовлено и успешно защищено 12 кандидатских и 39 магистерских диссертаций.

В результате выполнения исследований в рамках заданий подпрограммы получены значимые для науки и практики результаты, способствующие обеспечению экологической безопасности страны в соответствии со Стратегией устойчивого развития государства, реализация которой предполагает осуществление эффективных мер по защите окружающей среды, разработку и экологически безопасное применение энерго- и ресурсосберегающих технологий с учетом интенсификации развития производственных сил и социально-экономических отношений, обеспечение безопасности жизнедеятельности населения.

Использование полученных научных разработок. Заинтересованность в разработке геоэкологических и экотехнологических инновационно ориентированных подходов рационального использования природных ресурсов, обеспечивающих устойчивое, экологически безопасное природопользование, выразили Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды, его организации и предприятия, Министерство образования, Министерство энергетики Республики Беларусь, а также

такие организации, как проектно-исследовательское коммунальное унитарное предприятие «Минскградо», научно-проектное республиканское унитарное предприятие «БелНИИПградостроительства» Министерства архитектуры и строительства Республики Беларусь, республиканское объединение «Белагросервис» и др. Полученные при выполнении заданий научные результаты активно внедрялись в заинтересованные в их использовании организации и учреждения.

По результатам исследований создана научно-техническая продукция в рамках более 500 прямых хозяйственных договоров с отечественными организациями и предприятиями, а также при выполнении 52 международных проектов и грантов. Результаты фундаментальных исследований использованы при подготовке 79 проектов заданий и мероприятий в прикладные государственные программы, 10 инновационных проектов.

Заключение. Развитие фундаментальных исследований, направленных на решение вопросов, связанных с природно-ресурсным обеспечением социально-экономического развития страны и улучшением состояния среды жизнедеятельности человека, в настоящее время осуществляется в соответствии с приоритетным направлением научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 годы «3. Энергетика, строительство, экология и рациональное природопользование», утвержденным Указом Президента Республики Беларусь от 07.05.2020 г. № 156. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 27.07.2020 г. № 438 и постановлением Президиума НАН Беларуси от 24.12.2020 г. № 53 утверждена ГПНИ «Природные ресурсы и окружающая среда» на 2021–2025 годы, в состав которой включена подпрограмма «Природные ресурсы и их рациональное использование». Головными организациями-исполнителями указанной подпрограммы утверждены Институт природопользования НАН Беларуси и Белорусский государственный университет.

Цели подпрограммы: получение новых знаний о закономерностях развития окружающей среды Беларуси под влиянием природных и антропогенных факторов, особенностях формирования, размещения, ресурсообеспеченности и использования природных ресурсов; оценка степени комфортности окружающей среды для населения Республики Беларусь. По результатам государственной экспертизы в план важнейших научно-исследовательских работ по подпрограмме «Природные ресурсы и их рациональное использование» на 2021–2025 годы включено шесть комплексных научных заданий, в рамках которых будут решаться проблемные вопросы в области природопользования. Ниже приведем отдельные важнейшие направления научных исследований, запланированных к выполнению.

Планируется разработка и совершенствование научно-методического обеспечения оценки уровней и территориальной структуры загрязнения атмосферного воздуха с учетом локальных источников, регионального и трансграничного переноса на основе данных наземных и спутниковых измерений и моделирования. Кроме того, будет решаться проблемный вопрос загрязнения природной среды пластиком и микропластиком, которые обнаруживаются в различных природных средах и представляют собой новую угрозу природным экосистемам и здоровью человека. Результаты исследований будут востребованы при совершенствовании НСМОС, а также при разработке мероприятий, национальных планов и программ по снижению антропогенного воздействия на окружающую среду.

Будут выполнены исследования по оценке и разработке оптимальной пространственно-временной организации природных и техногенных подсистем в городах и зонах их влияния для целей устойчивого развития. В рамках задания будет разработан комплекс рекомендаций, ориентированных на практическое использование при разработке и корректировке Генеральных планов городов, организации ландшафтно-рекреационных территорий, использовании, воспроизводстве и управлении природными ресурсами. Результаты исследований станут вкладом в улучшение микроклимата в городах, в превращение урбанизированных территорий в комфортную среду обитания.

Планируется выполнение комплексной оценки геоэкологических рисков на территории Беларуси, связанных с динамикой ландшафтов, влиянием экологически опасных объектов на качество окружающей среды для населения, с радиоопасностью жилых и производственных помещений. Актуальна разработка системы новых, наиболее информативных ландшафтных, геодинамических, гидрогеологических и геохимических индикаторов и проведения на их основе актуальной типизации территорий по степени их комфортности и (или) геоэкологической опасности для населения. Будут разработаны научно обоснованные мероприятия по экологически безопасному использованию природных ресурсов и функционированию экологоопасных объектов с целью минимизации геоэкологических рисков для населения.

В подпрограмму входит комплексное задание, направленное на оценку современных и будущих тенденций изменений климатических характеристик на территории Беларуси в контексте их влияния на погодозависимые отрасли экономики, природные ресурсы и условия жизнедеятельности населения. Будут разработаны методы, модели и геоинформационные системы анализа и прогноза пространственно-временных изменений климата на территории Беларуси, получит

развитие дендрохронологический банк данных Беларуси, его интеграция в базу мирового центра палеоклиматологических данных. Будет разработано пособие по рациональному использованию поверхностных и подземных вод в условиях изменяющегося климата для территорий, характеризующихся интенсивным водоотбором.

Учеными и специалистами Министерства образования Республики Беларусь инициировано и развивается направление по оценке современных изменений природной среды и ландшафтов территории Беларуси с учетом социально-экономических и экологических факторов. Будут разработаны система национальных индикаторов природопользования для реализации целей устойчивого развития Республики Беларусь, классификация и типология культурных ландшафтов для сохранения природного и историко-культурного наследия республики, методические рекомендации оценки экосистемных услуг агроландшафтов.

Ярко выраженной практической значимостью отличается комплексное задание по разработке биосферно-совместимых и энергоэффективных методов использования и переработки ресурсов твердых горючих ископаемых с целью получения экологобезопасной продукции с регулируемыми свойствами. Будут созданы новые комплексные удобрения пролонгированного действия, адсорбенты, высококонцентрированные гуматные продукты, препараты бальнеологического назначения, торфяные, сапропелевые и растительные экстракты, новые материалы, снижающие солевой стресс у растений при применении противогололедных реагентов на основе хлористого натрия. Будут разработаны принципиально новые подходы осуществления процессов получения активированных углеродных материалов, базирующиеся на снижении энергопотребления за счет использования современной термоустойчивой керамики специального назначения, устойчивой в агрессивных средах. В области переработки полимерных отходов на основе использования процессов термодеструкции будут разработаны новые принципы утилизации стремительно возрастающих объемов отработанных полимерсодержащих материалов (полиэтилен, полипропилен, полистирол и др.), являющихся основными компонентами бытовых отходов. Будет обоснован вариант конструктивного исполнения стадий переработки твердых продуктов пиролиза отходов резинотехнических изделий и нефтяного кокса в сырьевые компоненты для их дальнейшего применения. Внедрение запланировано на ООО «РТС групп». Планируется разработка комплексного подхода для снижения воздействия на окружающую среду на предприятиях, использующих местные виды топлива. Будет разработана и внедрена принципиально новая ресурсосберегающая и экологобезопасная скважинная технология добычи залегающего под торфом сапропеля.

Залогом успешной практической реализации поставленных на 2021–2025 гг. задач являются наличие и развитие научных школ в головных организациях-исполнителях по подпрограмме. Выполнение запланированных научно-исследовательских работ будет способствовать повышению эколого-экономической эффективности использования природных ресурсов и охраны окружающей среды. Научные результаты получат развитие в рамках прикладных научно-технических программ.

Список использованных источников

1. Какарека, С. В. Аммиак в атмосферном воздухе: источники поступления, уровни содержания, регулирование / С. В. Какарека, А. В. Мальчикина. – Минск : Беларусская наука, 2016. – 253 с.
2. Какарека, С. В. Использование модели AERMOD для оценки рассеивания выбросов формальдегида при производстве древесных сплоистых материалов / С. В. Какарека, С. В. Саливончик, Ю. Г. Кокош // Метеорология и гидрология. – 2019. – № 5. – С. 40–49.
3. Kakareka, S. Air pollutants and greenhouse gases emission inventory for power plants in the Antarctic / S. Kakareka // Advances in Polar Science. – 2020. – Vol. 31, no. 4. – C. 274–283.
4. Miatselskaya, N. Atmospheric aerosol distribution in the Belarus-Ukraine region by the GEOS-Chem model and AERONET measurements / N. Miatselskaya, V. Kabashnikov, G. Milinevsky, A. Chaikovsky, V. Danylevsky, V. Bovchaliuk // International journal of remote sensing. – 2016. – Vol. 37. – P. 3181–3195.
5. Bozhkova, V. Long-term trends of total ozone content over mid-latitudes of the Northern Hemisphere / V. Bozhkova, A. Liudchik, S. Umreiko // International journal of remote sensing. – 2019. – Vol. 40. – P. 5216–5229.
6. Струк, М. И. Территориальная организация земель пригородной зоны Минска / М. И. Струк, С. Г. Живнach // Природопользование. – 2017. – Вып. 31. – С. 65–72.
7. Ландшафтно-экологические аспекты формирования природного каркаса города / Л. А. Кравчук [и др.] // Современное ландшафтно-экологическое состояние и проблемы оптимизации природной среды регионов : материалы XIII Междунар. ландшафт. конф., посвящ. столетию со дня рожд. Ф. Н. Милькова, Воронеж, 14–17 мая 2018 г. : в 2 т. / ред.: В. Б. Михно [и др.]. – Воронеж : ИСТОКИ. – 2018. – Т. 1. – С. 368–370.
8. Николайчук, А. М. Результаты исследования плотности и размеров устьиц листовых пластинок древесных растений, произрастающих в условиях загрязнения выбросами предприятий цементной промышленности / А. М. Николайчук, П. Н. Белый, М. Н. Вашкевич // Проблемы лесоведения и лесоводства. – 2020. – № 80. – С. 217–227.
9. Чертко, Н. К. Геохимическая оптимизация ландшафтов / Н. К. Чертко. – Минск : Четыре четверти, 2018. – 168 с.

10. Кузьмин, С. И. О преобразовании природоохранной территории «Заповедное Поозерье» в биосферный трансграничный резерват ЮНЕСКО / С. И. Кузьмин // Черные дыры в Российском законодательстве. – М., 2019. – № 3. – С. 94–96.
11. Изменения окружающей среды в позднеледниковые и голоцене на юго-востоке Беларуси / В. П. Зерницкая [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 5. – С. 584–596.
12. Рылова, Т. Б. Ландшафты восточной части Белорусского Полесья в климатическом оптимуме муравинского межледникового / Т. Б. Рылова, А. В. Матвеев, А. В. Шидловская // Природопользование. – 2020. – № 2. – С. 50–68.
13. Матвеев, А. В. Влияние процессов современной геодинамики на степень комфортности геологической среды для населения на территории восточной части Белорусского Полесья / А. В. Матвеев, В. П. Зерницкая // Вестник Брестского государственного университета. Сер. 5, Химия, биология, науки об Земле. – 2020. – № 1. – С. 94–104.
14. Матвеев, А. В. Радон в геологических комплексах Беларуси / А. В. Матвеев, А. К. Карабанов, М. И. Автушко. – Минск : Беларусская наука, 2017. – 136 с.
15. Логинов, В. Ф. Изменения климата: тренды, циклы, паузы / В. Ф. Логинов, В. С. Микуцкий. – Минск : Беларусская наука, 2017. – 179 с.
16. Логинов, В. Ф. Современные изменения глобального и регионального климата / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко. – Минск : Беларусская наука, 2019. – 315 с.
17. Логинов, В. Ф. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 1-е и 2-е изд. – Минск : Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
18. Герменчук, М. Г. Состояние, тенденции и последствия изменения климата в Республике Беларусь / М. Г. Герменчук, В. И. Мельник, В. И. Ключенович // Природные ресурсы. – 2017. – № 1. – С. 77–84.
19. Волчек, А. А. Паводки на реках Беларуси / А. А. Волчек, Т. А. Шелест. – Брест : БГУ, 2016. – 199 с.
20. Водные ресурсы Беларуси и их прогноз, в рамках которых будут решаться проблемные вопросы в области природопользования. Ни с учетом изменения климата / А. А. Волчек, В. Н. Корнеев, С. И. Парфомук, И. А. Булак. – Брест : Альтернатива, 2017. – 228 с.
21. Synchronous Growth Releases in Peatland Pine Chronologies as an Indicator for Regional Climate Dynamics – A Multi-Site Study Including Estonia, Belarus and Sweden / A. Potapov [et al.] // Forests. – 2019. – Vol. 10 (12). – P. 1097–1115.
22. Матюшевская, Е. В. Факторы изменчивости радиального прироста деревьев / Е. В. Матюшевская. – Минск : БГУ, 2017. – 232 с.
23. Болботунов, А. А. Особенности сезонного годичного прироста древесины хвойных пород в насаждениях на севере Беларуси / А. А. Болботунов, Е. В. Дегтярева // Вестник ПГУ. Сер. F. – 2020. – № 8. – С. 29–32.
24. Кудельский, А. В. Гидрогеология и минеральные воды Беларуси / А. В. Кудельский. – Минск : Беларусская наука, 2017. – 285 с.
25. Lukashev, O. V. Geochemical analysis of Belarusian lake bottom sediments / O. V. Lukashev, B. P. Vlasov, N. V. Zhukovskaya // Acta Geographica Silesiana. – 2016. – Vol. 22. – P. 35–42.
26. Własow, B. P. Zmiany stanu hydroekologicznego Jeziora Orzechowskiego (zachodnie Polesie Białoruskie) pod wpływem melioracji jego zlewni / B. P. Własow, T. Szczypk // Acta Geographica Silesiana. – 2020. – Vol. 14/2 (38). – S. 29–44.
27. Гертман, Л. Н. Расчет норм допустимых рекреационных нагрузок на водоемы Беларуси / Л. Н. Гертман, П. П. Рутковский // Природопользование. – 2017. – Вып. 31. – С. 50–58.
28. Михальчук, Н. В. Тяжелые металлы и микроэлементы в фоновых почвах и агроландшафтах юго-запада Беларуси / Н. В. Михальчук // Агроэкологический журнал. – 2017. – № 3. – С. 27–31.
29. Бровка, Г. П. Совершенствование аналитических и численных моделей расчета температурных полей в промерзающих грунтах / Г. П. Бровка, К. А. Агутин, М. В. Мучко // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации : материалы 13-й науч.-практ. конф. – М., 2017. – С. 313–319.
30. Неверов, А. В. Особенности оценки экологических рисков природного и техногенного характера / А. В. Неверов, О. А. Варапаева, Н. А. Масилевич // Труды БГТУ. Сер. 5, Экономика и управление. – 2018. – № 1 (208). – С. 41–47.
31. Конончук, В. В. Моделирование важнейших параметров внутрихозяйственного землепользования в АПК / В. В. Конончук // Проблемы прогнозирования и государственного регулирования социально-экономического развития : материалы XXI Междунар. науч. конф., Минск, 22–23 окт. 2020 г. – Минск : НИЭИ Минэкономики, 2020. – Т. 3. – С. 175–177.
32. Неверов, А. В. Воспроизводство экологического капитала в контексте реализации целей устойчивого развития / А. В. Неверов, А. В. Равино, Н. А. Масилевич // Культура и экология – основы устойчивого развития России. Культурные и экологические императивы современной экономики : материалы Междунар. форума, г. Екатеринбург, 13–15 апр. 2020 г. – Екатеринбург, 2020. – Ч. 1. – С. 282–285.
33. Яцухно, В. М. Агроресурсный потенциал административных районов Беларуси: оценка состояния и современное использование / В. М. Яцухно // Вестник БГУ. Сер., Химия. Биология. География. – 2016. – № 3. – С. 144–148.
34. Особенности правового режима, оценки и картографирования сельскохозяйственных земель сельскохозяйственного назначения / О. С. Гагарина [и др.]. – Горки : БГСХА, 2018. – 187 с.
35. Курзо, Б. В. Возможности совместного освоения месторождений торфа и сапропеля для целей сельского хозяйства в Беларуси / Б. В. Курзо, Т. И. Макаренко, О. М. Гайдукевич // Труды Института : науч. журн. – Тверь, 2019. – Вып. 19 (72). – С. 26–32.
36. Созинов, О. В. Оперативная оценка по спутниковым снимкам пригодности фитоценозов на торфяниках к заготовке надземной фитомассы / О. В. Созинов, А. А. Яновский // VIII Галкинские чтения : материалы Междунар. науч. конф. – СПб. : БИН РАН, 2017. – С. 108–111.

37. Биологически активная кормовая добавка с сорбционными свойствами для поросят-отъемышей / А. Э. Томсон [и др.] // Природопользование. – 2019. – № 1. – С. 249–261.
38. Энтеросорбционная ферроцинсодержащая кормовая добавка на основе торфа / А. Э. Томсон [и др.] // Природопользование. – 2020. – № 2. – С. 125–131.
39. Энергетехнологическое использование биомассы / И. И. Лиштван [и др.] // Изв. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. – 2016. – № 4. – С. 91–101.
40. Лиштван, И. И. Перспективы глубокой переработки твердых горючих ископаемых Беларуси / И. И. Лиштван, В. М. Дударчик, В. М. Крайко // Химия твердого топлива. – 2017. – № 5. – С. 3–9.
41. Бамбалов, Н. Н. Новое поколение комплексных гранулированных органоминеральных удобрений пролонгированного действия / Н. Н. Бамбалов, Г. А. Соколов // Земледелие и растениеводство. – 2020. – № 4(131). – С. 28–32.
42. Энергоэффективные мельницы ударного действия / А. Э. Левданский [и др.]. – Шымкент : Тип. «Элем», 2020. – 272 с.
43. Мытько, Д. Ю. Математическое моделирование движения газового потока в циклоне с рециркуляционным контуром / Д. Ю. Мытько, П. С. Гребенчук // Материалы 84-й науч.-техн. конф. проф.-препод. состава, науч. сотр. и аспирантов (с междунар. участием). – Минск, 2020. – С. 123–126.
44. Березовский, Н. И. Математическое моделирование процессов пылеулавливание рукавными фильтрами / Н. И. Березовский, В. В. Борисейко // Горная механика и машиностроение. – 2020. – № 3 – С. 56–61.

References

1. Kakareka S. V., Mal'chihina A. V. *Ammiak v atmosfernom vozduhe: istochniki postupleniya, urovni so-derzhaniya, regulirovanie* [Ammonia in ambient air: sources of input, levels, regulation]. Minsk, 2016, 253 p. (in Russian)
2. Kakareka S. V., Salivonchik S. V., Kokosh Yu. G. *Ispol'zovanie modeli AERMOD dlya ocenki rasseyivaniya vybrosov formal'degida pri proizvodstve drevesnyh sloistyh materialov* [Using the AERMOD Model to Estimate the Dissipation of Formaldehyde Emissions from Wood Laminate Manufacturing]. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*, 2019, vol. 5, pp. 40–49. (in Russian)
3. Kakareka S. Air pollutants and greenhouse gases emission inventory for power plants in the Antarctic. *Advances in Polar Science*. 2020, vol. 31, no. 4, pp. 274–283.
4. Miatselskaya N., Kabashnikov V., Milinevsky G., Chaikovsky A., Danylevsky V., Bovchaliuk V. Atmospheric aerosol distribution in the Belarus-Ukraine region by the GEOS-Chem model and AERONET measurements. *International journal of remote sensing*, 2016, vol. 37, pp. 3181–3195.
5. Bozhkova V., Liudchik A., Umreiko S. Long-term trends of total ozone content over mid-latitudes of the Northern Hemisphere. *International journal of remote sensing*, 2019, vol. 40, pp. 5216–5229.
6. Struk M. I., Zhivnach S. G. *Territorial'naya organizaciya zemel' prigorodnoj zony Minska* [Territorial organization of lands in the suburban zone of Minsk]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2017, issue 31, pp. 65–72. (in Russian)
7. Kravchuk L. A., Sanec E. V., Struk M. I., Homich V. S. *Landshaftno-ekologicheskie aspekty formirovaniya prirodnogo karkasa goroda* [Landscape and ecological aspects of the formation of the natural frame of the city]. *Materialy XIII Mezhdunar. landshaftnoj konf. «Sovremennoe landshaftno-ekologicheskoe sostoyanie i problemy optimizacii prirodnogo sredy regionov»* [Proc. of the XIII Int. landscape conf. "Modern landscape and ecological state and problems of optimization of the natural environment of the regions"]. Voronezh, 2018, vol. 1, pp. 368–370. (in Russian)
8. Nikolajchuk A. M., Belyj P. N., Vashkevich M. N. *Rezul'taty issledovaniya plotnosti i razmerov ust'ic listovyh plastinok drevesnyh rastenij, proizrastayushchih v usloviyah zagryazneniya vybrosami predpriyatij cementnoj promyshlennosti* [Results of studying the density and size of stomata of leaf blades of woody plants growing in conditions of pollution by emissions from the cement industry]. *Problemy lesovedeniya i lesovedstva = Problems of forestry and forest science*, 2020, vol. 80, pp. 217–227. (in Russian)
9. Chertko N. K. *Geohimicheskaya optimizaciya landshaftov* [Geochemical optimization of landscapes]. Minsk, 2018, 168 p. (in Russian)
10. Kuz'min S. I. *O preobrazovanii prirodoohhrannoj territorii «Zapovednoe Poozer'e» v biosfernij transgranichnyj rezervat YUNESKO* [On the transformation of the nature conservation area 'Zapovednoe Poozerye' into a biosphere transboundary UNESCO reserve]. *Chernye dyry v Rossiskom zakonodatel'stve = Black holes in Russian legislation*. Moscow, 2019, vol. 3, pp. 94–96. (in Russian)
11. Zernickaya V. P., Novenko E. Yu., Stanchikaje M., Vlasov B. P. *Izmeneniya okruzhayushchej sredy v pozdneleldnikov'e i golocene na yugo-vostoke Belarusi* [Environmental Changes in the Late Glacial and Holocene in the South-East of Belarus]. *Doklady NAN Belarusi = Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no 5, pp. 584–596. (in Russian)
12. Rylova T. B., Matveev A. V., Shidlovskaya A. V. *Landshafty vostochnoj chasti Belorusskogo Poles'ya v klimaticheskom optimume muravinskogo mezhdelenikov'ya* [Landscapes of the eastern part of the Belarusian Polesie in the climatic optimum of the Muravinsky interglacial]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2020, no. 2, pp. 50–68. (in Russian)
13. Matveev A. V., Zernickaya V. P. *Vliyanie processov sovremennoj geodinamiki na stepen' komfortnosti geologicheskoy sredy dlya naseleniya na territorii vostochnoj chasti Belorusskogo Poles'ya* [Influence of the processes of modern geodynamics on the degree of comfort of the geological environment for the population on the territory of the eastern part of the Belarusian Polesie]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo universiteta = Vestnik of Brest state University*, 2020, vol. 1, pp. 94–104. (in Russian)
14. Matveev A. V., Karabanov A. K., Avtushko M. I. *Radon v geologicheskikh kompleksah Belarusi* [Radon in geological complexes of Belarus]. Minsk, 2017, 136 p. (in Russian)

15. Loginov V. F., Mikuckij V. S. *Izmeneniya klimata: trendy, cikly, pauzy* [Climate change: trends, cycles, pauses]. Minsk, 2017, 179 p. (in Russian)
16. Loginov V. F., Lysenko S. A. *Sovremennye izmeneniya global'nogo i regional'nogo klimata* [Modern changes in the global and regional climate]. Minsk, 2019, 315 p. (in Russian)
17. Loginov V. F., Lysenko S. A., Mel'nik V. I. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, opportunities for regulation]. Minsk, 2020, 264 p. (in Russian)
18. Germenchuk M. G., Mel'nik V. I., Klyuchenovich V. I. *Sostoyanie, tendencii i posledstviya izmeneniya klimata v Respublike Belarus'* [State, trends and consequences of climate change in the Republic of Belarus]. *Prirodnye resursy = Natural resources*, 2017, no. 1, pp. 77–84. (in Russian)
19. Volchek A. A., Shelest T. A. *Pavodki na rekakh Belarusi* [Floods on the rivers of Belarus]. Brest, 2016, 199 p. (in Russian)
20. Volchek A. A., Kornev V. N., Parfomuk S. I., Bulak I. A. *Vodnye resursy Belarusi i ikh prognoz s uchetom izmeneniya klimata* [Water resources of Belarus and their forecast taking into account climate change]. Brest, 2017, 228 p. (in Russian)
21. Potapov A., Toomik S., Yermokhin M., Edvardsson J., Lilleleht A., Kiviste A., Kaart T., Metslaid S., Järvet A., Hordo M. Synchronous Growth Releases in Peatland Pine Chronologies as an Indicator for Regional Climate Dynamics – A Multi-Site Study Including Estonia, Belarus and Sweden. *Forests*, 2019, vol. 10 (12), pp. 1097–1115.
22. Matyushevskaya E.V. *Faktory izmenchivosti radial'nogo prirosta derev'ev* [Factors of variability of radial growth of trees]. Minsk, 2017, 232 p. (in Russian)
23. Bolbotunov A. A., Degtyareva E. V. *Osobennosti sezonnogo godichnogo prirosta drevesiny hvojnyh porod v nasazhdeniyah na severe Belarusi* [Features of the seasonal annual growth of coniferous wood in plantations in the north of Belarus]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta = Vestnik of Polotsk State University*, 2020, vol. 8, pp. 29–32. (in Russian)
24. Kudel'skij A. V. *Gidrogeologiya i mineral'nye vody Belarusi* [Hydrogeology and mineral waters of Belarus]. Minsk, 2017, 285 p. (in Russian)
25. Lukashev O. V., Vlasov B. P., Zhukovskaya N. V. Geochemical analysis of Belarusian lake bottom sediments. *Acta Geographica Silesiana*, 2016, vol. 22, pp. 35–42.
26. Własow B. P., Szczypek T. Zmiany stanu hydroekologicznego Jeziora Orzechowskiego (zachodnie Polesie Białoruskie) pod wpływem melioracji jego zlewni. *Acta Geographica Silesiana*. 2020, vol. 14/2 (38), pp. 29–44. (in Polish)
27. Gertman L. N., Rutkovskij P. P. *Raschet norm dopustimyh rekreacionnyh nagruzok na vodoemny Belarusi* [Calculation of the norms of permissible recreational loads on water bodies of Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2017, no. 31, pp. 50–58. (in Russian)
28. Mihail'chuk N. V. *Tyazhelye metally i mikroelementy v fonovyh pochvah i agrolandshaftah yugo-zapada Belarusi* [Calculation of the norms of permissible recreational loads on water bodies of Belarus]. *Agroekologichniy zhurnal = Agroecological journal*, 2017, vol. 3, pp. 27–31. (in Russian)
29. Brovka G. P., Agutin K. A., Muchko M. V. *Sovershenstvovanie analiticheskikh i chislennyh modelej rascheta temperaturnyh polej v promerzayushchih gruntah* [Improvement of analytical and numerical models for calculating temperature fields in freezing soils]. *Perspektivy razvitiya inzhenernyh izyskanij v stroitel'stve v Rossiskoj Federacii: materialy 13-oj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Proc. of 13th sci.-pract. conf. ‘Prospects for the development of engineering surveys in construction in the Russian Federation’]. Moscow, 2017, pp. 313–319. (in Russian)
30. Neverov A. V., Varapaea O. A., Masilevich N. A. *Osobennosti ocenki ekologicheskikh riskov prirodnogo i tekhnogennogo haraktera* [Features of the assessment of environmental risks of natural and man-made nature]. *Trudy Belorusskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proc. of the Belarusian State Technical University], 2018, vol. 1 (208), pp. 41–47. (in Russian)
31. Kononchuk V. V. *Modelirovanie vazhnejsih parametrov vnutrihozyajstvennogo zemlepol'zovaniya v APK* [Modeling the most important parameters of on-farm land use in the agro-industrial complex]. *Materialy XXI Mezhdunar. nauch. konf. «Problemy prognozirovaniya i gosudarstvennogo regulirovaniya social'no-ekonomicheskogo razvitiya»* [Proc. of the XXI Int. sci. conf. “Problems of forecasting and state regulation of socio-economic development”]. Minsk, 2020, vol. 3, pp. 175–177. (in Russian)
32. Neverov A. V., Ravino A. V., Masilevich N. A. *Vosprozvodstvo ekologicheskogo kapitala v kontekste realizacii celej ustojchivogo razvitiya* [Reproduction of environmental capital in the context of the implementation of sustainable development goals]. *Materialy mezhdunar. foruma «Kul'tura i ekologiya – osnovy ustojchivogo razvitiya Rossii. Kul'turnye i ekologicheskie imperativy sovremennoj ekonomiki»* [Proc. Int. forum Culture and ecology are the foundations of sustainable development in Russia. Cultural and environmental imperatives of modern economics]. Ekaterinburg, 2020, vol. 1, pp. 282–285. (in Russian)
33. Yacuhno V. M. *Agroresursnyj potencial administrativnyh rajonov Belarusi: ocenka sostoyaniya i sovremennoe ispol'zovanie* [Agroresource potential of the administrative regions of Belarus: assessment of the state and modern use]. *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta = Vestnik of Belarus State University*, 2016, vol. 3, pp. 144–148. (in Russian)
34. Gargarina O. S. [et al.] *Osobennosti pravovogo rezhima, ocenki i kartografirovaniya sel'skohozyajstvennyh zemel' sel'skohozyajstvennogo naznacheniya* [Features of the legal regime, assessment and mapping of agricultural land for agricultural purposes]. Gorki, 2018, 187 p. (in Russian)
35. Kurzo B. V., Makarenko T. I., Gajdukevich O. M. *Vozmozhnosti sovmestnogo osvoeniya mestorozhdenij torfa i sapropelya dlya celej sel'skogo hozyajstva v Belarusi* [Possibilities of joint development of peat and sapropel deposits for agricultural purposes in Belarus]. *Trudy Instorf'a : nauchnyj zhurnal = Instorf's Works : scientific journal*. Tver', 2019, vol. 19 (72), pp. 26–32. (in Russian)

36. Sozinov O. V., Yanovskij A. A. *Operativnaya ocenka po sputnikovym snimkam prigodnosti fitocenozov na torfyanikah k zagotovke nadzemnoj fitomassy* [Operational assessment of the suitability of phytocenoses on peatlands for harvesting aboveground phytomass from satellite images]. *Materialy mezhdunar. nauch. konf. «VIII Galkinskije chteniya»* [Proc. Int. sci. conf. 'VIII Galkin's Readings']. Saint-Petersburg, 2017, pp. 108–111. (in Russian)
37. Tomson A. E., Naumova G. V., Linkevich S. A., Ovchinnikova T. F., Sokolova T. V., Caryuk T. Ya., Zhmakova N. A., Makarova N. L., Navosha Yu. Yu., Sosnovskaya N. E., Pekhtereva V. S., Falyushina I. P., Makeenko A. A. *Biologicheski aktivnaya kormovaya dobavka s sorbcionnymi svojstvami dlya porosyat-ot'emshej* [Biologically active feed additive with sorption properties for weaning pigs]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2019, no. 1, pp. 249–261. (in Russian)
38. Tomson A. E., Sokolova T. V., Sosnovskaya N. E., Navosha Yu. Yu., Caryuk T. Ya., Pekhtereva V. S., Falyushina I. P., Carenok A. A. *Enterosorbionnaya ferrocinsoderzhashchaya kormovaya dobavka na osnove torfa* [Enterosorption ferrocin-containing peat-based feed additive]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2020, no. 2, pp. 125–131. (in Russian)
39. Lishtvan I. I., Dudarchik V. M., Krajko V. M., Anufrieva E. V., Smolyachkova E. A. *Energotekhnologicheskoe ispol'zovanie biomassy* [Energy technological use of biomass]. *Izvestiya NAN Belarusi. Seriya himicheskikh nauk*, 2016, no. 4, pp. 91–101. (in Russian)
40. Lishtvan I. I., Dudarchik V. M., Krajko V. M. *Perspektivy glubokoj pererabotki tverdyh goryuchih iskopaemyh Belarusi* [Prospects for deep processing of solid fossil fuels in Belarus]. *Himiya tverdogo topliva = Solid Fuel Chemistry*, 2017, no. 5, pp. 3–9. (in Russian)
41. Bambalov N. N., Sokolov G. A. *Novoe pokolenie kompleksnyh granulirovannyh organomineral'nyh udobrenij prolongirovannogo dejstviya* [New generation of complex granular organomineral fertilizers with prolonged action]. *Zemledelie i rastenievodstvo = Agriculture and plant growing*, 2020, no. 4(131), pp. 28–32. (in Russian)
42. Levdanskij A. E., Golubev V. G., Sarsenbekuly D., Zhumadullaev D. K. *Energoeffektivnye mel'nicy udarnogo dejstviya* [Energy efficient impact mills]. Shymkent, 2020, 272 p. (in Russian)
43. Myt'ko D. Yu., Grebenchuk P. S. *Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya gazovogo potoka v ciklone s recirkulyacionnym konturom* [Mathematical modeling of the movement of a gas flow in a cyclone with a recirculation loop]. *Materialy 84-j nauch.-tekhn. konf. professorsko-prepodavatel'skogo sostava, nauchnyh sotrudnikov i aspirantov (s mezhdunarodnym uchastiem)* [Proc. of the 84th sci.-tech. conf. faculty, researchers and graduate students (with international participation)]. Minsk, 2020, pp. 123–126. (in Russian)
44. Beregovskij N. I., Borisejko V. V. *Matematicheskoe modelirovanie processov pyleulavlivanie rukavnymi fil'trami* [Mathematical modeling of dust collection processes by bag filters]. *Gornaya mehanika i mashinostroenie = Mining mechanics and mechanical engineering*, 2020, no. 3, pp. 56–61. (in Russian)

Информация об авторах

Лысенко Сергей Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий Центром климатических исследований, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: lysenko.nature@gmail.com

Камышенко Галина Анатольевна – кандидат технических наук, ученый секретарь, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kamyshenka@tut.by

Information about the authors

Sergey A. Lysenko – D. Sc. (Physical and Mathematical), Professor, Head of Center for Climate Research, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: lysenko.nature@gmail.com

Halina A. Kamyshenka – Ph. D. (Technical), Scientific Secretary, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kamyshenka@tut.by

ОЦЕНКА УВЛАЖНЕНИЯ И УЯЗВИМОСТИ ПОЧВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЕЛЬ БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ К ЗАСУХАМ

**В. И. Мельник¹, В. М. Яцухно², А. Н. Червань³, Г. А. Камышенко¹,
Н. Г. Пискунович¹, И. В. Буяков¹**

¹*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь;*

²*Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь;*

³*Институт почвоведения и агрохимии, Минск, Беларусь*

Аннотация. Приведены результаты изучения и дана оценка увлажнения почв сельскохозяйственных земель Белорусского Полесья в условиях современного изменения климата. Определена повторяемость почвенных засух. Данна сравнительная оценка изменения повторяемости почвенных засух периода до потепления (1951–1980 гг.) и современного периода (1989–2018 гг.). Установлена цикличность в изменении среднего числа случаев с почвенными засухами. Определены показатели степени уязвимости почв сельскохозяйственных земель региона к засухам. Приведены разномасштабные карты степени уязвимости почв сельскохозяйственных земель к засухам Белорусского Полесья в целом и Калинковичского района Гомельской области.

Ключевые слова: изменение климата; сельскохозяйственные земли; влажность почвы; почвенные засухи; уязвимость почв к засухам; Белорусское Полесье.

Для цитирования. Мельник В. И., Яцухно В. М., Червань А. Н., Камышенко Г. А., Пискунович Н. Г., Буяков И. В. Оценка увлажнения и уязвимости почв сельскохозяйственных земель Белорусского Полесья к засухам // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 27–40.

ESTIMATES OF MOISTURE AND VULNERABILITY OF SOILS OF AGRICULTURAL LANDS OF THE BELARUSIAN POLESIE TO DROUGHT

**V. I. Melnik¹, V. M. Yatsukhno², A. N. Chervan³, H. A. Kamyshenka¹,
N. G. Piskunovich¹, I. V. Buyakov¹**

¹*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;*

²*Belarusian State University, Minsk, Belarus;*

³*Institute for Soil Science and Agrochemistry, Minsk, Belarus*

Abstract. The evaluation of soil moistening of farmlands of the Belarusian Polesie under the conditions of modern climate change is given. The frequency of occurrence of soil droughts has been determined. A comparative assessment of the change in the frequency of soil droughts during the pre-warming period (1951–1980) and the modern period (1989–2018) is given. The cyclical nature of the change in the average number of cases with soil droughts has been established. Indicators of the degree of vulnerability of soils of farmlands in the region to droughts have been determined. A map of the degree of vulnerability of soils of farmlands to droughts of the Belarusian Polesie and Kalinkovichi district of the Gomel region is presented.

Keywords: climate change; agricultural land; soil moisture; soil droughts; soil vulnerability to droughts; Belarusian Polesie.

For citation. Melnik V. I., Yatsukhno V. M., Chervan A. N., Kamyshenka H. A., Piskunovich N. G., Buyakov I. V. Estimates of moisture and vulnerability of soils of agricultural lands of the Belarusian Polesie to drought. *Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 27–40.

Введение. Наибольший экономический ущерб сельскому хозяйству в Беларуси приносят засухи. Особенno это касается территории Белорусского Полесья, где негативные последствия изменения климата (высокие температуры воздуха, увеличение повторяемости засух, волн тепла и др.) проявляются в большей мере. Отрицательное влияние засух на растениеводческую отрасль, вызванных погодными условиями, во многом обусловлено преобладанием в структуре сельскохозяйственных земель региона легких песчаных, рыхлых супесчаных и осущеных мелкозалежных торфяных почв, наиболее чувствительных к погодным условиям и климатическим изменениям. Поэтому в настоящее время становится

важной и актуальной оценка пространственно-временных изменений почвенных засух для выработки конкретных рекомендаций по использованию наиболее уязвимых к засухам почв.

В данной статье объектом исследования являются запасы продуктивной влаги почвы в слое 0–20 см под сельскохозяйственными культурами на полевых наблюдательных участках государственной сети гидрометеорологических наблюдений Брестской и Гомельской областей за период с 1989 по 2018 г. Цель исследования – провести оценку увлажнения почв сельскохозяйственных земель Белорусского Полесья по запасам продуктивной влаги в слое 0–20 см; продолжительности и повторяемости почвенных засух; уязвимости почв сельскохозяйственных земель Белорусского Полесья в условиях современного изменения климата.

Материалы и методы исследований. Исходными данными для выполнения работы являются: данные Государственного климатического кадастра; запасы продуктивной влаги почвы в слое 0–20 см под сельскохозяйственными культурами на постоянных наблюдательных полевых участках государственной сети гидрометеорологических наблюдений Брестской и Гомельской областей за период с 1989 по 2018 г. Началом почвенной засухи считались запасы продуктивной влаги 10 мм и менее в слое 0–20 см. Начальной степенью повреждения сельскохозяйственных культур из-за засух считались запасы влаги в слое почвы 0–20 см менее влажности разрыва капиллярной связи (ВРК), используемые в дальнейшем для оценки степень уязвимости почв засухам. Анализ материалов, построение рисунков, таблиц выполнено с применением программного пакета MS Office Excel. В качестве картографической основы для иллюстрации и территориального размещения почв сельскохозяйственных земель с разной степенью уязвимости к засухам использована цифровая почвенная карта Белорусского Полесья.

Результаты и их обсуждение. В Белорусском Полесье, как и в целом на территории Беларуси, с конца 1980-х годов отмечаются существенные изменения климата. Особенностями этих изменений являются высокая повторяемость теплых зим, раннее наступление весенних процессов, увеличение продолжительности и теплообеспеченности вегетационного периода, незначительное увеличение (в среднем на 3–4 %) годового количества осадков, повышение повторяемости засух, волн тепла, высоких температур воздуха и др. [1–5]. Полесский регион отличается большей повторяемостью атмосферных и почвенных засух, что связано с более высоким температурным режимом, недостаточным увлажнением и более легкими по механическому составу почвами. За последние 30 лет наиболее обширные и интенсивные засухи, нанесшие наибольший ущерб сельскохозяйственному производству в регионе, отмечены в 1989, 1992, 1994, 1999, 2002, 2004, 2010, 2013, 2014, 2015, 2018 г. За несколько последних лет (2014, 2015, 2018) в результате засух на юге Беларуси понижение уровня грунтовых вод стало сравнимым по величине с их понижением за весь период осушительной мелиорации в Полесье [5].

Оценка увлажнения территории по запасам влаги. В настоящей статье для оценки увлажнения территории использованы запасы продуктивной влаги почвы в слое 0–20 см на наблюдательных полевых участках государственной сети гидрометеорологических наблюдений Брестской и Гомельской областей за период с 1989 по 2018 г. На территории Белорусского Полесья за период потепления в целом наблюдается тенденция снижения запасов продуктивной влаги в верхнем слое почвы. На рис. 1 приведены значения ежегодных запасов влаги, которые определялись в пунктах наблюдений на одних и тех же постоянных полевых участках, что дает возможность оценивать тенденции изменения влагозапасов только от погодных условий.

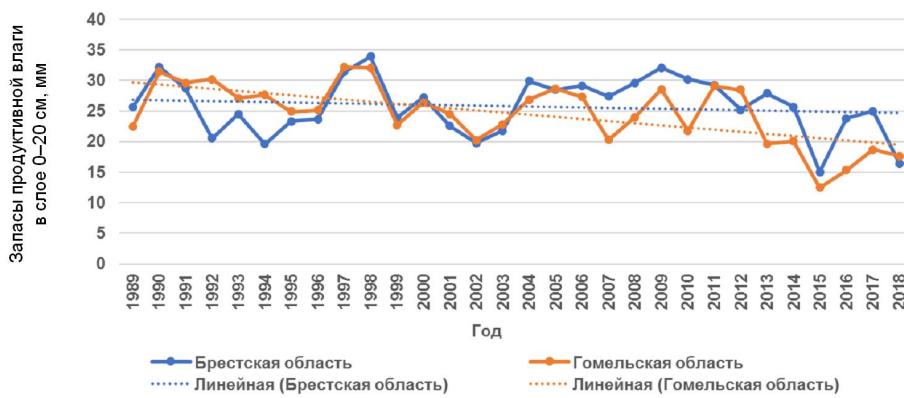


Рис. 1. Изменение средних запасов продуктивной влаги (мм) в слое 0–20 см по Брестской и Гомельской областям за май – август за период потепления (1989–2018 гг.) на постоянных полевых участках

Fig. 1. Change in the average reserves of productive moisture (mm) in the 0–20 cm layer in the Brest and Gomel regions for May – August during the warming period (1989–2018) on permanent field plots

Для расчета повторяемости и продолжительности засух использованы данные влагозапасов всех участков, на которых проводилось определение влажности почвы. Использование данных всех участков с различными по механическому составу почв (кроме торфяных) дает возможность увеличить объемы выборки по влажности почвы и уточнить повторяемость почвенных засух, приведенных в работе [1]. Началом почвенной засухи, в соответствии с установленными критериями, считаются запасы продуктивной влаги 10 мм и менее в слое 0–20 см [6]. Эти критерии были взяты за основу при расчетах повторяемости и продолжительности почвенных засух. Наибольшая повторяемость почвенных засух отмечается на участках с песчаными и рыхлыми супесчаными почвами, подстилаемыми песками в пунктах Брест, Ганцевичи, Дрогичин, Полесская, Пружаны, Гомель, Октябрь, Мозырь, Василевичи, Жлобин (рис. 2).

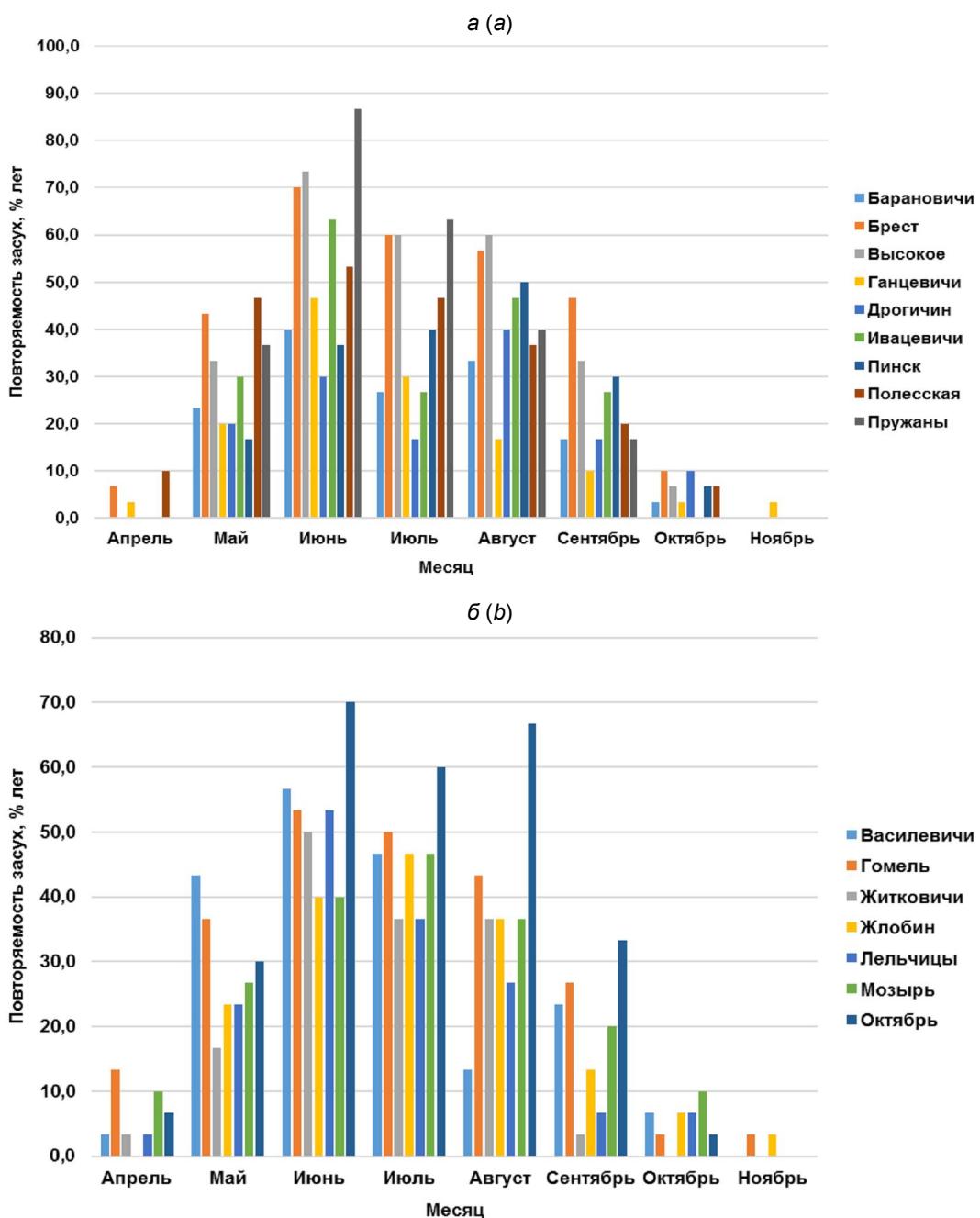


Рис. 2. Повторяемость лет (%) с почвенными засухами в слое 0–20 см по месяцам на наблюдательных участках по данным пунктов наблюдений Брестской (а) и Гомельской (б) областей

Fig. 2. Frequency of years (%) with soil droughts in the 0–20 cm layer by months at the observation sites according to the data of observation points of the Brest (a) and Gomel (b) regions

Наименьшая повторяемость почвенных засух отмечена в пунктах наблюдений Житковичи и Пинск.

Исследования показали, что за период потепления сроки наступления почвенных засух весной отмечаются раньше, чем прежде. До периода потепления почвенные засухи в апреле в Брестской области не отмечались, а повторяемость их в Гомельской области не превышала 6 %. За 1989–2018 гг. повторяемость засух в Брестской области в апреле составила 20 %, в Гомельской области выросла до 27 % (рис. 3). Наибольшая повторяемость почвенных засух наблюдается в июне (Брестская – 93 %, Гомельская – 87 %), июле (87 % в обеих областях) и августе (Брестская – 87 %, Гомельская – 93 %). В мае повторяемость засух за период потепления в Брестской области выросла в 5 раз. В среднем за вегетационный период увеличение повторяемости засух в Гомельской области составило 15 % и в Брестской области – 18 %.

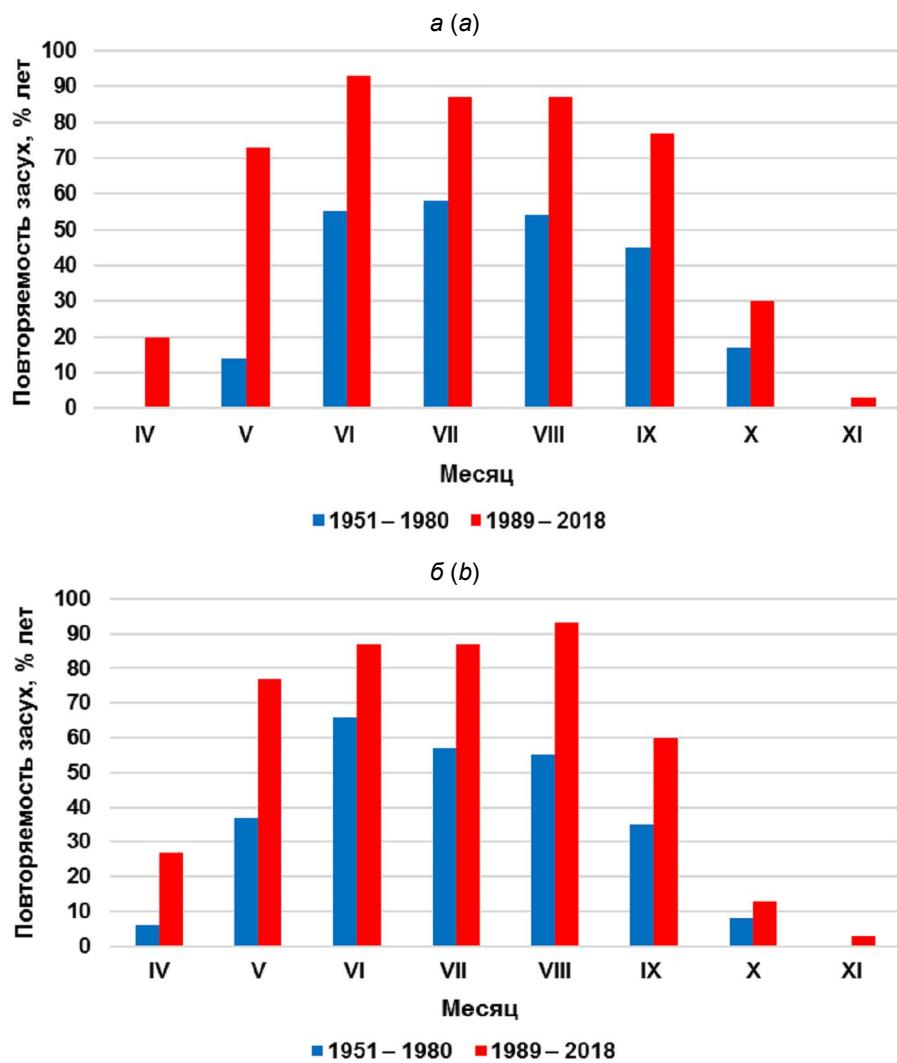


Рис. 3. Изменение повторяемости (%) лет с почвенными засухами в Белорусском Полесье:
а – Брестская область, б – Гомельская область

Fig. 3. Change in the frequency of occurrence (%) of years with soil droughts in the Belarusian Polesia:
a – Brest region, b – Gomel region

Продолжительность почвенных засух. Нередко во время вегетации растений почвенная засуха в пахотном слое может удерживаться на протяжении трех декад подряд и более. Такая засуха считается опасным агрометеорологическим явлением [7]. Для дальнейших сокращений почвенную засуху продолжительностью 3 декады и более условно назовем **сильной** засухой. За 1989–2018 гг. повторяемость сильных засух в целом за вегетационный период (апрель – октябрь) в Брестской области составила 80 % и в Гомельской области – 77 %. Наиболее часто сильные засухи встречаются в июне – августе. Их максимальная продолжительность зафиксирована: в Гомеле (08.07.2014–18.09.2014), Бресте (18.07.2003–28.09.2003), Высоком (18.07.2002–28.09.2002 и 18.06.2015–28.08.2015) –

8 декад; в Жлобине (18.07.1994–18.09.1994), Ганцевичах (28.06.1994–28.08.1994), Дрогичине (28.06.1994–28.08.1994), Василевичах (18.05.2013–18.07.2013), Ивацевичах (18.07.2002–18.09.2002), Полесской (18.07.2002–18.09.2002) – 7 декад.

Повторяемость (%) лет с сильными засухами в летний период по месяцам наиболее выражена в пунктах наблюдений в Брестской области, особенно в пунктах наблюдений Брест, Пружаны, Высокое. В Гомельской области повторяемость наиболее сильных засух отмечена в пунктах наблюдений Василевичи, Гомель, Октябрь. Наибольшая повторяемость сильных засух на станциях Брестской и Гомельской областей наблюдается в июне и августе, что объясняется в первую очередь существенным уменьшением осадков в эти месяцы за период потепления (рис. 4).

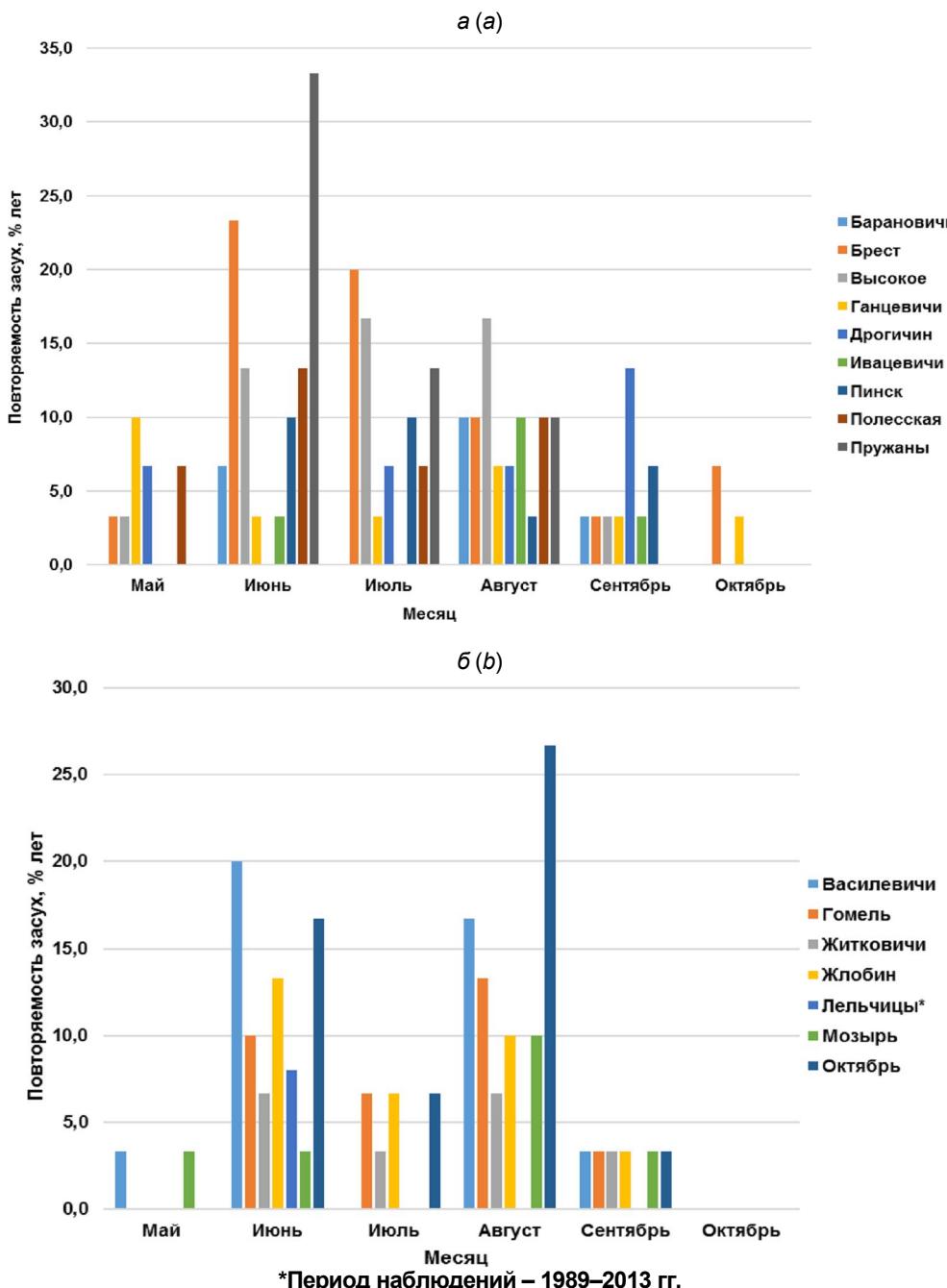


Рис. 4. Повторяемость (%) лет почвенных засух в слое 0–20 см продолжительностью 3 декады и более в Белорусском Полесье по метеостанциям Брестской (а) и Гомельской (б) областей

Fig. 4. Frequency (%) of years of soil droughts in a layer of 0–20 cm with a duration of 3 decades or more in Belorussian Polesie according to meteorological stations in Brest (a) and Gomel (b) regions

При сравнении повторяемости лет с сильными почвенными засухами периода 1989–2018 гг. с данными периода 1951–1980 гг. (до потепления), взятыми из работы [7], отмечается значительный рост повторяемости сильных засух в обеих областях в течение всего периода вегетации за период потепления. Особенно существенная разность наблюдается в мае – августе. Повторяемость сильных засух в Брестской области за период потепления во все месяцы, за исключением июля, выше, чем в Гомельской, хотя за период до потепления повторяемость сильных засух была выше в Гомельской области (рис. 5).

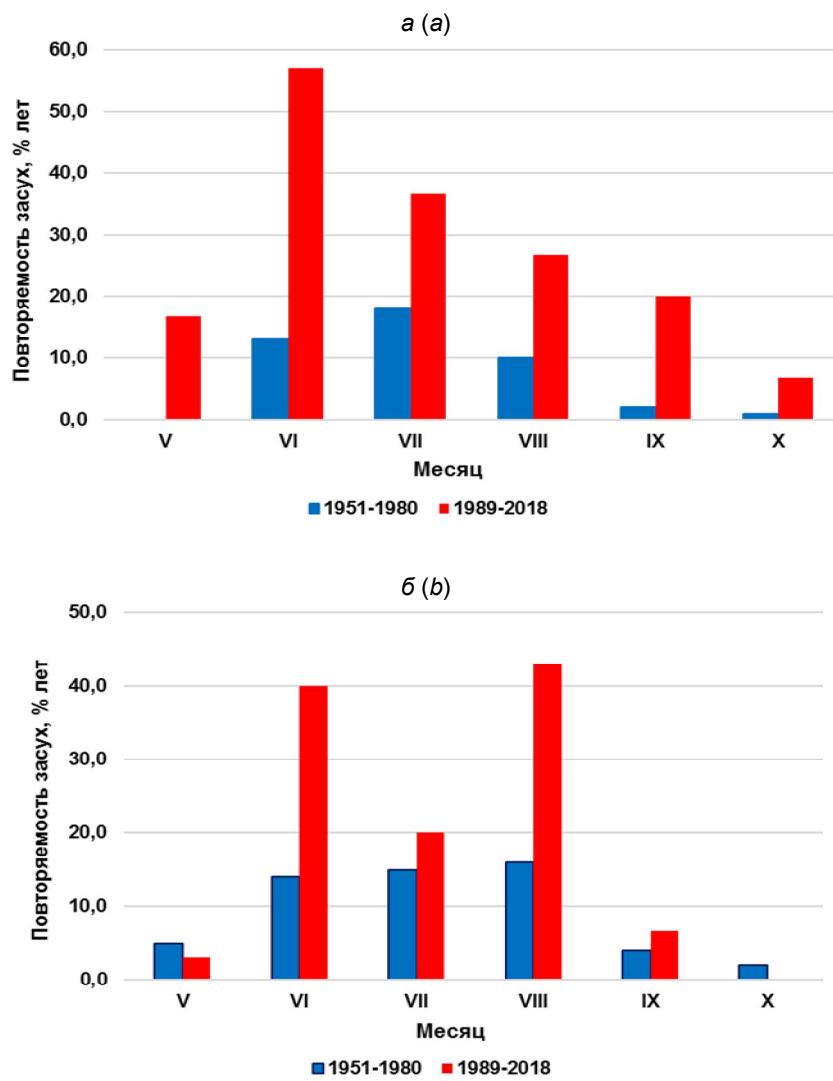


Рис. 5. Изменение повторяемости (%) лет с сильными засухами в слое 0-20 см продолжительностью три декады и более в Белорусском Полесье Брестская (а) и Гомельская (б) области

Fig. 5. Change in the frequency of occurrence (%) of years with severe droughts in the 0-20 cm layer lasting three decades or more in the Belarusian Polesie Brest (a) and Gomel (b) regions

Проведенные исследования показали наличие цикличности в количестве почвенных засух на территории Белорусского Полесья с периодом 9–12 лет, которая может быть вызвана глобальными процессами в атмосфере [1, 5]. Исходя из цикличности количества почвенных засух, можно прогнозировать их уменьшение в вегетационный период 2019–2022 гг. и их максимальный рост примерно к 2025–2026 гг. (рис. 6).

Пространственно-временные изменения повторяемости засух и их продолжительности, выявленные циклы изменения числа почвенных засух необходимо учитывать на ближайшую перспективу при планировании и обосновании рациональных технологий возделывания сельскохозяйственных культур на территории Белорусского Полесья.

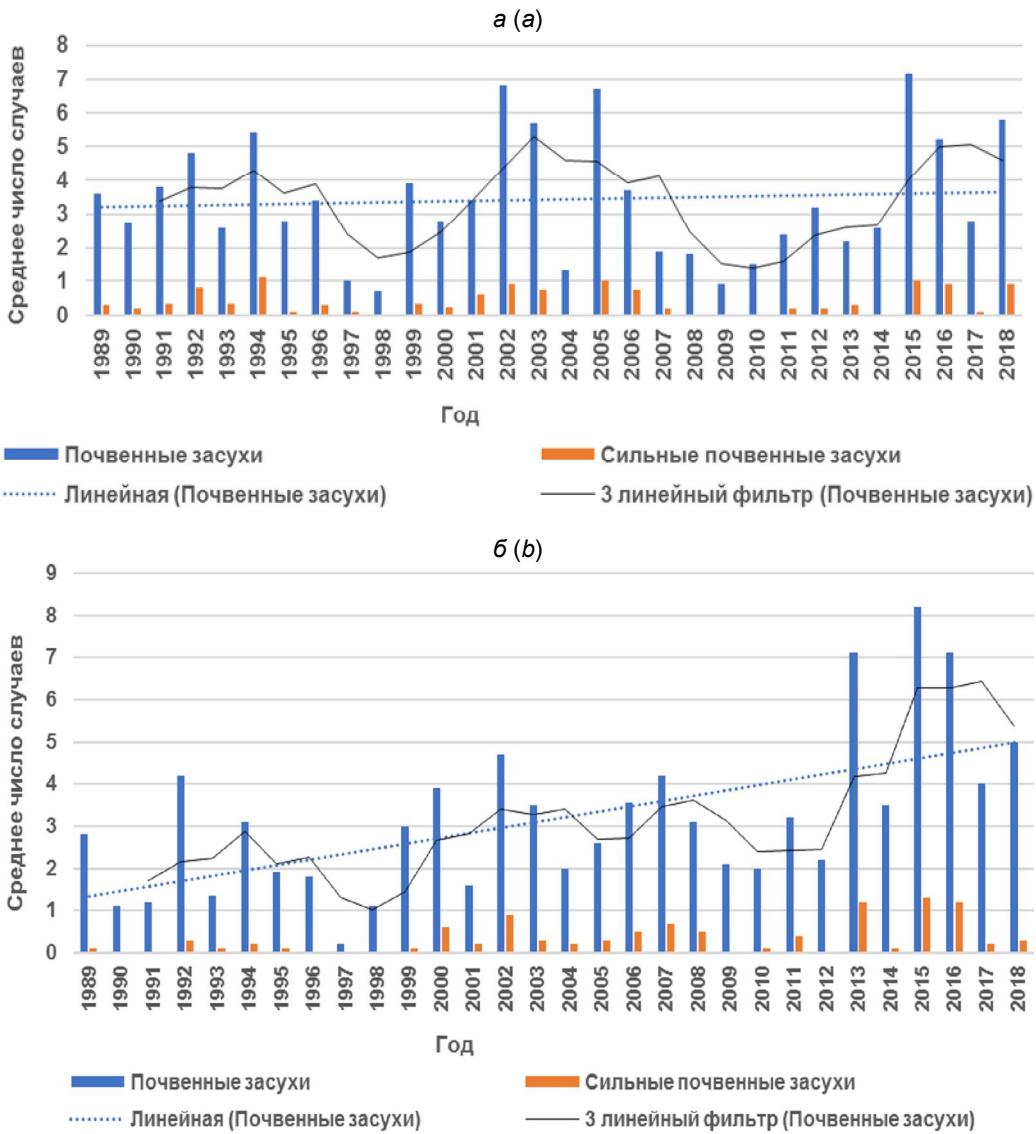


Рис. 6. Динамика изменения среднего числа случаев с почвенными засухами и сильными почвенными засухами по пунктам наблюдений Брестской (а) и Гомельской (б) областей за 1989–2018 гг.

Fig. 6. Dynamics of changes in the average number of cases with soil droughts and severe soil droughts by observation points of Brest (a) and Gomel (b) regions for 1989–2018

Оценки уязвимости почв к засухам. Влажность почв является ключевой переменной в системе классификации засух. С одной стороны, она может рассматриваться как индикатор почвенной засухи, так как в значительной мере контролирует транспирацию и рост растений, а с другой – влажность почвы является показателем и метеорологической, и гидрологической засух, поскольку обеспечивает агрегированную оценку количества доступной влаги, обусловленную балансом количества осадков, испарения и разных видов водного стока. Таким образом, почва как природное биокосное образование в зависимости, прежде всего, от ее водно-физических свойств, обладает свойством смягчения отрицательных воздействий климатических изменений, в частности проявления засух и засушливых явлений. Успешное выполнение подобной функции во многом определяет степень уязвимости почв, которая трактуется как «склонность и предрасположенность к неблагоприятным климатическим воздействиям» [8]. Уязвимость является функцией характера, величины и скорости климатических изменений, которым подвергаются почвы. На уязвимость почв оказывают влияние не только их внутренние свойства, особенности и структурный состав, но для нее имеют существенное значение внешние социально-экономические и экологические факторы, которые во многом определяют способность почв противостоять изменяющимся климатическим условиям [9]. Могут

наблюдаться и обратные тенденции, когда подобные факторы содействуют (усиливают) степень восприимчивости почвенного покрова к таким изменениям и снижают его адаптивный потенциал.

Использование в сельскохозяйственных целях широкого спектра почв Белорусского Полесья различных по степени гидроморфизма и водного режима от автоморфных до глееватых и глеевых, а также гранулометрического состава – от рыхлых песчаных до суглинистых и торфяных почв, позволяет типизировать почвенный покров сельскохозяйственных земель региона по степени уязвимости к засухам. Выявление внутрирегиональных и локальных различий степени уязвимости почв сельскохозяйственных земель к засухам региона позволит рационально обосновать меры, направленные на смягчение их негативных последствий.

В опубликованном справочнике Всемирной метеорологической организации (ВМО) по использованию системы показателей к индексам засушливости, в том числе почвенной, предлагается использовать индекс дефицита почвенной влаги (SMDI) и индекс запасов почвенной влаги (SWS) [10]. Однако их использование более адекватно в условиях аридного, полуаридного и сухого гумидного климатов, отличающихся долговременным протеканием засух и вызываемыми ими засушливыми явлениями. Для условий гумидного климата, которым характеризуется территория Беларуси, отличающегося разновременным и частым чередованием засушливых и переувлажненных явлений, целесообразно использовать для оценки влажности почв агрогидрологические константы почв [11–13]. В определении последнихложен принцип разделения почвенной влаги по степени ее связности, подвижности и доступности растениям. С целью типизации характеристик увлажнения почв и определения их гидрологических особенностей и режимов, нами были применены методические подходы, использованные Т. А. Романовой и изложенные в монографии [14]. В указанных и других аналогичных работах, посвященных данной проблеме, подчеркивается, что водный режим почв и влагообеспеченность растений неразрывно связаны между собой, в связи с чем последнюю следует оценивать категориями и понятиями влагообеспечения почв. Она представляет собой количественный показатель и может выражаться через отношение запасов продуктивной влаги в почве к запасу, соответствующему наименьшей (предельно полевой) влагоемкости (ППВ) почв к диапазону активной влаги или интервалу оптимального увлажнения. Верхним пределом оптимального содержания влаги в почве принимается наименьшая влагоемкость (НВ), а нижним интервал влаги равен 0,6–0,8 НВ, что соответствует влажности разрыва капиллярной связи (ВРК). Последняя категория влаги в почве отражает величину влажности, при которой подвешенная влага в процессе испарения теряет склонность и перестает передвигаться к испаряющей поверхности, являясь нижним пределом доступной растениям влаги.

Исходными данными оценки уязвимости почв к засухам служили сведения о влагозапасах почв в слое 0–20 см, с использованием данных декадного разрешения, полученных на 17 метеостанциях Белорусского Полесья в течение вегетационного периода (апрель – октябрь), за 30-летний период (1989–2018 гг.). По количеству дней за вегетационный период с запасами влаги почв меньше величины ВРК в слое 0–20 см все исследуемые почвы были разделены на четыре группы: наиболее уязвимые – более 130 дней; сильноуязвимые – 91–130; среднеуязвимые – 50–90; слабоуязвимые – менее 50 дней. С учетом приведенных критериев на основании обобщения значительного объема данных наблюдений за влажностью почвы на наблюдательных участках пунктов гидрометеорологических наблюдений, расположенных на территории Белорусского Полесья, выполнена группировка основных почв, по степени уязвимости к засухам. Указанная группировка учитывала и основывалась на генетических признаках и свойствах, обусловливающих поведение влаги в почвенном профиле. Дифференциация степени уязвимости проводилась по иерархическому принципу – исходя из таксономических уровней классификации почвенного покрова в следующем порядке: тип – подтип – род – вид [15]; при этом границы почвенных разновидностей как наименьших естественно генетически обусловленных таксонов учитывались в пространственном анализе степени уязвимости на уровне административных районов и хозяйств. На типовом уровне учтены типы минеральных и органогенных (торфяно-болотных) почв. Аллювиальные почвы в силу сложного водного режима, обусловленного паводковыми водами, а, следовательно, соответствующим режимом, в анализе не участвовали и составили группу слабоуязвимых к засухам почв. Латеральный сток почвенно-грунтовых вод составляет не менее 60 % объема влаги, приходящей в почвенный профиль, поэтому положение в рельефе зачастую предопределяет степень гидроморфизма наряду с гранулометрическим составом почв и генезисом почвообразующих пород. Степень увлажненности является главной дифференцирующей характеристикой уязвимости почв к засухе и определяет временные изменения почвенно-гидрологических констант, отражающих качественно-количественные переходы влаги в системе почва – растение [16–19].

В качестве картографической основы для иллюстрации и территориального размещения почв сельскохозяйственных земель с разной степенью уязвимости к засухам была использована цифровая почвенная карта Белорусского Полесья, охватывающая аграрное землепользование площадью более

2 900,0 тыс. га, расположенное в 40 административных районах (рис. 7). Из всего компонентного состава почвенного покрова Беларуси, представленного 443 почвенными разновидностями, 230 из них размещены в Белорусском Полесье. Подобное разнообразие почв существенно отразилось на выраженной мозаичности расположения почв региона по степени устойчивости к засухам. Как следует из рис. 7, регион Белорусского Полесья характеризуется существенным внутрирегиональным различием и территориальной дифференциацией почв сельскохозяйственных земель по этому показателю. В первую очередь это обусловлено, с одной стороны, значительной долей в структуре сельскохозяйственных земель легких песчаных и рыхлых супесчаных почв (Брестская область – 62,9 %, Гомельская область – 70,1 %), а с другой – разной степенью заболоченных и торфяных почв, которые по-разному реагируют на проявление атмосферных засух. В результате проведенных исследований установлено, что доля наиболее и сильно уязвимых к засухам почв сельскохозяйственных земель занимает 29,8 %, или 793,3 тыс. га. Указанные сельскохозяйственные земли требуют первоочередных и неотлагательных мер агротехнологического и территориально-организационного характера по предотвращению или смягчению последствий проявления на них засушливых явлений. Площадь среднеуязвимых к засухам почв составляет 29,2 %, слабоуязвимых почв – 40,1 %. Что касается административных районов региона, то между ними существуют заметные различия по указанному показателю. Так, высокая доля почв сельскохозяйственных земель с наиболее уязвимыми и сильно уязвимыми почвами к засухам отмечена в следующих административных районах: Калинковичском (37,3 %, или 35,0 тыс. га), Светлогорском (38,2 %, или 23,6 тыс. га), Лельчицком (32,9 %, или 14,0 тыс. га), Жлобинском (46,0 %, или 44,3 тыс. га), Кормянском (36,7 %, или 15,2 тыс. га), Добрушском (34,2 %, или 26,1 тыс. га), Наровлянском (35,9 %, или 7,0 тыс. га), Рогачевском (48,1 %, или 53,5 тыс. га), Лоевском (34,7 %, или 14,5 тыс. га), Пружанском (40,3 %, или 50,8 тыс. га), Жабинковском (34,3 %, или 14,7 тыс. га), Брестском (44,6 %, или 29,4 тыс. га), Берёзовском (29,1 %, или 19,1 тыс. га), Кобринском (24,3 %, или 25,3 тыс. га), Ляховичском (39,4 %, или 21,8 тыс. га). В целом, общая площадь таких почв сельскохозяйственных земель составляет в Гомельской области 34,6 %, или 448,8 тыс. га, в Брестской области – 28,9 %, или 393,8 тыс. га.

Были выполнены определение степени и картографирование уязвимости почв к засухам на сельскохозяйственных землях Калинковичского района Гомельской области (рис. 8). Выбор указанного аграрного землепользования в качестве объекта картографирования был вызван наличием значительных площадей почв, ежегодно подвергающихся засухам, которые ведут не только к частому повреждению сельскохозяйственных культур в течение вегетационного периода, но иногда и к их гибели. Из общей площади сельскохозяйственных земель Калинковичского административного района 94,0 тыс. га, из которых 23,9 % (25,5 тыс. га) занимают земли с наиболее уязвимыми почвами к засухам, сильноуязвимые – 11,1 % (11,8 тыс. га), среднеуязвимые – 22,2 % (20,9 тыс. га) и слабоуязвимые – 40,6 % (38,1 тыс. га). По указанным показателям различаются землепользования отдельных 15 сельскохозяйственных организаций. Так, площадь сельскохозяйственных земель с наиболее уязвимыми почвами к засухам составляет 41,7 % от общей площади сельскохозяйственных земель в КСУП «Березнянский», 33,1 % в ОАО «Неманско», 31,5 % в ОАО «Родина», 36,0 % в СУП «Домановичи-Агр», 30,5 % в СУП «Дудичи-Агр».

Изложенные выше результаты исследований, посвященные оценке увлажнения и степени уязвимости почв сельскохозяйственных земель региона Белорусского Полесья к засухам, свидетельствуют о необходимости принятия безотлагательных мер по адаптации к снижению негативных последствий сельскохозяйственной отрасли к усиливающимся климатическим изменениям и обусловленным ими экологическим угрозам и вызовам, связанным с потеплением климата. Существенную роль в этом должно сыграть принятие Стратегии и национального плана действий Республики Беларусь по адаптации сельского хозяйства к изменению климата. При обосновании и разработке конкретных мер, направленных на совершенствование агротехнологий, систем севооборотов, возделывания засухоустойчивых сельскохозяйственных культур, а также территориально-планировочной организации аграрного землепользования необходимо обязательно учитывать почвенорегулирующий фактор климатических условий возделывания агрофитоценозов.

Представленная статья подготовлена по результатам выполнения НИР «Оценить влияние климатических изменений на почвы сельскохозяйственных земель Белорусского Полесья и предложить комплекс научно обоснованных практических мероприятий по смягчению их негативных последствий» (№ госрегистрации 20200188), выполненной в рамках ГНТП «Природопользование и экологические риски» (2019–2020 гг.).

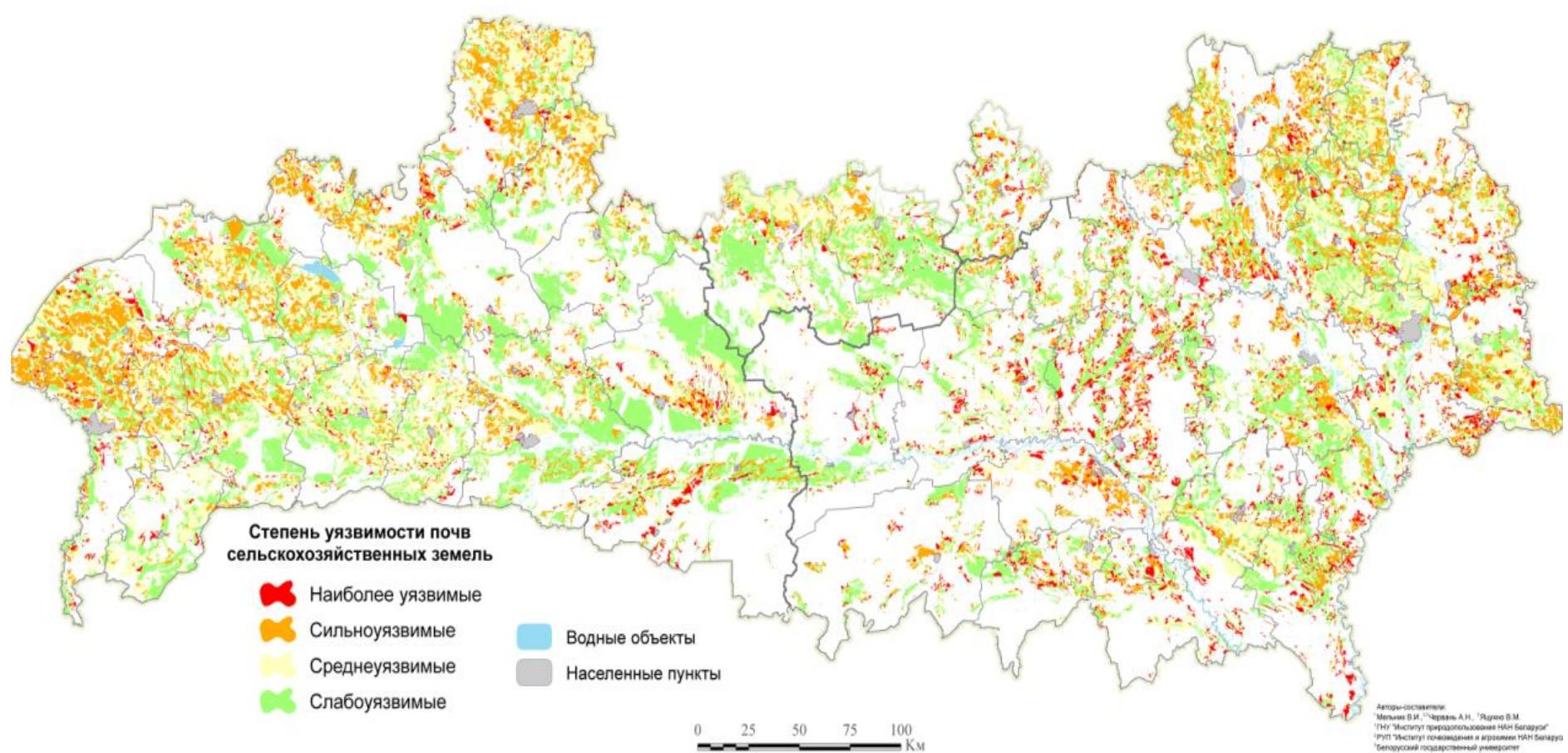


Рис. 7. Степень уязвимости почв сельскохозяйственных земель к засухам региона Белорусского Полесья

Fig. 7. Degree of farmlands vulnerability to droughts in Belarusian Polesie

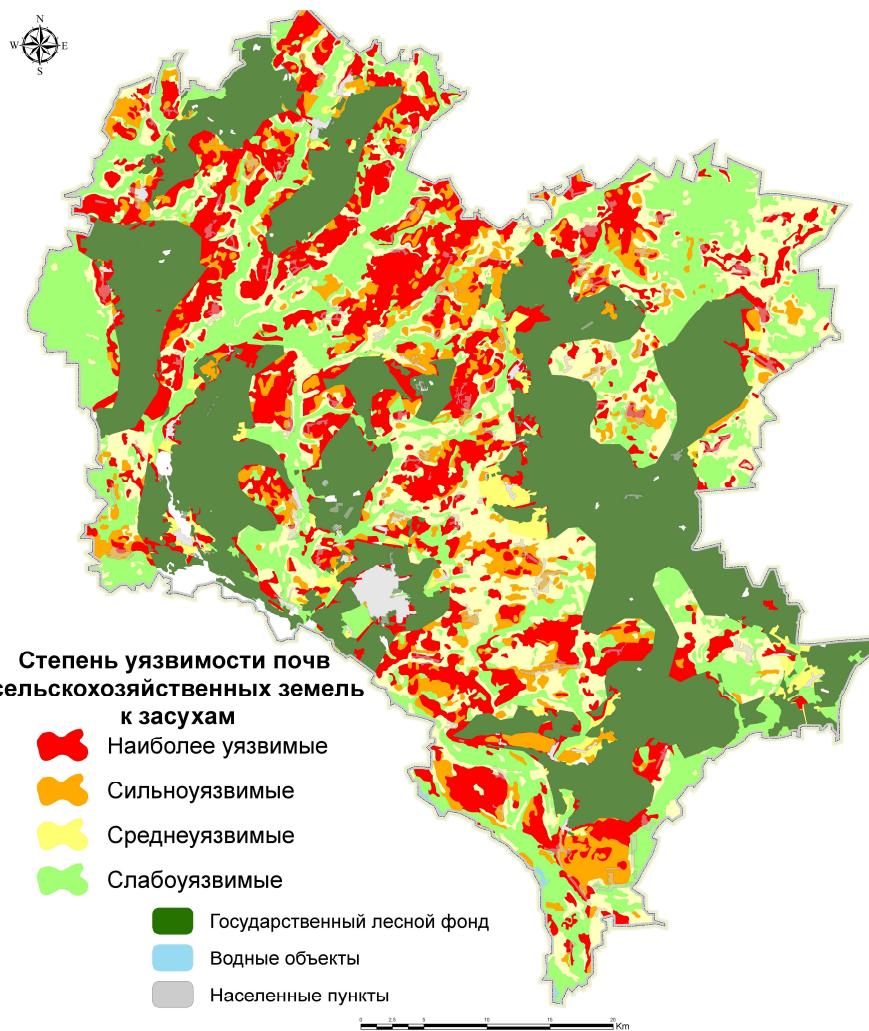


Рис. 8. Степень уязвимости почв сельскохозяйственных земель Калинковичского района Гомельской области к засухам

Fig. 8. The degree of farmlands vulnerability to droughts of the Kalinkovichi district of the Gomel region

Заключение. На территории Белорусского Полесья за период потепления в целом наблюдается тенденция снижения запасов влаги в верхнем слое почвы, а также положительный тренд роста количества случаев почвенных засух в обеих областях, что является следствием уменьшения увлажнения территории (ГТК), существенным ростом температуры и незначительным увеличением осадков. Отмечен значительный рост повторяемости засух в обеих областях в течение всего периода вегетации за 1989–2018 гг. В среднем за вегетационный период увеличение повторяемости засух составило 15 % в Гомельской области и 18 % – в Брестской области по сравнению с периодом 1951–1980 гг. В мае повторяемость засух за период потепления в Брестской области выросла в 5 раз. Отмечены более ранние сроки наступления весенних почвенных засух. За 1989–2018 гг. повторяемость засух в Брестской области в апреле выросла до 20 %, а в Гомельской области – до 27 % по сравнению с 1951–1980 гг. Выявлена цикличность изменений числа почвенных засух, включая и сильные засухи, на территории Белорусского Полесья с периодом 9–12 лет, которая может быть вызвана глобальными процессами в атмосфере. Исходя из цикличности изменений числа почвенных засух, можно прогнозировать уменьшение почвенных засух в вегетационный период 2019–2022 гг. и их максимальный рост примерно к 2025–2026 гг. Получены количественные показатели числа дней с влажностью почв в слое 0–20 см менее ВРК, которые в дальнейшем были использованы в качестве критериев для оценки степени уязвимости почв Белорусского Полесья от засух и построения карт уязвимости почв к засухам.

Список использованных источников

1. Оценка влагозапасов и повторяемости почвенных засух на территории Белорусского Полесья в условиях современного изменения климата / В. И. Мельник [и др.] // Природные ресурсы. – 2020. – № 2. – С.104–115.
2. Логинов, В. Ф. Особенности изменения осадков в Белорусском Полесье в современный период / В. Ф. Логинов, В. И. Мельник // Природные ресурсы. – 2019. – № 2. – С.108–116.
3. Данилович, И. С. Современные изменения климата Белорусского Полесья: причины, следствия, прогнозы / И. С. Данилович, В. И. Мельник, Б. Гейер // Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология. – 2020. – № 1. – С. 3–13.
4. Мельник, В. И. Основные результаты мониторинга изменения климата на территории Республики Беларусь / В. И. Мельник // Фитосанитарная ситуация в Беларуси в условиях изменения климата / под ред. С. В. Сороки, Е. А. Якимович ; Институт защиты растений. – Минск : Калорград, 2019. – С. 5–13.
5. Логинов, В. Ф Изменение климата Беларусь: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд., доп. – Минск : Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
6. О реализации закона Республики Беларусь «О гидрометеорологической деятельности» [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Республики Беларусь от 23 янв. 2007 г. № 75 // Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды. – Режим доступа: <https://belgidromet.by/uploads/files/documents/O-realizatsii-Zakona-Respubliki-Belarus-O-gidrometeorologicheskoy-dejatelnosti.pdf>. – Дата доступа: 09.03.2021.
7. Агроклиматические ресурсы Белорусской ССР / Госком. СССР по гидрометеор. и контролю природ. среды. Бел. респ. упр. по гидрометеор. и контролю природ. среды. Гидрометеорологический центр ; под ред. канд. физ.-мат. наук М. А. Гольберга, В. И. Мельника. – Минск, 1985. – 451 с.
8. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A special Report of Working Group I and II of IPCC / C. B. Field [et al.]. – Cambridge, UK and New York, NY USA: Cambridge University Press, 2012. – 582 р.
9. Change Adaptation. A Special Report of Working Group I and II IPCC / C. B. Field [et al.]. – Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012 – 582 р.
10. Справочник по показателям и индексам засушливости [Электронный ресурс] / Всемирная метеорологическая организация и Глобальное водное партнерство. – Женева, 2016. – Режим доступа: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3192. – Дата доступа: 01.02.2021.
11. Вериго, С. А. Почвенная влага (применительно к сельскому и лесному хозяйству) / С. А Вериго, Л. А. Рazuмова. – Л. : Гидрометеоиздат, 1973. – 328 с.
12. Реут, И. Б. Физика почв / И. Б. Реут. – М. : Колос, 1972. – 368 с.
13. Долгов, С. И. Исследование подвижности почвенной влажности и ее доступность для растений / С. И. Долгов. – М. : Изд-во АН СССР, 1998. – 325 с.
14. Романова, Т. А. Водный режим почв Беларусь / Т. А. Романова. – Минск : ИВЦ Минфина, 2015. – 144 с.
15. Почвы Республики Беларусь / В. В. Лапа [и др.]. – Минск : ИВЦ Минфина, 2019. – 632 с.
16. Climate change adaptation in the agricultural sector in Europe. EEA Report / C. Jacobs [et al.]. – Luxemburg : Publications Office of the European Union, 2019. – 110 р.
17. Вихров, В. И. Климатическое сокращение сроков наступления почвенной засухи в Беларуси / В. И. Вихров // Вестник Белорусской сельскохозяйственной академии. – 2012. – № 4. – С. 111–115.
18. Хлебникова, Е. М. Засуха / Е. М. Хлебникова, Т. В. Павлова, Н. А. Сперанская // Методы оценки последствий изменений климата для физических и биологических систем / М. Д. Ананичева [и др.] ; науч. ред. С. М. Семенов. – М. : Росгидромет, 2012. – Гл. 4. – С. 126–164.
19. Яцухно, В. М. Критерии и индикаторы уязвимости почв аграрного землепользования к засухам для обоснования мер по смягчению их последствий (на примере региона Белорусского Полесья) / В. М. Яцухно, С. С. Бачила // Деградация земель и опустынивание: проблемы устойчивого природопользования и адаптации : материалы Междунар. науч.-практ. конф., Москва, 9–11 нояб. 2020 г. / ИЛ РАН. – М. : МАКС Пресс, 2020. – С. 23–26.

References

1. Melnik V. I. [et al.]. *Otsenka vlagozapasov i povtoryayemosti pochvennykh zasukh na territorii Belorusskogo Poles'ya v usloviyakh sovremenennogo izmeneniya klimata* [Moisture reserves assessment and soil droughts recurrence in the territory of the Belarusian Polesie under the modern climate change conditions]. *Prirodnyye resursy = Natural Resources*, 2020, no. 2, pp. 104–115. (in Russian)
2. Loginov V. F., Mel'nik V. I. *Osobennosti izmeneniya osadkov v Belorusskom Poles'ye v sovremenenny period* [Precipitation change features in the Belarusian Polesie during the modern period]. *Prirodnyye resursy = Natural Resources*, 2019, no. 2, pp. 108–116. (in Russian)
3. Danilovich I. S., Mel'nik V. I., Geyer B. *Sovremennyye izmeneniya klimata Belorusskogo Poles'ya: prichiny, sledstviya, prognozy* [Modern Climate Changes in Belarusian Polesie: Causes, Consequences, Forecasts]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografiya. Geologiya = Journal of the Belarusian State University. Geography. Geology*, 2020, no. 1, pp. 3–13. (in Russian)

4. Melnik V. I. *Osnovnyye rezul'taty monitoringa izmeneniya klimata na territorii Respubliki Belarus'* [Main results of climate change monitoring on the territory of the Republic of Belarus]. *Fitosanitarnaya situatsiya v Belarusi v usloviyakh izmeneniya klimata* [Phytosanitary Situation in Belarus under Climate Change Conditions]. Minsk, 2019, pp. 5–13. (in Russian)
5. Loginov V. F., Lysenko S. A., Melnik V. I. *Izmeneniye klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, regulation possibilities]. 2nd publ., Minsk, 2020, 264 p. (in Russian)
6. *O realizatsii zakona Respubliki Belarus' «O gidrometeorologicheskoy deyatel'nosti».* (jelektronnyj resurs) [On the implementation of the law of the Republic of Belarus "On hydrometeorological activity". [Electronic resource]: post-anovleniye Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 23 yanvarya 2007 g. nomer 75 [Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus dated January 23, 2007 No. No. 75]. Minsk, Republican Center for Hydrometeorology, Radioactive Contamination Control and Environmental Monitoring, 2021. Available at: <https://belgidromet.by/uploads/files/documents/O-realizatsii-Zakona-Respubliki-Belarus-O-gidrometeorologicheskoy-deyatelnosti.pdf> (accessed 9 March 2021). (in Russian).
7. *Agroklimaticheskiye resursy Belorusskoy SSR* [Agroclimatic resources of the Byelorussian SSR]. Under ed. Ph. D. M. A. Gol'berg, V. I. Mel'nik. Minsk, 1985, 451 p. (in Russian)
8. Field C. B. [et al.]. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A special Report of Working Group I and II of IPCC. Cambridge, UK and New York, NY USA: Cambridge University Press, 2012, 582 p.
9. Field C. B. [et al.]. Change Adaptation. A Special Report of Working Group I and II IPCC. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2012, 582 p.
10. *Spravochnik po pokazateljam i indeksam zasushlivosti* [Handbook on indicators and indices of aridity]. Vsemirnaya meteorologicheskaya organizaciya i Global'noe vodnoe partnerstvo [World Meteorological Organization and Global Water Partnership]. Geneva, 2016. Available at: https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=3192 (accessed 1 February 2021). (in Russian)
11. Verigo S. A., Razumova L. A. *Pochvennaya vlaga (primenitel'no k sel'skomu i lesnomu khozyaystvu)* [Soil moisture (as applied to agriculture and forestry)]. Leningrad, Hydrometeopubl, 1973, 328 p. (in Russian)
12. Reut I. B. *Fizika pochv* [Soil physics]. Moscow, Kolos Publ., 1972, 368 p. (in Russian)
13. Dolgov S. I. *Issledovaniye podvizhnosti pochvennoy vlazhnosti i yeye dostupnosti dlya rasteniy* [Researching the soil moisture mobility and its availability for plants]. Moscow, AS USSR Publ., 1998, 325 p. (in Russian)
14. Romanova T. A. *Vodnyy rezhim pochv Belarusi* [Soils water regime in Belarus]. Minsk, The Ministry of Finance Publ., 2015, 144 p. (in Russian)
15. Lapa V. V. [et al.]. *Pochvy Respubliki Belarus'* [Soils of the Republic of Belarus]. Minsk, The Ministry of Finance Publ., 2019, 632 p. (in Russian)
16. Jacobs C. [et al.]. Climate change adaptation in the agricultural sector in Europe. EEA Report. Luxemburg, Publications Office of the European Union, 2019, 110 p.
17. Vikhrov V. I. *Klimaticheskoye sokrashcheniye srokov nastupleniya pochvennoy zasukhi v Belarusi* [Climatic reducing of the onset of soil drought in Belarus]. *Vestnik Belorusskoy sel'skokhozyaystvennoy akademii = Belarusian Agricultural Academy Bulletin*, 2012, no 4, pp. 111–115. (in Russian)
18. Khlebnikova E. M., Pavlova T. V. Speranskaya M. A. *Zasukha* [Drought]. *Metody otsenki posledstviy izmeneniy klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh system*. [Methods for assessing the effects of climate change on physical and biological systems]. M. D. Ananicheva [et al.], sci. ed. S. M. Semenov. Moscow, Russian Hydrometeorological Center Publ, 2012, Chapter 4, pp. 126–164. (in Russian)
19. Yatsukhno V. M., Bachila S. S. *Kriterii i indikatory uyazvimosti pochv agrarnogo zemlepol'zovaniya k zasukham dlya obosnovaniya mer po smyagcheniyu ikh posledstviy (na primere regiona Belorusskogo Poles'ya)* [Criteria and indicators of the vulnerability of agricultural land use soils to droughts to justify measures to mitigate their consequences (on the example of the Belarusian Polesie region)]. *Materialy mezdunar. nauch.-prakt. konferentsii "Degradatsiya zemel' i opustynivaniye: problemy ustoychivogo prirodopol'zovaniya i adaptatsii"* [Proc. of Int. sci.-practical conf. "Land degradation and desertification: problems of sustainable nature management and adaptation"]. Moscow, 2020, pp. 23–26. (in Russian)

Информация об авторах

Мельник Виктор Иванович – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: v.melnik2016@mail.ru

Яцухно Валентин Минович – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Научно-исследовательская лаборатория экологии ландшафтов, Факультет географии и геоинформатики, Белорусский государственный университет (ул. Ленинградская, 18, 220030, г. Минск, Беларусь). E-mail: yatsukhno@bsu.by

Information about the authors

Victar I. Melnik – Ph. D. (Geography), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: v.melnik2016@mail.ru

Valentin M. Yatsukhno – Ph. D. (Agriculture), Leader Researcher, Landscape Ecology Scientific Research Laboratory, Faculty of Geography and Geoinformatics Belarusian State University (18, Lenigradskaya Str., 220030, Minsk, Belarus). E-mail: yatsukhno@bsu.by

Червань Александр Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Институт почвоведения и агрохимии (ул. Казинца, 90, 220108, г. Минск, Беларусь). E-mail: chervanalex@mail.ru

Камышенко Галина Анатольевна – кандидат технических наук, ученый секретарь, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kamyshenka@tut.by

Пискунович Никита Геннадьевич – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: phenosphere@gmail.com

Буяков Иван Васильевич – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: buyakov-ivan@mail.ru

Aliaksandr N. Chervan – Ph. D. (Agriculture), Leader Researcher, Institute for Soil Science and Agrochemistry of the National Academy of Sciences of Belarus (90, Kasintsa Str., 220108, Minsk, Belarus). E-mail: chervanalex@mail.ru

Halina A. Kamyshenka – Ph. D. (Technical), Scientific Secretary, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kamyshenka@tut.by

Nikita G. Piskunovich – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: phenosphere@gmail.com

Ivan V. Buyakov – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: buyakov-ivan@mail.ru

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА УРОЖАЙНОСТЬ ОЗИМЫХ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР НА ТЕРРИТОРИИ БЕЛАРУСИ В ПРОГНОЗНЫХ ЦЕЛЯХ

Г. А. Камышенко

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. Представлены результаты статистической оценки влияния изменяющихся погодно-климатических условий территории Беларуси на продуктивность основных озимых зерновых культур с целью построения расчетных моделей урожайности. Расчеты произведены относительно климатической составляющей в качестве предиктора с учетом отклонений температуры воздуха и атмосферных осадков от многолетней климатической нормы месяцев, оказывающих наибольшее значение на урожайность рассматриваемых культур. Для озимых рожь и пшеницы построены адекватные модели изменчивости урожайности. Результаты исследования актуальны для решения прогнозных задач.

Ключевые слова: урожайность; озимые рожь и пшеница; температура воздуха и атмосферные осадки; статистические методы; расчет продуктивности.

Для цитирования. Камышенко Г. А. Оценка влияния основных климатических факторов на урожайность озимых зерновых культур на территории Беларуси в прогнозных целях // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 41–48.

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE MAIN CLIMATIC FACTORS ON THE YIELD OF WINTER CEREAL CROPS ON THE TERRITORY OF BELARUS FOR FORECASTING PURPOSES

H. A. Kamyshenka

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The results of a statistical assessment of the influence of changing weather and climatic conditions of the territory of Belarus on the productivity of the main winter cereal crops are presented in order to build computational models of productivity. The calculations were made with respect to the climatic component as a predictor, taking into account the deviations of air temperature and precipitation from the long-term climatic norm of months that have the most significant effect on the yield of the studied crops. For winter rye and wheat, adequate models of yield variability have been built. The research results are relevant for solving forecasting problems.

Keywords: yield; winter rye and wheat; air temperature and precipitation; statistical methods; calculation of productivity.

For citation. Kamyshenka H. A. Assessment of the influence of the main climatic factors on the yield of winter cereal crops on the territory of Belarus for forecasting purposes. *Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 41–48.

Введение. Урожайность сельскохозяйственных культур зависит от целого ряда факторов – агротехнологических (внесенные под посевы удобрения, качество семян, обеспеченность техникой и др.), почвенных, погодно-климатических. Одни факторы являются стабильными и на протяжении многих лет не изменяются, другие же, в частности климатические показатели, характеризуются значительной межгодовой изменчивостью. Отклонение от оптимального значения даже одного фактора, оказывающего влияние на урожайность, приводит подчас к значительным потерям урожая. Для ослабления влияния неблагоприятных погодных условий на продуктивность сельскохозяйственных культур необходима эффективная система управления аграрным производством.

Исследованиям климатообусловленной изменчивости продуктивности сельскохозяйственных культур и их прогнозированию посвящено много научных работ [1–7], однако, учитывая наблюдаемое на протяжении достаточно длительного периода изменение погодно-климатических условий, вопросы оценки их влияния на урожайность сельскохозяйственных культур остаются актуальными и востребованными. Не менее важным вопросом является построение адекватных моделей урожайности, которые могут быть использованы при разработке краткосрочных прогнозов урожая.

Цель исследования – оценить климатообусловленную изменчивость урожайности основных озимых зерновых культур для построения простейшей малопараметрической модели продуктивности.

Климатические условия на территории Беларуси благоприятны для возделывания зерновых культур, при этом преимуществом озимых посевов является наличие осеннего периода вегетации, который используется растениями для укоренения и кущения. Этим обеспечивается их более быстрое развитие весной, в том числе лучшее использование весенне-зимних запасов влаги и питательных веществ, что в итоге способствует более высоким и стабильным урожаям. В условиях потепления это преимущество озимых культур рассматривается как средство ухода от засухи и дефицита влаги в вегетационный период.

В качестве исследуемых культур нами выбраны озимые рожь и пшеница, являющиеся традиционными зерновыми культурами Беларуси. В данной работе получили развитие результаты ранее выполненных исследований за период с 1960 по 2007 г. [8]. В последующие годы продолжилось изменение климатических показателей, в частности, температура атмосферного воздуха в период с 2008 по 2019 г. по отношению к рассмотренному ранее интервалу повысилась в январе на 0,6 °C, в феврале – на 1,9 °C, в марте – на 1,7 °C.

Материалы и методы исследования. При выполнении исследования нами использованы статистические данные Республиканского гидрометеоцентра и Министерства статистики и анализа Республики Беларусь за 1960–2019 гг. [9–12]. Исследование выполнено посредством применения методов математической статистики, включая многофакторный корреляционно-регрессионный анализ, графический метод исследования рядов распределения значений случайной величины, построение аналитических функций.

Результаты и их обсуждение. Анализ и статистическое описание динамики какого-либо существенного колеблющегося показателя начинаются с выявления формы его тренда. Следующий шаг – статистическая оценка надежности построенного тренда, отражающего тенденции развития изучаемого процесса. На рис. 1 представлены графики динамики изменчивости урожайности озимых ржи и пшеницы с посевных площадей в Беларуси за период с 1960 по 2019 г. с двумя трендами – полиномиальным 2-й степени и линейным, отражающими тенденцию изменения продуктивности культур.

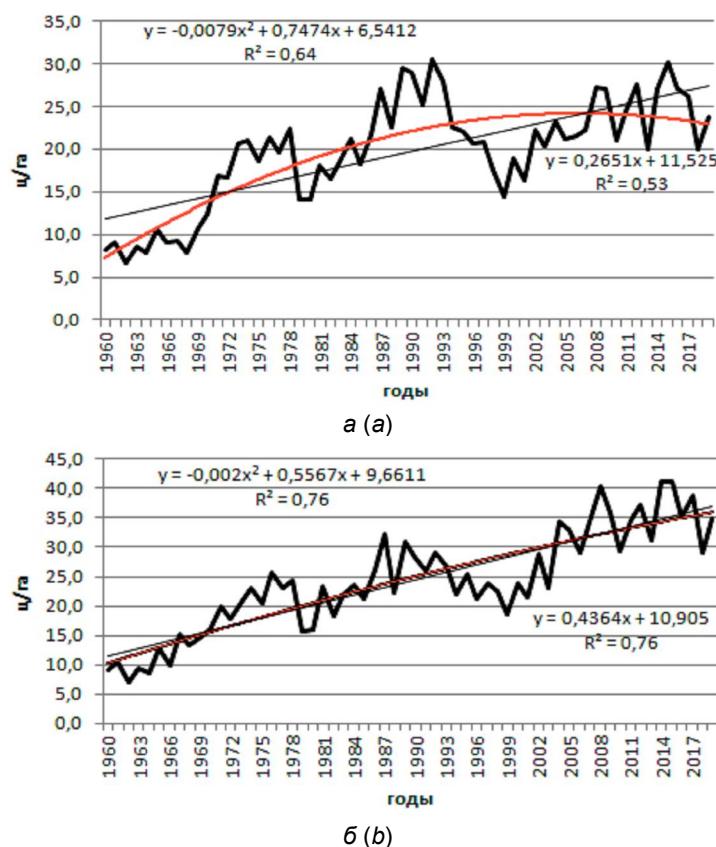


Рис. 1. Динамика изменчивости урожайности озимых ржи (а) и пшеницы (б) в Беларуси за период с 1960 по 2019 г. с полиномиальным трендом (красный) и линейным (черный)

Fig. 1. Dynamics of variability of productivity of winter rye (a) and wheat (b) in Belarus for the period from 1960 to 2019 with polynomial trend (red) and linear (black)

Надежность построенных трендов подтверждается достаточно высокими значениями коэффициентов детерминации (R^2), которые для полиномиальных трендов составляют 64 и 76 % соответственно. Обе диаграммы характеризуются наличием положительного (восходящего) линейного тренда. Учитывая, что значение коэффициента детерминации полиномиального тренда, характеризующего урожайность озимой ржи, превышает значение линейного тренда, за основу в дальнейших расчетах для этой культуры будет принят полиномиальный тренд.

Полиномиальный и линейный тренды графика урожайности озимой пшеницы практически совпали, в дальнейших расчетах будем ориентироваться на линейный тренд.

На построенных диаграммах отражена периодичность изменения урожайности озимых зерновых культур, существенно осложненная межгодичной коротковолновой (2–3 года) изменчивостью, а также четко прослеживается сходство изменчивости продуктивности озимых ржи и пшеницы. Показаны три волны положительных отклонений урожайности от трендов, обусловленных погодно-климатическими условиями. Соответственно нами выделено шесть временных интервалов, характеризующих спады и подъемы урожайности озимых зерновых культур (табл. 1).

Таблица 1. Значения урожайности озимых ржи и пшеницы (ц/га с посевной площади) в Беларуси по выделенным временными интервалам

Table 1. Yield values of winter rye and wheat (center / ha from the sown area) in Belarus according to the selected time intervals

Интервал, годы	Продолжительность, лет	Среднее значение урожайности культуры для интервала	
		озимой ржи	озимой пшеницы
1960–1970	11	9,1	11,4
1971–1978	8	19,7	21,8
1979–1986	8	17,8	20,8
1987–1993	7	27,4	27,9
1994–2003	10	19,6	23,0
2004–2019	16	24,3	35,0
Среднее значение по Беларуси	10	19,6	24,2

Низкая урожайность в начальные годы исследуемого временного интервала обусловлена в основном недостатком удобрений и низким уровнем агротехнологий. Наибольшие значения урожайности озимых ржи и пшеницы отмечаются в период начала современного потепления климата – с 1987 по 1993 г. (27,4 и 27,9 ц/га соответственно); при этом для озимой пшеницы пик урожайности пришелся на последние годы исследуемого временного интервала, начиная с 2004 г., и составил в среднем 35,0 ц/га.

Расчет урожайности культуры будем производить по формуле

$$Y(t) = Y_{tp}(t) + \Delta Y, \quad (1)$$

где $Y(t)$ – расчетная урожайность культуры в календарном году, ц/га; $Y_{tp}(t)$ – трендовая составляющая расчетной урожайности культуры в календарном году, ц/га; ΔY – климатическая составляющая расчетной урожайности культуры, ц/га.

Трендовые составляющие графиков урожайности культур связаны с технологическими факторами, характеризующимися стабильным уровнем агротехники и культуры земледелия, отклонения от положительных трендов в основном зависят от погодных условий. Тренды продуктивности исследуемых культур с достаточно высокими коэффициентами детерминации на интервале 1960–2019 гг. описаны следующими функциями:

– для озимой ржи:

$$Y_{tp}(t) = -0,0079t^2 + 0,7474t + 6,5412; \quad (2)$$

– для озимой пшеницы:

$$Y_{tp}(t) = 0,4364t + 10,9050, \quad (3)$$

где t – год по порядку (начало – 1960 г.).

По полученным значениям трендов рассчитаны отклонения Фактической урожайности от фоновой (трендовой составляющей). Построенные гистограммы распределения отклонения фактической урожайности озимых ржи и пшеницы от трендовой составляющей в Беларуси позволяют визуально оценить величину и характер разброса данных. Установлено, что временные ряды отклонений подчиняются нормальному закону распределения вероятностей (рис. 2).

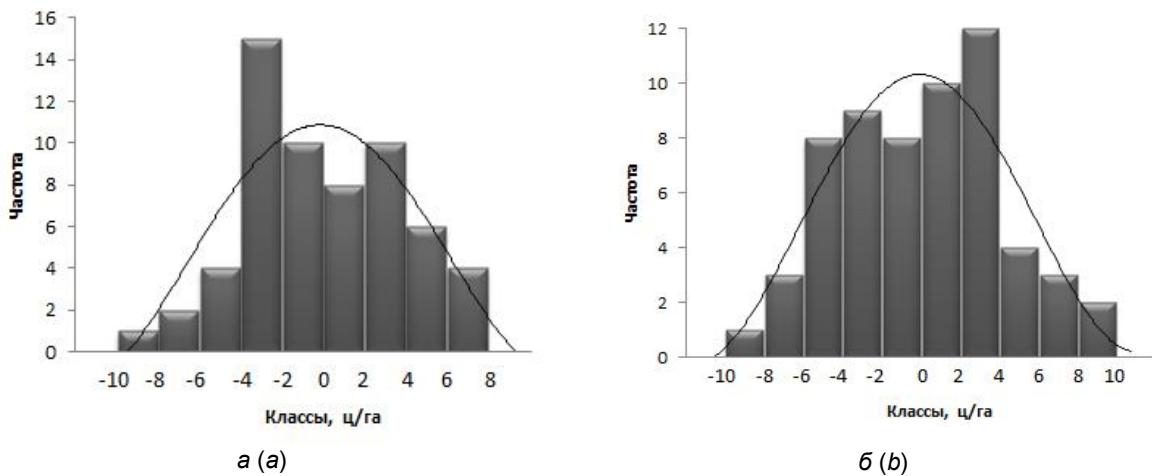


Рис. 2. Гистограмма распределения отклонения фактической урожайности озимых ржи (а) и пшеницы (б) от трендовой составляющей в Беларусь

Fig. 2. Histogram of the distribution of the deviation of the actual yield of winter rye (a) and wheat (b) from the trend component in Belarus

Для более наглядного представления на рис. 3 показаны диаграммы климатоусловленных отклонений урожайности озимых зерновых культур от агротехнических трендов, на которых четко видна волнообразная структура изменений.

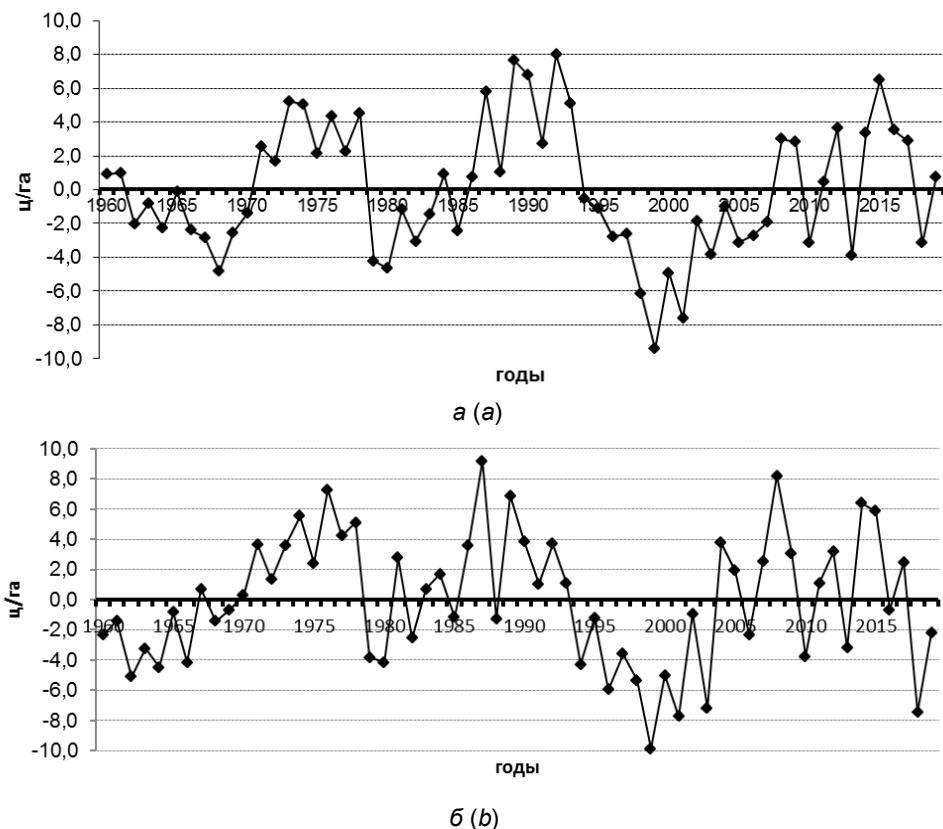


Рис. 3. Климатоусловленное отклонение урожайности озимых ржи (а) и пшеницы (б) от трендовой составляющей, 1960–2019 гг.

Fig. 3. Climate-related deviation of the yield of winter rye (a) and wheat (b) from the trend component, 1960–2019

Наиболее значительное климатообусловленное снижение урожайности исследованных озимых зерновых культур на временном интервале 1960–2019 гг. отмечается в 1999 г., а для озимой пшеницы – и в 2018 г. При этом в 1999 г. урожайность озимых зерновых культур оказалась низкой и составила для озимой ржи 14,4 ц/га, для озимой пшеницы – 18,5 ц/га.

Озимая рожь, являясь основной зерновой культурой Беларуси, обладает высокой засухоустойчивостью, однако 1999 г., характеризующийся наличием значительного количества дней с температурой, превышающей 25 °С, и значением гидротермического коэффициента, равным 1,1 (82 засушливых дня), привел к потерям урожайности – оказались весенние заморозки [6].

Накануне 2018 г. осенью сложились аномально теплые для Беларуси погодные условия, на рост и созревание озимых зерновых культур повлияли затяжные дожди в ноябре и декабре. В дальнейшем, по данным Белгидромета, на протяжении всего года, за исключением февраля и марта, наблюдались положительные аномалии температуры воздуха. В мае и июне по югу страны отмечалась почвенная засуха, кроме того, в этот период на территории республики в воздухе и на почве были заморозки, что также повлияло на урожайность озимых зерновых культур.

В качестве благоприятных лет для возделывания озимой ржи, согласно графику отклонений урожайности от трендовой составляющей, можно выделить 1989, 1992 и 2015 г., для озимой пшеницы – 1987, 2008, 2014 и 2015 г.

С 1990 г. на территории Беларуси значительно возросла повторяемость засух во все месяцы теплого периода, кроме того, увеличилась площадь распространения, интенсивность и продолжительность данного явления [13]. Однако в 1992 г. это не повлияло на урожайность озимых зерновых культур. Для урожая озимых зерновых культур 2008 г. благоприятное влияние оказала перезимовка посевов в условиях мягкой и малоснежной зимы, а также то, что этот год характеризовался преобладанием теплой погоды в первой половине апреля и хорошей влагообеспеченностью территории, способствовавшими развитию озимых культур.

Для озимых зерновых культур важно соблюдение оптимальных сроков сева и уборки. Посев озимых до оптимальных сроков ведет к снижению урожайности по причине перерастания, выпревания и более значительного повреждения посевов вредителями и болезнями, а после оптимальных сроков из-за плохого осеннего кущения, недостаточного закаливания и накопления сахаров приводит к изреживанию посевов во время зимовки. В связи с потеплением климата Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь и РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию» уточнили оптимальные сроки сева озимых зерновых культур в Беларуси, сместив их на более поздний период. Так, в Витебской области сев озимых культур рекомендовано проводить с 3 по 25 сентября, в Могилевской области – с 3 по 26 сентября; в Минской области – с 5 по 28 сентября; в Гродненской области – с 6 по 29 сентября; в Гомельской области – с 9 по 30 сентября; в Брестской области – с 8 сентября по 2 октября [14]. Очень важно вовремя приступить к жатве. Слишком раннее ее начало сопряжено с риском как недобора урожая из-за недозрелости зерна, так и перегрузки сушилок влажным зерном. Особенно большой ущерб урожаю наносит затяжка с уборкой. Установлено, что уборка на один день позже достижения рожью полной спелости приводит к потере 0,25 ц/га зерна [15].

Методом корреляционного анализа установлено, что на исследуемом 60-летнем интервале (1960–2019 гг.) урожайность озимой ржи в наибольшей степени зависела от температуры воздуха с января по март, а также от температуры августа предыдущего года. Атмосферные осадки в целом показали незначительное влияние на урожайность озимых зерновых культур. Для озимой пшеницы выделены зависимости урожайности от температуры февраля–марта, а также августа и декабря предыдущего года. Кроме того, выявлено влияние атмосферных осадков февраля. Рассмотрение климатических показателей августа предыдущего года оправдано: несмотря на то что этот месяц не входит в вегетационный период для озимых зерновых культур, он определяет условия посева этих культур. В данном случае мы руководствовались показателями корреляционных матриц.

Методом регрессионного анализа определены аналитические выражения связи между климатообусловленными отклонениями урожайности и отклонениями основных климатических показателей месяцев, оказывающих наиболее значимое влияние на продуктивность озимых зерновых культур, от многолетних климатических норм.

В соответствии с рекомендациями Всемирной метеорологической организации (ВМО) климатические нормы рассчитывают за 30-летний период. В связи с постоянным изменением климата 17-й Всемирный метеорологический конгресс, состоявшийся в Женеве в июне 2015 г., рекомендовал рассчитывать климатические нормы за период с 1981 по 2010 г. В связи с тем, что климатические нормы, особенно температуры воздуха, существенно изменились, в целях обеспечения отраслей экономики новыми актуализированными климатическими нормами и в соответствии с рекомендациями ВМО, гидрометеослужба Республики Беларусь с 1 июля 2017 г. перешла на новые климатические нормы

по температуре и осадкам за период с 1981 по 2010 г. Эти нормы отражают климатические условия периода потепления. Климатическая норма среднегодовой температуры воздуха Беларуси, согласно указанному документу, составляет $6,7^{\circ}\text{C}$, т. е. повысилась почти на 1°C по сравнению с ранее действующей нормой [16]. В представленном исследовании нами учитывалась изменчивость многолетней климатической нормы. Как вариант, можно рассматривать отклонения климатических показателей от их трендовых составляющих.

Ниже, в формулах (4) и (5), представим полученные полиномы 1-й степени, характеризующие климатическую составляющую расчетной урожайности озимых ржи и пшеницы для Беларуси в 1960–2019 гг.:

– для озимой ржи:

$$\Delta Y = 0,059\Delta T_1 + 0,215\Delta T_2 + 0,370\Delta T_3 + 0,858\Delta T_8 - 1,905; \quad (4)$$

– для озимой пшеницы:

$$\Delta Y = 0,059\Delta T_2 + 0,450\Delta T_3 + 0,860\Delta T_8 + 0,364\Delta T_{12} + 0,008\Delta O_i - 2,319, \quad (5)$$

где ΔT_i – отклонение месячных значений температуры от климатической нормы, ΔO_i – отклонение суммарных месячных осадков от климатической нормы (i – порядковый номер месяца).

Значения температур августа и декабря берутся по предыдущему году.

Значимость критерия Фишера в обоих случаях равна 0,0005, что значительно меньше заданного уровня $\alpha = 0,05$ и свидетельствует о значимости математической модели и достаточности включенных в уравнение переменных для описания климатической расчетной составляющей.

Подставив результаты, полученные по уравнениям (2) и (4), в уравнение (1), а также (3) и (5) в указанное уравнение, получим расчетную урожайность озимой ржи и озимой пшеницы. Графическое изображение рассчитанной урожайности озимых зерновых культур представлено на рис. 4.

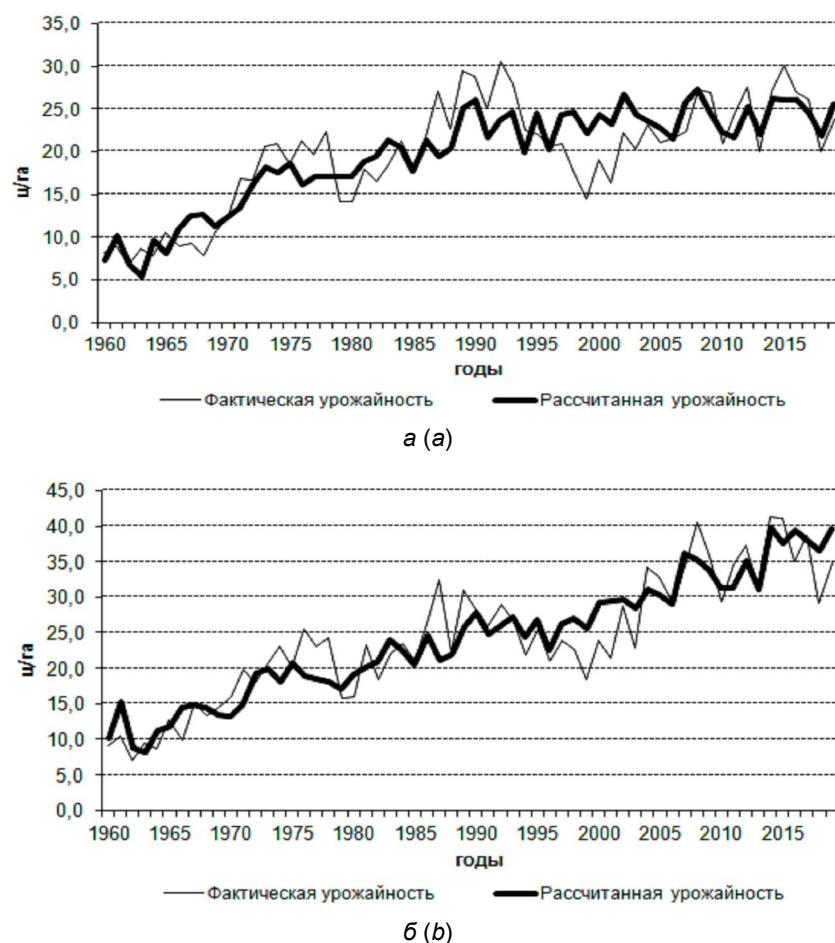


Рис. 4. Фактическая и рассчитанная динамика урожайности озимых ржи (а) и пшеницы (б)

Fig. 4. Actual and calculated dynamics of the yield of winter rye (a) and wheat (b)

В результате визуального анализа построенных кривых можно сделать вывод об их согласованности с исходными диаграммами, однако экстремальные отклонения значений фактической урожайности не всегда описываются адекватно: в большей степени это касается графика озимой ржи. При этом построенные модели являются адекватными, о высокой корреляционной связи фактической и расчетной урожайности озимых ржи и пшеницы свидетельствуют коэффициенты корреляции, равные 0,85 и 0,91 соответственно, а также материалы табл. 2. Ошибкой до 15 % охвачено 60 % лет по озимой ржи и более 68 % лет по озимой пшенице.

Таблица 2. Ошибки расчета урожайности озимых ржи и пшеницы

Table 2. Errors in calculation the yield of winter rye and wheat

Показатель	Озимая рожь						
	Отклонения урожайности, %						
	0–5	5–10	10–15	15–20	20–35	35–55	55–65
Количество лет, %	25,0	16,7	18,3	8,3	21,7	8,3	1,7
Нарастающий итог, %	25,0	41,7	60,0	68,3	90,0	98,3	100,0
Озимая пшеница							
Показатель	Отклонения урожайности, %						
	0–5	5–10	10–15	15–20	20–35	35–50	
Количество лет, %	23,3	30,0	15,0	6,7	18,3	6,7	
Нарастающий итог, %	23,3	53,3	68,3	75,0	93,3	100,0	

Расчеты проводились по среднемесячным климатическим значениям в целом для территории Беларуси, что в результате дает обобщенную, сглаженную картину. В региональных исследованиях показатели, определяющие климатообусловленные отклонения урожайности, будут другими, отражающими особенности исследуемых территорий.

Заключение. В результате выполненных статистических расчетов выявлены основные климатические факторы, повлиявшие на урожайность продуктивности озимых ржи и пшеницы в Беларуси на временному интервале 1960–2019 гг. Выполнен анализ построенных графиков, характеризующих климатозависимую урожайность исследованных озимых культур, построена простейшая расчетная малопараметрическая модель их продуктивности. Построенные модели можно считать адекватными, о чем свидетельствуют высокая корреляционная связь фактической и расчетной урожайности, а также результаты их сходимости.

Список использованных источников

1. Кулаковская, Т. Н. Оценка влияния погодных условий на урожай зерновых культур в БССР / Т. Н. Кулаковская, И. М. Богдевич, Р. В. Шаталова // Почтоведение и агрохимия. – 1980. – Вып. 16. – С. 131–142.
2. Логинов, В. Ф. Оценка влияния климатических факторов на динамику урожайности основных сельскохозяйственных культур в Брестской области / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, Ан. А. Волчек // Природные ресурсы. – 2006. – № 3. – С. 5–22.
3. Логинов, В. Ф. Изменение климата Беларуси: причины, последствия, возможности регулирования / В. Ф. Логинов, С. А. Лысенко, В. И. Мельник. – 2-е изд. – Минск : Энциклопедикс, 2020. – 264 с.
4. Лысенко, С. А. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутникового мониторинга динамики углерода в наземных экосистемах / С. А. Лысенко // Исследование Земли из космоса. – 2019. – № 4. – С. 48–59.
5. Пасов, В. М. Изменчивость урожаев и оценка ожидаемой продуктивности зерновых культур / В. М. Пасов. – Л. : Гидрометеоиздат, 1986. – 150 с.
6. Сачок, Г. И. Факторы и модели изменчивости урожайности сельскохозяйственных культур Беларуси / Г. И. Сачок, Г. А. Камышенко. – Минск : Белорусская наука, 2006. – 243 с.
7. Трубилин, А. И. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур : учебное пособие / А. И. Трубилин, Г. Ф. Петрик, А. Г. Прудников. – Краснодар : КубГАУ, 2017. – 95 с.
8. Камышенко, Г. А. Расчет урожайности озимых зерновых культур Беларуси / Г. А. Камышенко // Природопользование. – Минск, 2009. – Вып. 16. – С. 133–140.
9. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь, 2017 (стат. сб.). – Минск, 2017. – 235 с.
10. Охрана окружающей среды в Республике Беларусь, 2020 (стат. сб.). – Минск, 2020. – 202 с.
11. Валовой сбор и урожайность сельскохозяйственных культур в Республике Беларусь за 2016 год (стат. бюл.). – Минск, 2017. – 56 с.
12. Валовой сбор и урожайность сельскохозяйственных культур в Республике Беларусь за 2019 год (стат. бюл.). – Минск, 2019. – 57 с.

13. Логинов, В. Ф. Основные принципы адаптации земледелия Беларуси к изменяющемуся климату / В. Ф. Логинов, М. А. Кадыров, Г. А. Камышенко // Природопользование. – Минск, 2010. – Вып. 17. – С. 28–39.
14. Новые сроки сева озимых в 2020 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://agrotimes.by/novye-sroki-seva-ozimykh-v-2020-godu/>. – Дата доступа: 20.03.2021.
15. Kochurko, V. I. Tekhnologiya vozdelivaniya ozimoy rжи : uchebnoe posobie / V. I. Kochurko, A. A. Pugach. – Baranovichi : RIIO BaraGU, 2007. – 32 c.
16. Справочник по климату Беларуси // Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://pogoda.by/climat-directory/>. – Дата доступа: 20.03.2021.

References

1. Kulakovskaya T. N., Bogdevich I. M., Shatalova R. V. *Ocenka vliyaniya pogodnyh usloviy na urozhaj zernovyh kul'tur v BSSR* [Assessment of the impact of weather conditions on grain crops in the BSSR]. *Pochvovedenie i agrohimiya = Soil science and agrochemistry*, 1980, vol. 16, pp. 131–142. (in Russian)
2. Loginov V. F., Volchek A. A., Volchek An. A. *Ocenka vliyaniya klimaticheskikh faktorov na dinamiku urozhajnosti osnovnyh sel'skohozyajstvennyh kul'tur v Brestskoj oblasti* [Assessment of the effect of climatic factors on the dynamics of yield of main crops in the Brest region]. *Prirodnyye resursy = Natural Resources*, 2006, issue 3, pp. 5–22. (in Russian)
3. Loginov V. F., Lysenko S. A., Mel'nik V. I. *Izmenenie klimata Belarusi: prichiny, posledstviya, vozmozhnosti regulirovaniya* [Climate change in Belarus: causes, consequences, opportunities for regulation]. Minsk, 2020, 264 p. (in Russian)
4. Lysenko S. A. *Prognozirovaniye urozhajnosti sel'skohozyajstvennyh kul'tur na osnove sputnikovogo monitoringa dinamiki ugleroda v nazemnyh ekosistemah* [Forecasting crop yields through satellite monitoring of carbon dynamics in terrestrial ecosystems]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa = Exploration of the Earth from space*, 2019, no. 4, pp. 48–59. (in Russian)
5. Pasov V. M. *Izmenchivost' urozhaev i ocenka ozhidaemoj produktivnosti zernovyh kul'tur* [Crop variability and estimated expected cereal productivity]. Leningrad, 1986, 150 p. (in Russian)
6. Sachok G. I., Kamyshenka H. A. *Faktory i modeli izmenchivosti urozhajnosti sel'skohozyajstvennyh kul'tur Belarusi* [Factors and patterns of crop variability in Belarus]. Minsk, 2006, 243 p. (in Russian)
7. Trubilin A. I., Petrik G. F., Prudnikov A. G. *Prognozirovaniye urozhajnosti sel'skohozyajstvennyh kul'tur: uchebnoe posobie* [Forecasting crop yields: Tutorial]. Krasnodar, 2017, 95 p. (in Russian)
8. Kamyshenka H. A. *Raschet urozhajnosti ozimyh zernovyh kul'tur Belarusi* [Calculation of winter cereal crops in Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2009, no. 16, pp. 133–140. (in Russian)
9. *Ohrana okruzhayushchej sredy v Respublike Belarus'* [Environmental protection in the Republic of Belarus, 2017 (stat. coll.)]. Minsk, 2017, 235 p. (in Russian)
10. *Ohrana okruzhayushchej sredy v Respublike Belarus'* [Environmental protection in the Republic of Belarus, 2020 (stat. coll.)]. Minsk, 2020, 202 p. (in Russian)
11. *Valovoj sbor i urozhajnost' sel'skohozyajstvennyh kul'tur v Respublike Belarus' za 2016 god (stat. byull.)* [Gross harvest and yield of agricultural crops in the Republic of Belarus for 2016 (stat. bull.)]. Minsk, 2017, 56 p. (in Russian)
12. *Valovoj sbor i urozhajnost' sel'skohozyajstvennyh kul'tur v Respublike Belarus' za 2019 god (stat. byull.)* [Gross harvest and yield of agricultural crops in the Republic of Belarus for 2019 (stat. bull.)]. Minsk, 2019, 57 p. (in Russian)
13. Loginov V. F., Kadyrov M. A., Kamyshenka H. A. *Osnovnye principy adaptacii zemledeliya Belarusi k izmenyayushchemu klimatu* [Basic principles of adaptation of Belarus agriculture to changing climate]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2010, issue 17, pp. 28–39. (in Russian)
14. *Novye sroki seva ozimykh v 2020 godu* [New deadlines for winter sowing in 2020] [Electronic resource]. Available at: <https://agrotimes.by/novye-sroki-seva-ozimykh-v-2020-godu/> (accessed 20 March 2021). (in Russian)
15. Kochurko V. I., Pugach A. A. *Tekhnologiya vozdelivaniya ozimoj rжи: uchebnoe posobie* [Winter Rye Cultivation Technology]. Baranovichi, 2007, 32 p. (in Russian)
16. *Spravochnik po klimatu Belarusi* [Climate handbook of Belarus] [Electronic resource]. Republican Center for Hydrometeorology, Radioactive Contamination Control and Environmental Monitoring. Available at: <https://pogoda.by/climat-directory/> (accessed 20 March 2021). (in Russian)

Информация об авторе

Камышенка Галина Анатольевна – кандидат технических наук, научный секретарь, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kamyshenka@tut.by

Information about the author

Halina A. Kamyshenka – Ph. D (Technical), Scientific Secretary, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kamyshenka@tut.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2021-1-49-61>

УДК 91:504

Поступила в редакцию 03.03.2021

Received 03.03.2021

ОЦЕНКА ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В ПРЕДЕЛАХ МАЛЫХ ВОДОСБОРОВ БАССЕЙНА РЕКИ ЯСЕЛЬДЫ

А. А. Волчек¹, И. В. Окоронко²

¹Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь;

²Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина, Брест, Беларусь

Аннотация. Рассматриваются результаты геоэкологических исследований водосборных бассейнов малых рек, которые в последние годы становятся объектами пристального внимания из-за высокой степени их трансформации, связанной со значительными антропогенными нагрузками. Представлена методика геоэкологического анализа антропогенных нагрузок на водосборы малых рек, природных средообразующих факторов и комплексная характеристика экологического состояния бассейна реки Ясьельды с применением ГИС-технологий. Геоэкологическое состояние малых водосборов оценивается с использованием показателей природной защищенности территории и факторов антропогенной нагрузки. Применена авторская методика оценки геоэкологической ситуации в пределах малых водосборов рек Белорусского Полесья на основе матрицы атрибутивных показателей, позволившая с учетом обобщенных балльных оценок выделить категории земель с различной геоэкологической ситуацией. Приведено гидрографическое районирование бассейна реки Ясьельды, выделены восемь частных малых водосборов (суббассейнов). Представлены результаты анализа природно-ресурсного потенциала малых водосборов бассейна реки Ясьельды, оценки природных средообразующих факторов, а также качественные и количественные характеристики основных антропогенных факторов.

Ключевые слова: эколого-гидрографические исследования; гидрографическая сеть; речные бассейны; водосборы малых рек; атрибутивные показатели; природные средообразующие факторы; факторы антропогенной нагрузки; геоэкологическая ситуация.

Для цитирования. Волчек А. А., Окоронко И. В. Оценка экологической ситуации в пределах малых водосборов реки Ясьельды // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 49–61.

ASSESSMENT OF THE GEOECOLOGICAL SITUATION WITHIN THE SMALL DRAINS IN THE YASELDA RIVER BASIN

A. A. Volchak¹, I. V. Okoronko²

¹Brest State Technical University, Brest, Belarus;

²Brest State University named after A. S. Pushkin, Brest, Belarus

Abstract. The main topic of research is the drainage basins of small rivers, which in recent years have become objects of close attention due to the high degree of their transformation associated with significant anthropogenic loads. The article presents a methodology for geoecological analysis of anthropogenic loads on the catchments of small rivers, an assessment of the degree of natural protection of the territory and a comprehensive description of the ecological state of the Yaselda river basin using GIS technologies. The paper considers the results of the study of the geoecological state of small catchments by assessing various indicators of the natural protection of the territory and factors of anthropogenic load. The scientific novelty of the research consists in the development of a methodology for assessing the geoecological situation of small catchments of the rivers of the Belarusian Polesye on the basis of a matrix of attributive indicators, which allows, taking into account generalized point estimates, to identify categories of lands with different geoecological situations. As a result of the research, a hydrographic zoning of the river basin was carried out. Yaselda, eight small private catchments (sub-basins) were identified, cartographic material was digitized, statistical data were collected, a database was created on various physical-geographical, socio-economic and ecological-hydrographic indicators. In this work, for the first time, the natural resource potential of small catchments of the Yaselda river basin is studied and presented, the natural environment-forming factors are assessed, and the main anthropogenic factors are identified, their qualitative and quantitative characteristics are carried out.

Keywords: ecological and hydrographic studies; hydrographic network; river basins; catchments of small rivers; attributive indicators; natural environment-forming factors; factors of anthropogenic load; geoecological situation.

For citation. Volchak A. A., Okoronko I. V. Assessment of ecological situation within the small drains in the Yaselda river basin. *Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 49–61.

Введение. В результате интенсивного освоения территории Белорусского Полесья происходит усиление антропогенной нагрузки на окружающую природную среду, что приводит к ухудшению качественного состояния поверхностных вод. Оценка природного потенциала водных ресурсов, факторов формирования их экологического состояния, поиск алгоритмов оптимизации рационального водопользования с применением современных методов ГИС-технологий обуславливает актуальность темы исследования. В последние годы большое внимание уделяется экологическим проблемам водохранилищ малых рек, которые существенно трансформируются в результате техногенного воздействия на природную среду. Главным условием нормального функционирования любой речной экосистемы является не только достаточность, но и надлежащее качество ее воды. Ясельда – типичная река Белорусского Полесья. Она является не только главной водной артерией данного региона, но и важным фактором социально-экономического развития Брестской области.

Объекты и методы исследования. Цель работы – провести оценку геоэкологической ситуации малых водосборов бассейна реки Ясельды с использованием бассейновой концепции. Объектом исследования выступают малые (частные) водосборы (суббассейны).

Основу методики составляет построение матрицы антропогенных нагрузок на водосборы малых рек по преобладающим источникам загрязнения и степени экологической опасности [1, 2]. Научная новизна исследований заключается в применении разработанной методики оценки геоэкологической ситуации малых водосборов на основе матрицы атрибутивных показателей, позволяющей с учетом обобщенных балльных оценок выделить категории земель с различной геоэкологической ситуацией. Методика, представленная в данной работе, апробирована нами при оценке антропогенной нагрузки на малые водосборы рек Пины и Лесной [3, 4].

Сущность методики геоэкологического анализа антропогенных воздействий на водосборы малых рек и водных объектов представляет собой определенную последовательность проведения следующих исследований.

1. Выбор операционной типологической единицы рассмотрения (элементарный водосбор, бассейн малой реки и др.). Посредством геоинформационного картирования выделено восемь малых водосборов (табл. 1, рис. 1).

Таблица 1. Структура гидрографической сети бассейна реки Ясельды

Table 1. The structure of the hydrographic network of the Yaselda river basin

Малый водосбор	Индекс	Площадь, км ²	Доля, % от бассейна
р. Ясельды от истока до впадения р. Кречет	Я 1	934,2	16,4
р. Жигулянки	Я 2	912,6	16,1
р. Кречет	Я 3	75,1	1,3
кан. Винец	Я 4	460,1	8,1
р. Ясельды от впадения кан. Винец до впадения р. Жигулянки	Я 5	382,6	6,7
р. Ясельды от впадения р. Жигулянки до впадения кан. Огинского	Я 6	1542,8	27,1
кан. Огинского	Я 7	594,4	10,5
р. Ясельды от впадения кан. Огинского до впадения в р. Припять	Я 8	783,7	13,8

2. Выявление основных природных средообразующих факторов и их количественная характеристика. Для каждого частного водосбора проводилась оценка природного фактора, способного в определенной мере компенсировать антропогенные воздействия. Таким образом, проанализированы следующие показатели: густота речной сети, озерность, лесистость, заболоченность, доля территорий под водными объектами, доля луговых территорий.

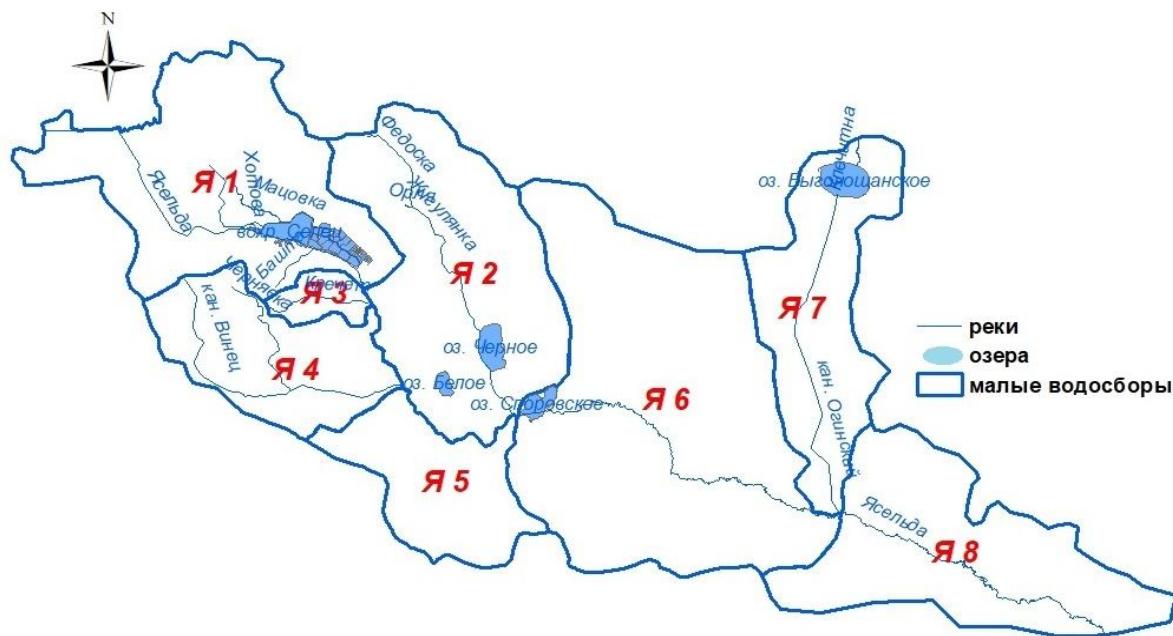


Рис. 1. Малые водосборы бассейна реки Ясельды

Fig. 1. Small catchments of the Yaselda river basin

3. Выявление основных факторов антропогенной нагрузки и оценка их количественных характеристик. Оценка антропогенных факторов производилась по следующим показателям: доля городских территорий, доля территорий сельских населенных пунктов, численность населения, плотность населения, распаханность территории, густота автомобильных дорог, количество внесенных минеральных и органических удобрений, количество крупного рогатого скота [5–7]. Влияние сельского хозяйства оценивалось по животноводческой отрасли и растениеводству, оказывающих наибольшее негативное влияние на водные ресурсы и окружающую среду в целом. Антропогенная нагрузка от животноводства на выделенные водосборные территории оценивалась по объему твердых и жидким отходов и содержащемуся в них количеству действующего вещества [8–10].

4. Картографирование выявленных природных и антропогенных факторов для выбранных типологических единиц рассмотрения. Необходимый материал был получен путем обработки картографических и справочных материалов. Все расчеты и картосхемы проводились и со-здавались с использованием приложения ArcGIS, позволяющего создавать различные электронные карты, проводить расчеты и моделирование. Базовыми для ее создания являются карта OpenStreetMap с нанесенным на нее функциональным зонированием и разновременные топографические карты. Информация по различным показателям получена в результате дешифрирования и оцифровки карт OpenStreetMap высокого разрешения. При этом каждому идентифицированному участку соответствует атрибутивная таблица, содержащая информацию о количественных и качественных характеристиках по изучаемым показателям. Картографическая база данных охватывает географический блок, который включает тематические карты и оценочный блок, содержащий синтетические карты. Исходная база данных формировалась по справочным материалам землеустроительных служб, отчетам статистического комитета, сельских исполнительных комитетов, а также комитета по сельскому хозяйству и продовольствию Брестского областного исполнительного комитета. Часть данных была получена с помощью созданной геоинформационной системы путем наложения различных тематических карт.

5. Составление матрицы характеристик природных факторов и антропогенной нагрузки в балльных показателях. Для оценки использована трехбалльная оценочная шкала с дополнительным баллом при отсутствии данного показателя в пределах водосбора. Для расчета комплексных показателей положительной и отрицательной составляющих оценки использовался метод сложения соответствующих балльных значений показателей и последующего трехуровневого равномерного ранжирования их суммы.

6. Анализ полученных результатов. В результате проведенного исследования выделены малые водосборы, характеризующиеся наибольшей антропогенной напряженностью, а также предложены мероприятия для их дальнейшего рационального использования.

Результаты и их обсуждение. Река Ясельда – левый приток Припяти. Длина реки составляет 250 км. Берет исток из болота Дикое в 4 км к северу от д. Клепачи Пружанского р-на вблизи восточной границы Национального парка «Беловежская пуща» и впадает в р. Припять в 3 км северо-западнее д. Качановичи Пинского р-на. Протекает по территории Пружанского, Березовского, Дрогичинского, Ивановского и Пинского р-нов Брестской обл. В верхнем течении русло реки является границей между Гродненской и Брестской обл. [11, 12]. В верховье течет по Прибугской равнине, далее – по Припятскому Полесью, относится к бассейну Черного моря. Река имеет невыраженную долину шириной 2–4 км, максимальная ширина составляет 6–8 км. Пойма реки двухсторонняя, в среднем течении имеет ширину 0,8–1,2 км, в нижнем – 1,5–6 км. Русло реки канализовано на протяжении 39 км от истока, а также 15 км на территории Берёзовского р-на. На неканализованных участках русло очень извилистое, имеет ширину 10–40 м, максимальная ширина составляет 80 м. Имеет правые (реки Кречет, Башта, Чернявка, Плёса, кан. Винец) и левые (рр. Мацковка, Хотова, Федоска, Орля, Жигулянка, кан. Огинский) притоки [12, 13].

Река Жигулянка образуется в результате слияния рр. Орля и Федоски в 9 км севернее д. Бронна Гора Берёзовского р-на. Длина реки составляет 58 км, впадает в оз. Черное в Березовском р-не. После выхода из озера река называется Дорогобуж. Впадает в р. Ясельду в 3 км севернее д. Кокорица Дрогичинского р-на. Река Орля берет начало в 5 км юго-западнее д. Хрищеновичи Ивацевичского р-на, протекает по заболоченной и лесистой территории, длина реки составляет 14 км. Русло почти полностью канализовано. Исток р. Федоска расположен в 4 км южнее д. Иодчики Ивацевичского р-на, длина реки – 22 км.

Исток р. Кречет находится в 2 км западнее д. Оницевичи Березовского р-на, протекает через г. Береза и на его восточной окраине впадает в р. Ясельду. Длина реки – 26 км. Русло канализовано на всем протяжении реки.

До сравнительно недавнего времени кан. Винец был рекой. На всех географических картах до 1960-х гг. Винец обозначен как река. Затем, в результате мелиорации и спрямления, река превратилась в канал. Берет начало в 3 км к юго-западу от д. Россохи Пружанского р-на, впадает в р. Ясельду в 1 км севернее д. Матвеевичи Берёзовского р-на. Длина составляет 71 км. Основные притоки: р. Чернявка, каналы Давыдовичский, Черничный, Залужьевский, Мошковичский, Ястребельский. В пойме кан. Винец в Берёзовском р-не построены наливные пруды около д. Малеч, площадь водного зеркала – 2,9 га, д. Лукомер – 0,5, д. Павловичи – 6,3 га. Река Чернявка является левым притоком кан. Винец. Берет начало мелиоративным каналом в 2 км юго-западнее д. Ворожбиты Берёзовского р-на. Русло реки на всем протяжении канализировано, длина составляет 33 км. В 1 км южнее аг. Ревятичи Берёзовского р-на впадает в кан. Винец.

Канал Огинский был построен в 1783 г., соединив рр. Ясельда и Щара, таким образом соединив бассейны Черного и Балтийского морей. Частью канала являются озера Выгонощанско и Вульковское. Длина канала составляет 54 км.

Бассейн р. Ясельды расположен на территории восьми административных р-нов (Пружанского, Березовского, Дрогичинского, Ивановского, Ивацевичского, Пинского, Ляховичского и Ганцевичского) Брестской обл. (рис. 2).

Население водосбора проживает в 350 населенных пунктах, из которых три города районного подчинения (Береза, Белоозёрск, Косово), два поселка городского типа (Телеханы, Логишин), 45 агрогородков, 300 сельских населенных пунктов (297 деревень, 3 поселка), выделяется 50 сельских исполнительных комитетов (рис. 2, 3; табл. 2).

Таблица 2. Демографические показатели малых водосборов реки Ясельды

Table 2. Demographic indicators of small catchments of the Yaselda river

Малый водосбор	Количество населенных пунктов	Количество населения, чел.		Прирост населения, чел.	Плотность населения, чел/км ²	
		2009 г.	2018 г.		2009 г.	2018 г.
Я 1	55	5403	5571	+168	5,8	6,0
Я 2	41	27 558	27 063	-495	30,2	29,7
Я 3	8	32 103	32 493	+390	427,4	432,6
Я 4	62	10 181	9701	-480	22,1	21,1
Я 5	34	5273	4517	-756	13,8	11,8
Я 6	74	22 919	20 768	-2151	14,9	13,5
Я 7	16	9642	8577	-1065	16,2	14,4
Я 8	60	21 319	21 472	+153	27,2	27,4

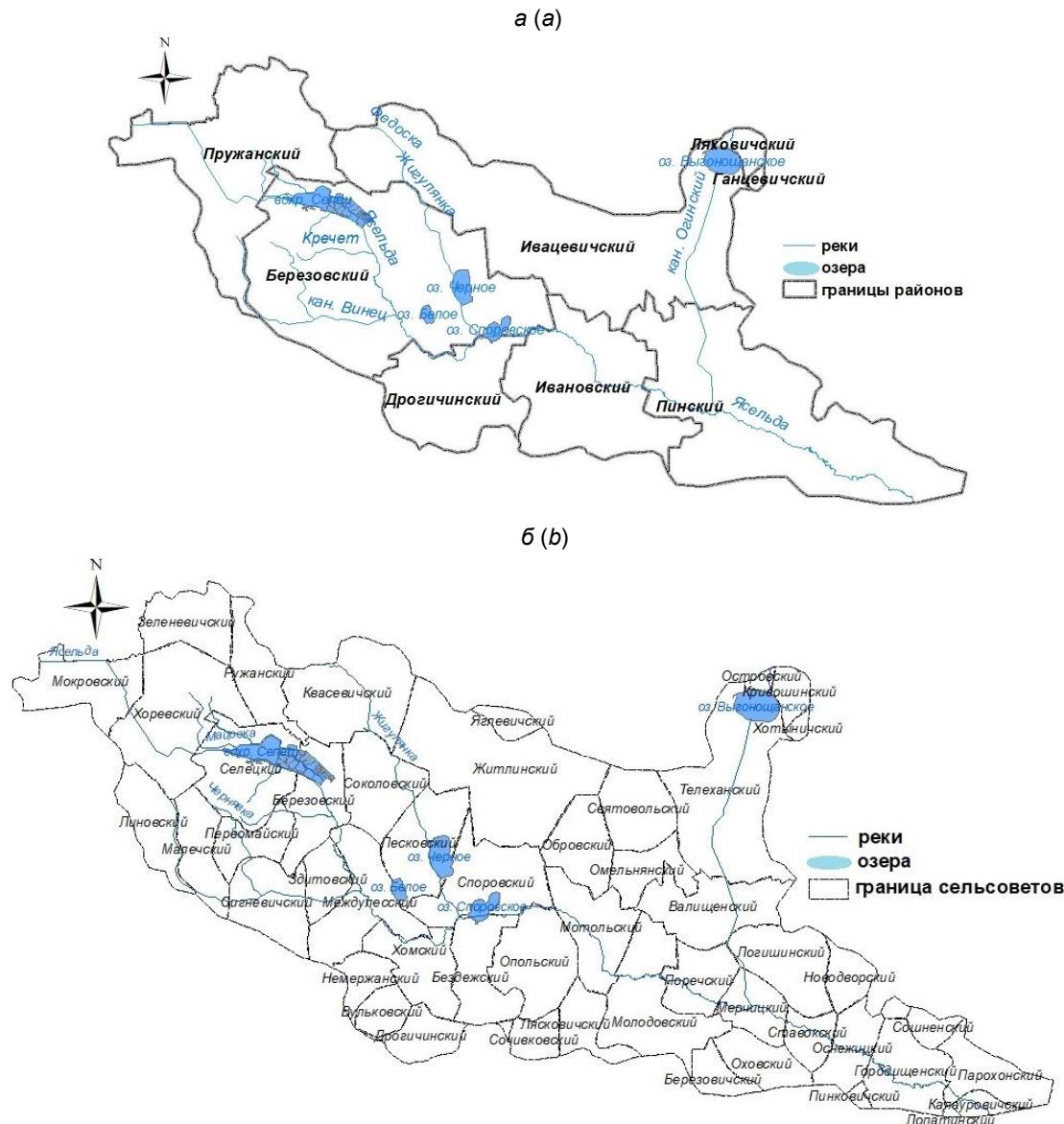


Рис. 2. Административно-территориальное деление бассейна:
а – административные районы; б – сельские исполнительные комитеты

Fig. 2. Administrative-territorial division of the basin:
a – administrative regions; b – village executive committees

В ходе исследования показателей природных средообразующих факторов выявлены следующие различия (рис. 4). Малые водосборы р. Ясельды характеризуются относительно высоким показателем густоты речной сети (от 0,53 до 1,24 км/км²). Средний показатель густоты речной сети для Брестской обл. составляет 0,42 км/км² [13]. Наибольшие показатели наблюдаются на малых водосборах Я8 (1,24 км/км²), Я6 (1,11), Я4 (1,02) и Я2 (1,02 км/км²). Водосборы Я1 (1,0 км/км²) и Я7 (0,85 км/км²) характеризуются средними показателями, а наименьшие показатели присущи водосбору Я3 и составляют 0,53 км/км². Данный водосбор является самым малым по площади в сравнении с другими водосборами.

Озерность исследуемой территории варьирует от 0,04 до 2,84 %. Самым крупными по площади являются оз. Выгонощанское (70,8 км²), Черное (48,0 км²), Споровское (31,3 км²), Белое (14,3 км²), а также искусственные водоемы – вдхр. Селец (52,5 км²) [14–16]. Наибольшие показатели озерности отмечены на водосборе Я2 (2,84 %), средние – на водосборах Я1 (1,45%) и Я6 (1,17 %). В границах водосбора Я2 находятся озера Черное и Белое, водосбора Я1 – вдхр. Селец, а водосбора Я6 – оз. Выгонощанское. Наименьшие показатели присущи водосборам Я7 (0,04 %) и Я3 (0,17 %).

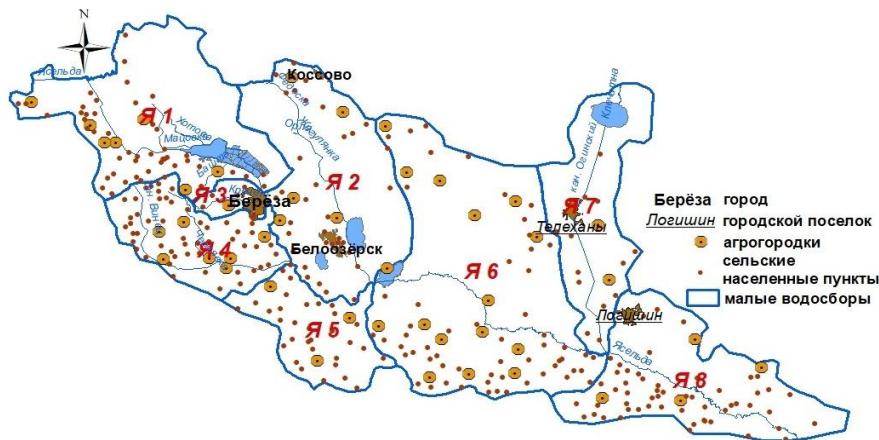


Рис. 3. Размещение населенных пунктов в границах бассейна

Fig. 3. Placement of settlements within the basin

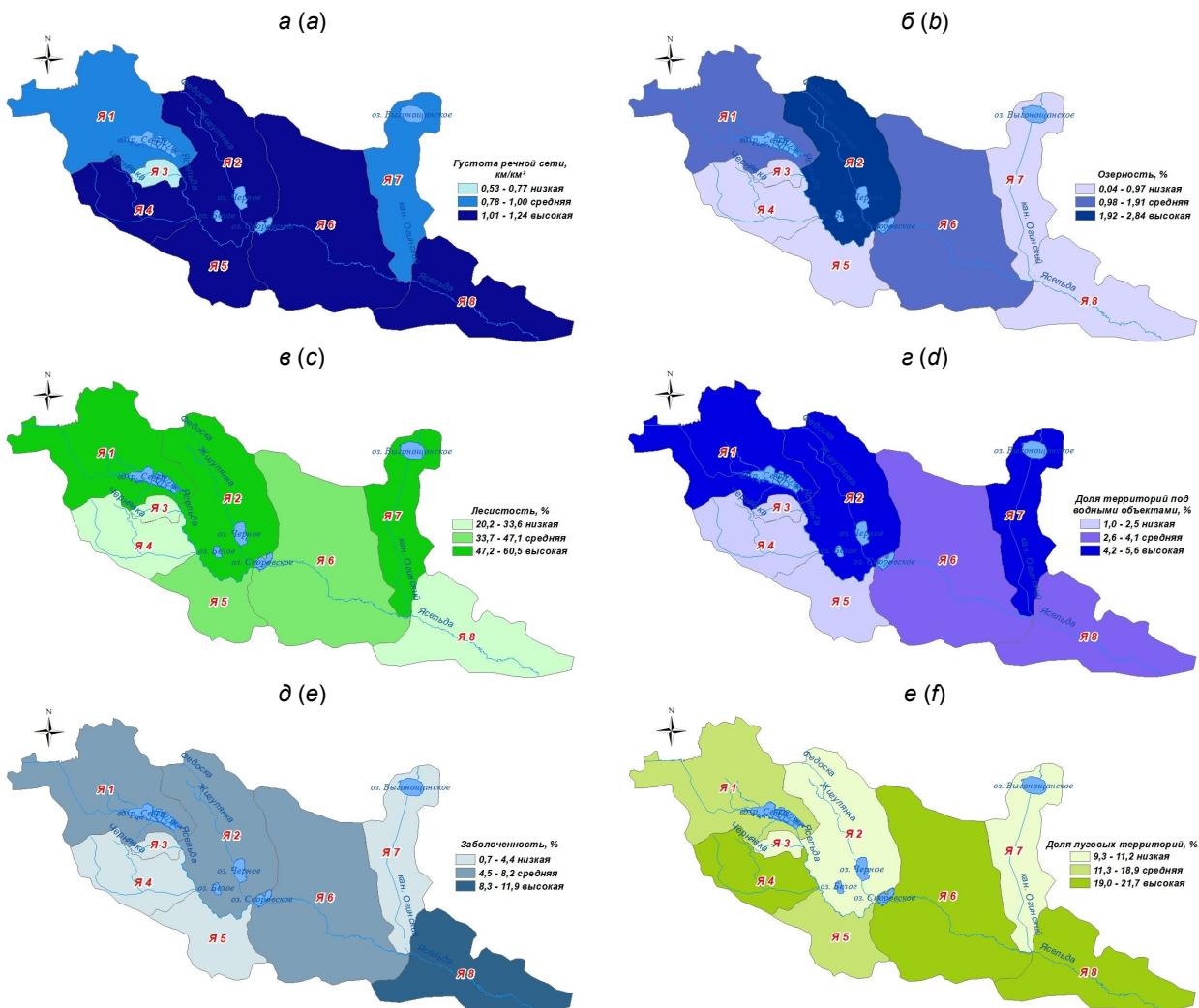


Рис. 4. Распределение показателей природных средообразующих факторов:
а – густота речной сети; б – озерность; в – лесистость; г – доля территорий под водными объектами;
д – заболоченность; е – доля луговых территорий

Fig. 4. Distribution of indicators of natural environment-forming factors:
a – channel network density; b – lakes; c – forest cover; d – share of territories under water bodies;
e – waterloggedness; f – proportion of meadow areas

Показатели лесистости варьируют от 20,2 до 60,5 %. В целом, по водосбору р. Ясельды средняя лесистость составляет 41,4 %, при среднереспубликанском показателе 39,8 % и среднем по Брестской обл. – 36,4 % [17]. Наибольшая доля лесных фитоценозов характерна водосборам Я7 (60,5 %, или 35,9 тыс. га), Я1 (51,8 %, или 48,4 тыс. га) и Я2 (51,1 %, или 46,7 тыс. га). В пределах водосбора Я7 расположен ландшафтный заказник «Выгонощанская» (13,8 тыс. га), на территории водосбора Я1 – биологический заказник «Бусловка» (8,5 тыс. га) и Национальный парк «Беловежская пуща» (1,1 тыс. га), а на водосборе Я2 – биологический заказник «Споровский» (5,6 тыс. га) [18]. Наряду с этим водосбору Я1 присущ также невысокий показатель селитебной освоенности, плотность населения здесь составляет 6,0 чел/км². Средние показатели лесистости отмечаются на водосборах Я6 (36,4 %, или 56,1 тыс. га) и Я5 (33,7 %, 12,9 тыс. га). Наименьшие показатели лесистости наблюдаются на водосборах Я4 (20,2 %, или 9,3 тыс. га) и Я8 (29,5 %, или 23,1 тыс. га).

Наибольшая доля болотных экосистем характерна для водосбора Я8 (11,9 %, 9,3 тыс. га), Я2 (7,0 %, 6,4 тыс. га) и Я6 (5,9 %, 9,1 тыс. га). В пределах водосбора Я8 расположен ландшафтный заказник «Средняя Припять», созданный в 1999 г. с целью сохранения уникальных ландшафтов Белорусского Полесья, в том числе и низинных болот. На водосборах Я2 и Я6 находится биологический заказник «Споровский», созданный в 1991 г. и представляет собой крупнейший массив низинных болот Полесья [18]. Наименьшие показатели заболоченности выявлены на водосборах Я3 (0,7 %, или 55 га) и Я7 (1,6 %, или 971 га). В целом, для всей территории бассейна р. Ясельды характерен высокий показатель заболоченности (5,8 %, или 32,9 тыс. га), при среднем показателе по Брестской области 1,25 % [13, 17].

Доля луговых территорий в пределах бассейна варьирует от 9,3 до 21,7 %. Наибольшими показателями характеризуются водосборы Я8 (21,7 %, или 17,0 тыс. га), Я4 (20,0 %, или 9,2 тыс. га) и Я1 (18,9 %, или 48 014 га). Наименьшие показатели наблюдаются на водосборах Я3 (9,3 %, 1891 га) и Я2 (10,9 %, или 17,7 тыс. га). В целом, средний показатель доли луговых территорий бассейна р. Ясельды выше среднеобластного (12,5 %) и составляет 17,6 % [13, 17].

Распределение демографических показателей представлено на рис. 3, 5 и в табл. 2. На исследуемой территории проживает 130,1 тыс. чел. (50,0 тыс. городское и 80,1 тыс. сельское). Уровень урбанизации бассейна р. Ясельды составляет 38,4 %, при среднереспубликанском показателе 78,0 % и среднем по Брестской области – 70,5 % [19]. Самым урбанизированным является водосбор Я3 (90,6 %). Здесь расположен г. Берёза (29,5 тыс. чел.), который является городом районного подчинения и административным центром Берёзовского района. На долю городских территорий здесь приходится 20,9 % водосбора. Средними показателями характеризуются водосбор Я7 (1,3 %), который представлен городским поселком Телеханы (4,0 тыс. чел.). Минимальные показатели доли городских территорий отмечаются на водосборах Я2 (1,1 %) и Я8 (1,0 %). На водосборе Я2 расположены г. Белоозёрск (12,3 тыс. чел.) и г. Косово (1,8 тыс. чел.), а на водосборе Я8 – г. п. Логишин (2,2 тыс. чел.). На территории остальных водосборов представлены только сельские населенные пункты (агрогородки, деревни, поселки).

Сельские населенные пункты присутствуют на всех исследуемых водосборах, но наибольшая их площадь наблюдается на водосборах Я3 (9,7 %, или 3,0 тыс. чел.), Я5 (9,5 %, или 4,5 тыс. чел.), Я6 (9,5 %, или 20,7 тыс. чел.) и Я4 (9,4 %, или 9,7 тыс. чел.). На водосборе Я3 расположено всего восемь сельских населенных пунктов, их суммарная площадь составляет 7,3 км², но в сравнении с другими малыми водосборами водосбор Я3 характеризуется наименьшей площадью территории. Самые многолюдные сельские населенные пункты – д. Пинковичи (4,3 тыс. чел.), аг. Мотоль (4,0 тыс. чел.), аг. Пески (2,0 тыс. чел.), аг. Первомайская (1,8 тыс. чел.), аг. Малеч (1,7 тыс. чел.) и д. Заполье (1,5 тыс. чел.). Согласно материалам переписи населения 2009 года и данным по количеству населения на 2018 г. только водосборы Я1, Я3 и Я8 характеризуются положительным показателем прироста населения. Водосбор Я1 расположен в незначительном удалении от г. Пржалы, Я3 – от г. Берёза, а водосбор Я8 – в непосредственной близости от г. Пинска. Возможно, именно фактор географического положения данных водосборов, близость районных центров и обусловили здесь положительную динамику прироста населения. На остальных водосборах наблюдается сокращение численности населения, и за временной период 2009–2018 гг. все население бассейна сократилось на 4,3 тыс. чел. Наименьшими показателями доли сельских населенных пунктов характеризуется водосбор Я1 (2,2 %, или 5,6 тыс. чел.).

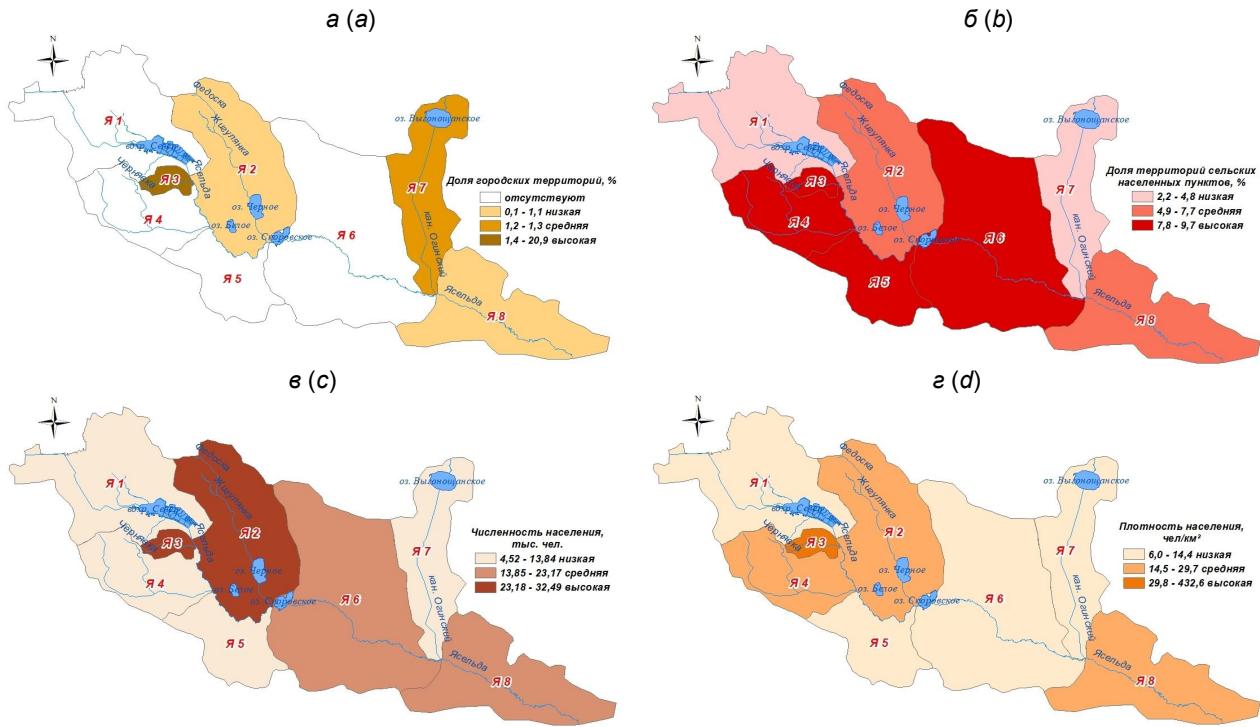


Рис. 5. Распределение демографических показателей: а – доля городских территорий; б – доля территорий сельских населенных пунктов; в – численность населения; г – плотность населения

Fig. 5. Distribution of demographic indicators:
a – share of urban areas; b – share of rural areas; c – population size; d – population density

В границах исследуемой территории проживает 130,1 тыс. чел. По данным первой всероссийской переписи 1897 года, население г. Берёза составляло 6226 чел., г. Косово – 3092 чел. В 1959 г. в г. Берёза проживало 5600 чел., а в г. Косово – 2600 чел. Город Белоозёрск был основан в 1958 г. недалеко от с. Нивки как посёлок энергетиков в связи со строительством Берёзовской ГРЭС. С 12 января 1960 г. существует как рабочий посёлок Берёзовский, 25 июня 1960 г. переименован в Белоозёрск. 16 сентября 1970 г. поселку присвоен статус города районного подчинения. В 1969 г. население города составляло 6,4 тыс. чел. По состоянию на 2018 г. население в г. Берёза составляло 29 450 чел., г. Косово – 1832 чел., г. Белоозёрска – 12 304 чел. [19, 20]. Если проанализировать динамику численности городского населения за период с 2009 по 2018 г., то положительная динамика наблюдается только в г. Берёза. В остальных городских населенных пунктах за анализируемый временной период зафиксировано сокращение количества жителей. Анализ численности населения по водосборам показал, что наибольшее его количество проживает на водосборах Я3 (32,5 тыс. чел) и Я2 (27,1 тыс. чел.), а наименьшее – на водосборах Я5 (4,5 тыс. чел.) и Я1 (5,6 тыс. чел.).

В целом, исследуемый регион характеризуется невысокой степенью антропогенной и хозяйственной освоенности территории. Средняя плотность населения составляет 22,9 чел./км², при среднем показателе для Беларуси 45 чел./км² и для Брестской обл. – 42 чел./км² [19]. Наибольшая концентрация населенных пунктов наблюдается на «правобережье» бассейна р. Ясьельды, это наименее заселенная территория, которая характеризуется наибольшей селитебной освоенностью. Оценка антропогенной преобразованности территории региона проводилась на основе анализа карт 1930-х гг. [21–23] и статистической информации [19, 20]. По данным переписи 2009 года население водосбора составляло 134,4 тыс. чел., а в 2018 г. – 130,1 тыс. чел. Наибольшая плотность населения зафиксирована на водосборе Я3 (432,6 чел./км²), собственно, здесь и насчитывается наибольшее количество жителей (32,5 тыс. чел.). Наименьший показатель плотности населения характерен для водосборов Я1 и Я5 и составляет 6,0 и 11,8 чел./км² соответственно.

Автомобильные дороги оказывают влияние на гидрологический режим малых водосборов. Наибольший показатель густоты автомобильных дорог характерен для водосбора Я3 (3,98 км/км²) (рис. 6). Данный регион является самым малым по площади и самым урбанизированным водосбором, характеризуется наибольшими показателями количества и плотности населения, что и способствовало развитию транспортной инфраструктуры. Менее всего линейные транспортные объекты представлены на водосборах Я5, Я6 и Я7.

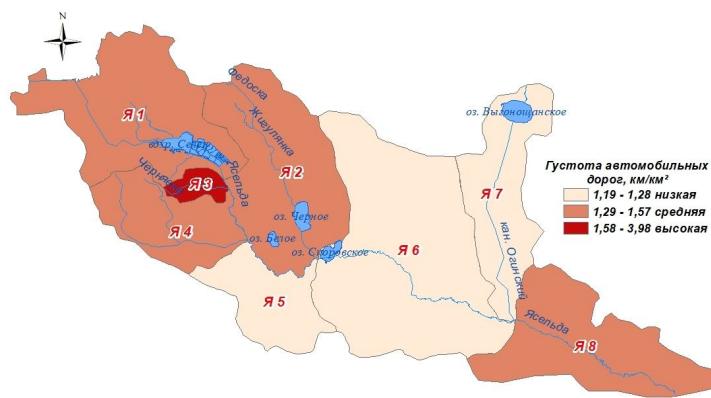


Рис. 6. Густота автомобильных дорог

Fig. 6. Density of roads

Исследуемая территория характеризуется относительно невысоким показателем сельскохозяйственной освоенности (рис. 7). В пределах водосбора расположено 52 предприятия агропромышленного комплекса и свыше 150 фермерских хозяйств. В сельскохозяйственной отрасли занято свыше 50 % от общего числа работающих в сфере материального производства. Регион в животноводстве специализируется на производстве молока и мяса, в растениеводстве – на выращивании зерновых культур, сахарной свеклы, рапса, картофеля, а также на кормопроизводстве. На долю пашни приходится 24,3 % территории бассейна, при среднереспубликанском показателе 42 % [19]. Наибольшими площадями пахотных угодий характеризуются водосборы Я4 (46,8 %) и Я3 (41,1 %). Наименьшая степень распаханности отмечена на водосборах Я2 (16,1 %) и Я7 (16,3 %). Данные водосборы претерпели наименьшие антропогенные воздействия, и в их земельном фонде доминируют природные экосистемы (болота, лес, луга, водные объекты).

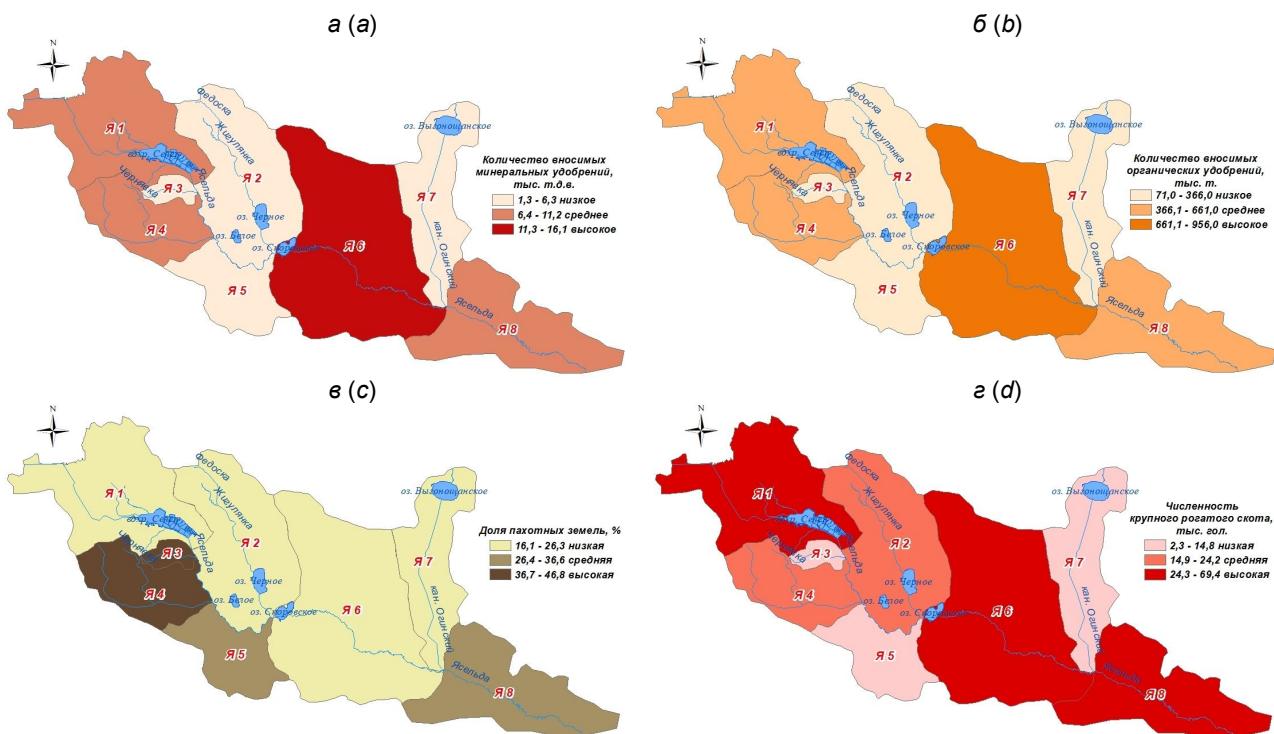


Рис. 7. Распределение сельскохозяйственных показателей:
 а – количество вносимых минеральных удобрений; б – количество вносимых органических удобрений;
 в – распаханность территории; г – численность крупного рогатого скота

Fig. 7. Distribution of agricultural indicators:
 a – amount of applied mineral fertilizers; b – amount of applied mineral fertilizers;
 c – plowed up territory; d – number of cattle

Сельскохозяйственное производство и активное животноводство негативно влияют на природные экосистемы. Хозяйственная деятельность на водосборах малых рек нарушает естественный круговорот веществ, изменяет потоки биогенных элементов, что приводит к снижению их концентрации в одних местах и накоплению в других. Избыточное поступление биогенных элементов в водоемы и водотоки вызывает их эвтрофикацию [4–7]. Сельскохозяйственные предприятия исследуемого региона в животноводстве в основном специализируются на разведении крупного рогатого скота (КРС). Так, в отдельных хозяйствах количество КРС превышает 10 тыс. голов (ОАО «Параходское», ОАО «Отечество», ОАО «Ружаны-Агро», ОАО «Журавлиное»). Наибольшее количество КРС зафиксировано на водосборах Я1 (69,4 тыс. гол.), Я6 (65,9 тыс. гол.), а наименьшее – на водосборах Я3 (2,3 тыс. гол.) и Я5 (13,8 тыс. гол.).

В растениеводстве активно используются минеральные и органические удобрения. Зачастую сельскохозяйственными организациями не соблюдаются надлежащие условия по хранению, транспортировке и внесению удобрений. Это приводит к их накоплению в почве с последующим поступлением в поверхностные и грунтовые воды. В отдельных хозяйствах минеральные и органические удобрения вносятся в большом количестве. Так, свыше 10 т органических удобрений на один гектар пахотных угодий вносят УП «Молодово-Агро» (18,5 т/га), СПК «Святая Воля» (17 т/га), ОАО «Параходское» (14,3 т/га), ОАО «Почапово» 13,8 т/га и свыше 300 кг действующего вещества на один гектар сельхозугодий минеральных удобрений (азотные, фосфорные и калийные) – СПК «Святая Воля» (320 кг д. в/га), ОАО «Великосельское-Агро» (293 кг д. в/га), ОАО «АгроКолядичи» (256 кг д. в/га). Наибольшее количество минеральных удобрений попадает в почву в пределах водосборов Я6 (16,1 тыс. т д. в.) и Я4 (8,1 тыс. т д. в.), наименьшее количество – на водосборах Я3 (1,3 тыс. т д. в.) и Я5 (2,6 тыс. т д. в.). Органических удобрений больше всего вносится в пределах водосборов Я6 (956 тыс. т) и Я4 (479 тыс. т), меньше всего – на водосборах Я3 (71 тыс. т) и Я7 (181 тыс. т). В границах бассейна р. Ясельды в год в почву попадает 3,1 млн т органических и 50,2 тыс. т д. в. минеральных удобрений.

На основе трехинтервального ранжирования природных средообразующих и антропогенных оценочных показателей были рассчитаны общие положительный и отрицательный показатели, представленные на рис. 8.

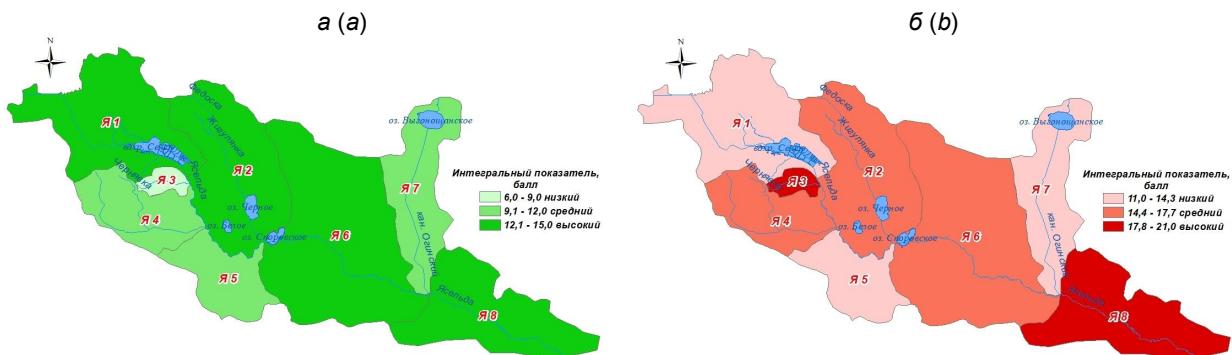


Рис. 8. Распределение интегральных показателей комплексной оценки:
а – природных средообразующих факторов; б – факторов антропогенной нагрузки

Fig. 8. Distribution of integral indicators integrated assessment:
a – natural environment-forming factors; b – factors of anthropogenic load

Наибольшими показателями наличия природных средообразующих факторов характеризуются водосборы Я1, Я2, Я6 и Я8. Водосборы Я4, Я5 и Я7 имеют средний показатель, а водосбор Я3 характеризуются низкой степенью защищенности.

По данным оценки антропогенной нагрузки, водосборы Я3 и Я8 имеют самый высокий интегральный показатель антропогенной преобразованности территории, водосборы Я2, Я4 и Я6 – средний показатель, а водосборы Я1, Я5 и Я7 характеризуются минимальной антропогенной преобразованностью.

Выводы. На основе проведенного анализа по оценке природной защищенности и антропогенной нагрузке на территорию малых водосборов р. Ясельды можно сделать следующие выводы.

- Бассейн р. Ясельда является уникальным объектом для геоэкологического исследования с применением ГИС-технологий. Данный регион характеризуется ландшафтным, почвенным, геоботаническим и зоогеографическим разнообразием.

2. Впервые для исследуемой территории, с использованием бассейнового подхода, проведено гидрографическое районирование бассейна р. Ясьельды, выделены восемь частных малых водосборов (суббассейнов), оцифрован картографический материал, собраны статистические данные, создана база данных по различным физико-географическим, социально-экономическим и эколого-гидрографическим показателям.

3. В работе впервые изучен и представлен природно-ресурсный потенциал малых водосборов бассейна р. Ясьельды, проведена оценка природных средообразующих факторов территории малых водосборов, а также выявлены основные антропогенные факторы, проведена их качественная и количественная характеристика.

4. Выявлено, что наиболее напряженная экологическая ситуация характерна малым водосборам Я3 и Я8 и при этом водосбор Я3 характеризуется минимальными показателями наличия природных средообразующих факторов. На водосборах Я4, Я5 и Я7 наблюдаются средние показатели природных средообразующих факторов, и при этом на водосборах Я5 и Я7 выявлен средний показатель антропогенной нагрузки на территорию. Остальные водосборы характеризуются высокими показателями природных средообразующих факторов и низкими показателями природной преобразованности. Следовательно, на водосборах Я3 и Я8 рекомендуется снизить антропогенную нагрузку, повысить показатели природных средообразующих факторов территории, изменить существующую систему природопользования.

Полученные в ходе исследования данные будут использованы для дальнейших исследований, а также в планировании территории и землеустройстве. Для органов различного уровня управления практическая значимость исследования выражается в рекомендациях по интенсивности использования земель, выбору оптимального направления дальнейшего развития, ориентированного на сбалансированное экологически безопасное землепользование и устойчивое развитие территории. Предложения по совершенствованию региональной системы управления природопользованием и природоохранной деятельностью будут полезны для районных инспекций природных ресурсов и охраны окружающей среды, для работников землестроительных служб, сельскохозяйственным предприятиям. Результаты исследований могут быть также использованы в учебном процессе при подготовке студентов географов, геоэкологов и экологов высших учебных заведений Республики Беларусь.

Список использованных источников

1. Ясинский, С. В. Геоэкологический анализ антропогенных воздействий на водосборы малых рек / С. В. Ясинский // Изв. Акад. наук. Сер. географическая. – 2000. – № 4. – С. 74–82.
2. Мухина, Л. И. Принципы и методы технологической оценки природных комплексов / Л. И. Мухина. – М. : Наука, 1973. – 96 с.
3. Окоронко, И. В. Оценка антропогенной нагрузки на р. Пина с применением ГИС-технологий / И. В. Окоронко // Веснік Брэсцкага ўніверсітэта. Сер. 5, Хімія. Біялогія. Навукі аб зямлі. – Брэст, 2020. – № 1. – С. 112–122.
4. Волчек, А. А. Оценка антропогенной преобразованности водосборов малой реки (на примере реки Лесной) / А. А. Волчек, И. В. Окоронко // Земля Беларуси. – 2021. – № 1. – С. 51–59.
5. Методика определения биогенной нагрузки на водные объекты от сельскохозяйственного производства / А. Ю. Брюханов [и др.] // Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства. – 2016. – № 89. – С. 175–183.
6. Ясинский, С. В. Диффузное загрязнение водных объектов и оценка выноса биогенных элементов при различных сценариях землепользования на водосборе / С. В. Ясинский, Е. В. Веницианов, И. А. Вишневская // Водные ресурсы. – 2019. – Т. 46, № 2. – С. 232–244.
7. Кондратьев, С. А. Структура поверхности водосбора как определяющий фактор биогенной нагрузки на водоем (по данным математического моделирования) / С. А. Кондратьев, А. Ю. Брюханов, А. В. Терехов // Вопросы географии. – 2018. – № 145. – С. 89–108.
8. Метод расчета биогенной нагрузки на водные объекты / С. А. Кондратьев [и др.] // Региональная экология. – 2011. – № 3–4. – С. 50–59.
9. Антропогенная нагрузка на водосбор и ее учет при оценке выноса биогенных элементов в крупный водный объект (на примере Чебоксарского водохранилища) / С. В. Ясинский [и др.] // Научные проблемы оздоровления российских рек и пути их решения : сб. науч. тр., Нижний Новгород. – М. : Студия Ф1, 2019. – С. 487–491.
10. Иванов, А. А. Экологическая оценка водосборов малых рек (на примере Республики Марий Эл) / А. А. Иванов, П. М. Мазуркин. – Йошкар-Ола : МарГТУ, 2007. – 108 с.
11. Ясьельда / под общей ред. А. А. Волчека. – Минск : Беларуская навука, 2017. – 416 с. – (Реки Полесья).
12. Блакітная кніга Беларусі : энцыклапедыя / рэдкал.: Н. А. Дзісько [i інш.]. – Мінск : БелЭн, 1994. – 415 с.
13. Волчек, А. А. Водные ресурсы Брестской области / А. А. Волчек, М. Ю. Калинин. – Минск : Изд. центр БГУ, 2002. – 440 с.
14. Якушко О. Ф. Озера Беларуси / О. Ф. Якушко, И. А. Мысливец, А. Н. Рачевский ; под ред. О. Ф. Якушко. – Минск : Ураджай, 1988. – 216 с.

15. Рэкі, азёры і вадасховішчы Беларусі. – Мінск : БелЭн, 1979. – 216 с. – (Энцыклапедычна бібліятэчка «Беларусь»).
16. Блакітны скарб Беларусі: Рэкі, азёры, вадасховішчы / маст.: Ю. А. Тарэеў, У. І. Цярэнцьеў. – Мінск : БелЭн, 2007. – 480 с.
17. Геаграфія Брасцкай вобласці : дапам. для студэнтаў геаграф. спец. ВНУ / С. В. Арцеменка [і інш.] ; пад рэд. С. В. Арцеменкі, А. У. Грыбко. – Мінск : Выд. цэнтр БДУ, 2002. – 388 с.
18. Особо охраняемые природные территории Брестской области / под ред. Н. В. Михальчука, В. Т. Демянчика, А. В. Грибко. – Брест : Изд-во Лаврова, 1997. – 164 с.
19. Брестская область в цифрах. – Минск : Главное статистическое управление Брестской области, 2019. – 88 с.
20. Населённые места Российской империи в 500 и более жителей с указанием всего наличного в них населения и числа жителей преобладающих вероисповеданий, по данным первой всеобщей переписи населения 1897 года / предисл. : Н. Тройницкий. – СПб. : Типография «Общественная польза», 1905. – 120 с.
21. Chomsk. Mapa topograficzna. 1 : 100 000. – Warszawa : WIG, 1931. 1 m.
22. Motol. Mapa topograficzna. 1 : 100 000. – Warszawa : WIG, 1931. 1 m.
23. Bereza Kartuska. Mapa topograficzna. 1 : 100 000. – Warszawa : WIG, 1931. 1 m.

References

1. Yasinskij S. V. *Geoekologicheskij analiz antropogennyh vozdejstvij na vodosbory malyh rek* [Geoecological analysis of anthropogenic impacts on catchments of small rivers]. *Izvestiya AN = Bulletin of the Academy of Sciences* 2000, no. 4, pp. 74–82. (in Russian)
2. Muhina L. I. *Principy i metody tekhnologicheskoy ocenki prirodnih kompleksov* [Principles and methods of technological assessment of natural]. Moscow, 1973, 96 p. (in Russian)
3. Okoronko I. V. *Ocenka antropogennoj nagruzki na r. Pina s primeneniem GIS-tehnologij* [Assessment of anthropogenic load on the river Pina using GIS technologies]. *Vesnik Bresckaga universiteta = Bulletin of Brest University*. Brest, 2020, no. 1, pp. 112–122. (in Russian)
4. Volchek A. A., Okoronko I. V. *Ocenka antropogennoj preobrazovnosti vodosborov maloj reki (na primere reki Lesnoj)* [Assessment of anthropogenic transformation of catchments of a small river (on the example of the Lesnaya river)]. *Zemlya Belarusi = Land of Belarus*. Minsk, 2021, no. 1, pp. 51–59. (in Russian)
5. Bryuhanov A. Y., Kondratjev S. A., Oblomkova N. S., Ogluzdin A. S., Subbotin I. A. *Metodika opredeleniya biogennoj nagruzki na vodnye objekty ot sel'skohozyajstvennogo proizvodstva* [Methodology for determining the nutrient load on water bodies from agricultural production]. *Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva mekhanizirovannogo proizvodstva produkciyu rastenievodstva i zhivotnovodstva = Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products*, 2016, no. 89, pp. 175–183. (in Russian)
6. Yasinskij S. V., Venicianov E. V., Vishnevskaya I. A. *Diffuznoe zagryaznenie vodnyh objektov i ocenka vynosa biogennyh elementov pri razlichnyh scenariyah zemlepolzovaniya na vodosbore* [Diffuse pollution of water bodies and assessment of nutrient removal under different land use scenarios in the catchment]. *Vodnije resursy = Water resources*, 2019, vol. 46, no. 2, pp. 232–244. (in Russian)
7. Kondratjev S. A., Bryuhanov A. Y., Terekhov A. V. *Struktura poverhnosti vodosbora kak opredelyayushchij faktor biogennoj nagruzki na vodoem (po dannym matematicheskogo modelirovaniya)* [The structure of the catchment surface as a determining factor in the biogenic load on the reservoir (according to mathematical modeling)]. *Voprosy geografii = Geography issues*, 2018, no. 145, pp. 89–108. (in Russian)
8. Kondrat'ev S. A., Kazmina M. V., Shmakova M. V., Markova E. G. *Metod rascheta biogennoj nagruzki na vodnye objekty* [Method for calculating nutrient load on water bodies]. *Regionalnaya ekologiya = Regional ecology*, 2011, no. 3–4, pp. 50–59. (in Russian)
9. Yasinskij S. V., Kashutina E. A., Sidorova M. V., Narykov A. N. *Antropogennaya nagruzka na vodosbor i ee uchet pri ocenke vynosa biogennyh elementov v krupnyj vodnyj objekt (na primere Cheboksarskogo vodohranilishcha)* [Anthropogenic load on the catchment and its consideration when assessing the removal of nutrients into a large water body (by the example of the Cheboksary reservoir)]. *Sb. nauch. tr. Nizhnij Novgorod = Collection of scientific papers Nizhny Novgorod*. Moscow, 2019, pp. 487–491. (in Russian)
10. Ivanov A. A. *Ekologicheskaya ocenka vodosborov malyh rek (na primere Respubliki Marij El)*. *Nauchnoe izdanie* [Environmental assessment of catchments of small rivers (on the example of the Republic of Mari El)]. Yoshkar-Ola, 2007, 108 p. (in Russian)
11. Volchek A. A. [et al.]. *Reki Polesya* [Yaselda. Polesie rivers]. Minsk, 2017, 416 p. (in Russian)
12. Dys'ko N. A. [et al.]. *Blakitnaya kniga Belarusi: Encyklopedyya* [The Blue Book of Belarus: Encyclopedia]. Minsk, 1994, 415 p. (in Belarusian)
13. Volchek A. A., Kalinin M. Y. *Vodnye resursy Brestskoj oblasti* [Water resources of the Brest region]. Minsk, 2002, 440 p. (in Russian)
14. Yakushko O. F. [et al.]. *Ozera Belarusi* [Lakes of Belarus]. Minsk, 1988, 216 p. (in Russian)
15. *Reki, azyory i vadaskhovichy Belarusi* [Rivers, lakes and reservoirs of Belarus]. Minsk, 1979, 216 p. (in Belarusian)
16. Tareev Y. A., Terentyev Y. I. *Blakitny skarb Belarusi: Reki, azery, vadaskhovichy* [Blue treasure of Belarus: Rivers, lakes, reservoirs]. Minsk, 2007, 480 p. (in Belarusian)
17. Artemenko S. W. [et al.]. *Geografiya Bresckaj voblasci* [Geography of the Brest region]. Minsk, 2002, 388 p. (in Belarusian)

18. Michalhuk N. V. [et al.]. *Osobo ohranyaemye prirodnye territorii Brestskoj oblasti* [Specially protected natural areas of the Brest region]. Brest, 1997, 164 p. (in Russian)
19. *Brestskaya oblast v cifrah* [Brest region in figures]. Minsk, 2019, 88 p. (in Russian)
20. Trojnickij N. *Naselyonnye mesta Rossijskoj imperii v 500 i bolee zhitelej s ukazaniem vsego nalichnogo v nich naseleniya i chisla zhitelej preobladayushchih veroispovedanij, po dannym pervoj vseobshchej perepisi naseleniya 1897 goda* [Inhabited places of the Russian Empire of 500 or more inhabitants, indicating the total population in them and the number of inhabitants of prevailing religions, according to the first general population census of 1897]. Sankt-Peterburg, 1905, 120 p. (in Russian)
21. Chomsk. *Mapa topograficzna* [Chomsk. Topographic map]. 1 : 100 000. Warsaw, 1931. 1 m. (in Polish)
22. Motol. *Mapa topograficzna* [Motol. Topographic map]. 1 : 100 000. Warsaw, 1931. 1 m. (in Polish)
23. Bereza Kartuska. *Mapa topograficzna* [Bereza Kartuska. Topographic map]. 1 : 100 000. Warsaw, 1931. 1 m. (in Polish)

Информация об авторах

Волчек Александр Александрович – доктор географических наук, профессор, Брестский государственный технический университет (ул. Московская, 267, 224017, г. Брест, Беларусь). E-mail: volchak@tut.by

Окоронко Игорь Васильевич – старший преподаватель, Брестский государственный университет имени А. С. Пушкина (бульвар Космонавтов, 21, 224016, г. Брест, Беларусь). E-mail: okoronko2007@ya.ru

Information about the authors

Alexandr A. Volchak – D. Sc. (Geography), Professor, Brest State Technical University (267, Moskovskaya Str., 224017, Brest, Belarus). E-mail: volchak@tut.by

Ihar V. Akaronka – Senior Lecturer, Brest State University named after A. S. Pushkin (21, Kosmonavtov Boulevard, 224016, Brest, Belarus). E-mail: okoronko2007@ya.ru

БАССЕЙНОВЫЙ КРИТЕРИЙ ОРГАНИЗАЦИИ ПРИРОДНОГО КАРКАСА ПРИГОРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ (НА ПРИМЕРЕ МИНСКА)

М. И. Струк, С. Г. Живнач

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. Выполнена бассейновая дифференциация пригородной территории Минска. Выделены водо-сборные бассейны водохранилищ, используемых для водоснабжения города и рекреации городских жителей как имеющие приоритетное значение для принятия водоохраных мер.

Оценены ландшафтно-экологические условия выделенных бассейнов, определяющие специфику загрязнения рек, на которых построены водохранилища. Выявлены различия в хозяйственном освоении бассейнов. Установлено преобладающее значение сельского хозяйства как источника загрязнения вод.

Приведены результаты оценки химического загрязнения вод водохранилищ биогенными веществами и их ранжирование по его интенсивности, согласно которому они объединены в три группы, включающие водоемы с периодическим загрязнением (частота превышения ПДК – 10–30 %), водоемы с неслучайным загрязнением (30–50 %) и водоемы с устойчивым загрязнением (более 50 %). Сопоставление интенсивности загрязнения водохранилищ с лесистостью их водосборных бассейнов показало отсутствие зависимости между ними. На этом основании определена потребность повсеместного принятия дополнительных мер по формированию природных каркасов бассейнов, включая те из них, которые имеют высокую лесистость.

Ключевые слова: водосборный бассейн; водохранилища; природный каркас; пригородная территория; загрязнение вод; лесистость.

Для цитирования: Струк М. И., Живнач С. Г. Бассейновый критерий организации природного каркаса пригородной территории (на примере города Минска) // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 62–72.

THE CATCHMENT BASIN CRITERION FOR THE ORGANIZATION OF THE NATURAL FRAME OF THE SUBURBAN TERRITORY (ON THE EXAMPLE OF MINSK)

M. I. Struk, S. G. Zhivnach

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The catchment basin differentiation of the suburban territory of Minsk has been performed. The catchments of reservoirs used for the city's water supply and recreation of urban dwellers have been identified as a priority for water protection measures.

The landscape-ecological conditions of the identified basins, which determine the specificity of pollution of the rivers on which the reservoirs are built, have been evaluated. The differences in the economic development of the basins are revealed. The predominant importance of agriculture as a source of water pollution has been established.

An assessment of the chemical pollution of reservoir waters with biogenic substances and their ranking according to its intensity was carried out, according to which they are combined into three groups, including reservoirs with periodic pollution (frequency of exceeding the MPC – 10–30 %), reservoirs with non-accidental pollution (30–50 %) and reservoirs with stable pollution (50 %). Comparison of the intensity of pollution of reservoirs with the forest cover of their drainage basins is carried out. It showed no relationship between them. On this basis, the need was identified for the widespread adoption of additional measures to form the natural frameworks of the basins, including those with high forest cover.

Keywords: catchment basin; reservoirs; natural frame; suburban area; water pollution; forest cover.

For citation: Struk M. I., Zhivnach S. G. The catchment basin criterion for the organization of the natural frame of the suburban territory (on the example of Minsk). *Nature Management*, 2021, no 1, pp. 62–72.

Введение. Природные комплексы, находящиеся в естественном или близком к таковому состоянию, относятся к числу ключевых факторов экологической стабилизации территории. При этом существенное значение имеют не только их состав и занимаемая площадь, но и размещение. Адекватная пространственная организация природных комплексов способна значительно повысить их стабилизирующую роль. Отсюда внимание к исследованиям по ее обоснованию.

Одним из результатов подобного рода исследований явилась идея обеспечения пространственной взаимосвязи природных комплексов территории, их объединения в своего рода каркас. Данная идея получила конструктивное выражение посредством внедрения в территориальное планирование. В целях ее развития в 1980–90-е годы была выполнена серия работ, посвященных объяснению содержания понятия природного каркаса как формы пространственной организации природных комплексов, обоснованию его функций и структуры [1–3 и др.]. В составе этих работ прослеживается самостоятельное направление, посвященное городам [4–7 и др.].

В Беларуси планировочные предпосылки организации природного каркаса города впервые были созданы в Генеральном плане г. Минска 1980 года, в котором предусматривалось формирование в его пределах целостного водно-зеленого диаметра, образованного р. Свислочью с построенными на ней водохранилищами, и аналогичного кольца, идущего параллельно кольцевой дороге, на основе Слепянской и Лошицкой водных систем [8]. Это решение получило закрепление и дальнейшую детализацию в последующем территориальном планировании города [9].

Проводимые исследования природного каркаса Минска и его планирование ограничиваются, как правило, собственно городской территорией. Между тем подобный подход недостаточен для обеспечения экологических интересов города. На состояние городской среды значительное влияние оказывают природные комплексы пригородной территории. На данной территории также размещаются многочисленные объекты, экологическое состояние которых имеет жизненно важное значение для функционирования города. К таковым относятся, в частности, водно-лесные экосистемы, на базе которых созданы зоны массового отдыха и оздоровления городского населения на природе.

Обеспечение благоприятного экологического состояния указанных объектов обуславливает потребность формирования на пригородной территории самостоятельного природного каркаса. Применительно к водным объектам данное состояние определяется экологическими свойствами их водохранилищ. Отсюда необходимость учета бассейновой организации пригородной территории при организации ее природного каркаса.

Указанное требование находило свое отражение в выполненных ранее исследованиях пригородной территории экологической направленности [10–12]. Вместе с тем оно нуждается в дальнейшей проработке, особенно методического характера.

Цель исследования – разработать методическое обоснование учета бассейновой дифференциации пригородной территории для организации ее природного каркаса.

Задачи исследования:

- проведение бассейновой дифференциации пригородной территории и типологии бассейнов по выполняемой ими роли в удовлетворении потребностей города и подверженности его влиянию;
- оценка ландшафтно-экологических условий бассейнов, определяющих особенности загрязнения пригородных водоемов;
- оценка водоохранной эффективности существующей организации лесов в бассейнах пригородных и определение потребности формирования природных каркасов в их пределах.

Материалы и методы исследования. Фактическую основу исследования составил набор картографических, статистических, территориально-планировочных материалов, а также данных собственных полевых исследований авторов. Их анализ и обработка проводились с использованием стандартных компьютерных программ, в том числе позволяющих выполнить статистическую обработку информации, и специализированных картографических программ: Q-GIS, MapInfo.

Для картографирования бассейнов, оценки структуры земель, площади отдельных видов угодий использовались топографические карты масштаба 1 : 200 000 и 1 : 100 000. Уточнение исходной картографической информации проводилось с помощью материалов радарной топографической съемки территории земного шара – shuttle radar topographic mission (SRTM). Для дополнения характеристики современного состояния водосборных бассейнов в зависимости от их использования применялся набор геоданных о земном покрове Global Land Cover Map – материалы научно-исследовательского проекта Climate Change Initiative (CCI), который осуществляется European Space Agency's (ESA).

Гидрохимические исследования опирались на выполненный авторами данной статьи отбор проб из водохранилищ и рек, на которых они построены, по сезонам года на протяжении 2009–2020 гг. Последующий анализ водных проб выполнялся с применением стандартных методов определения содержания химических веществ в поверхностных водах.

Результаты исследования.

Бассейновая дифференциация пригородной территории Минска и типология бассейнов. Для проведения исследования пригородной территории конкретного города, в данном случае Минска, необходимо, прежде всего, определить ее границы. В качестве их исходной основы, очевидно, следует принять границы выделяемых вокруг города, согласно градостроительным нормам, двух зон: пригородной и зеленой. Затем они могут корректироваться в зависимости от природно-хозяйственных условий территории.

Пригородная зона Минска, согласно проекту ее планировки, выделена вокруг города на удалении примерно 60 км от его границ [13]. В основу такого выделения положена теснота трудовых, производственных, рекреационных и иных связей города с окружающими территориями.

Зеленая зона Минска распространяется в радиусе около 50–60 км от города. Находящиеся в ее пределах леса имеют не эксплуатационное, а экологическое назначение. Границы зеленой и пригородной зон не совпадают. В некоторых местах первые из них находятся на большем удалении от города, в других – наоборот. Также нет совпадения с границами административных районов, что осложняет управление этими зонами.

Исходные границы рассматриваемой пригородной территории, на которой должен размещаться ее природный каркас, определены по максимальному удалению от города границ обеих планировочных зон – пригородной и зеленой. В этом случае достигается наиболее полное обеспечение его экологических интересов.

На пригородной территории Минска, как и любого иного крупнейшего города, размещаются водоемы, используемые для удовлетворения его потребностей, включающих, во-первых, водоснабжение города, во-вторых, отдых и оздоровление проживающих в нем жителей. В силу выполнения данными водоемами отмеченных функций для такого крупного потребителя, они отличаются очень высокой интенсивностью использования, поэтому обеспечение должного качества вод этих водоемов должно получить приоритетное значение при планировании водоохранных мер. Составной частью таких мер выступает формирование в их водосборных бассейнах соответствующих природных каркасов, способствующих оптимизации водного режима данных водоемов и предотвращению их загрязнения.

Гидографическая сеть пригородной территории Минска и ее бассейновая организация определяются природно-ландшафтным строением данной территории. Ее центральную часть занимает ландшафтный район холмисто-моренно-эролионных и камово-моренно-эрэзационных возвышенностей, на который приходятся самые высокие в Беларуси гипсометрические отметки, превышающие 300 м. По этому району проходит водораздельная линия бассейнов двух морей – Балтийского и Черного.

Вследствие отмеченного физико-географического положения рассматриваемой пригородной территории в ее пределах не имеется больших водоемов и водотоков. Протекающие здесь реки представлены лишь верховьями. В своем естественном состоянии они не пригодны для удовлетворения водохозяйственных и рекреационных нужд такого крупного потребителя, как Минск.

Преодоление подобного рода «недостатка» в процессе городского развития и увеличения потребностей города в водных и природных рекреационных ресурсах осуществлялось путем строительства водохранилищ. Началось оно в 1940-е годы (Комсомольское озеро в черте города), затем было продолжено в 1960–80-е годы. В результате была построена цепочка искусственных водоемов внутри города на р. Свислочи и ее притоках, создано водное кольцо на пригородной территории, образованное водохранилищами на таких реках, как Свислочь, Вяча, Усяжа, Волма, Тростянка, Птичъ.

В 1975 г. для пополнения водных ресурсов города была введена в действие Вилейско-Минская водная система. Ее основными элементами явились Вилейское водохранилище и канал, по которому стала осуществляться межбассейновая переброска аккумулируемой в этом водохранилище части стока р. Вилии в р. Свислочь и некоторые другие городские и пригородные водоемы, используемые для водоснабжения города и рекреации городских жителей.

Вилейское водохранилище вместе с упоминавшимися водоемами водного кольца пригородной территории выступают базовыми объектами для созданных в ее пределах зон массового отдыха и оздоровления населения. Наибольшее количество рекреационно-оздоровительных учреждений, как и самая высокая концентрация неорганизованных отдыхающих, сосредоточены вокруг Заславского водохранилища и примыкающих к нему водохранилищ Криница и Дрозды (табл. 1).

На перспективу, в связи с развитием на пригородной территории Минска городов-спутников, можно прогнозировать повышение рекреационно-оздоровительного использования расположенных здесь водохранилищ. В первую очередь это относится к водохранилищам Петровичское, куда увеличится приток отдыхающих из города-спутника Руденска, Птичъ – г. Фаниполь, Заславское – г. Заславль.

Высокая интенсивность использования водохранилищ рассматриваемой пригородной территории обуславливает потребность придания им приоритетного значения при планировании водоохраных мер. Соответственно, при проведении бассейновой дифференциации данной территории следует отдельно выделить водосборные бассейны этих водоемов, от экологического состояния которых зависит качество их вод.

Реки, на которых построены пригородные водохранилища Минска, относятся преимущественно к категории малых и имеют сравнительно небольшие по площади водосборные бассейны, которые полностью входят в планировочные границы пригородной и зеленой зон. Исключение составляет Вилейское водохранилище. Часть площади его бассейна выходит за эти границы. Поэтому для обеспечения целостного рассмотрения данного бассейна отмеченная часть также включена в состав исследуемой пригородной территории.

Таблица 1. Количество рекреационно-оздоровительных объектов и численность неорганизованных отдыхающих в зонах отдыха, созданных на базе водохранилищ пригородной территории г. Минска (по данным работ [14, 15])

Table 1. The number of recreational facilities and the number of unorganized vacationers in recreation areas created on the basis of reservoirs in the suburban area of Minsk (according to works [14, 15])

Водохранилище	Река	Площадь		Количество рекреационно-оздоровительных объектов, ед.	Численность неорганизованных отдыхающих, тыс. человек
		водохранища, га	водосбора, км ²		
Вилейское	Вилия	6460	4120	19	20
Заславское	Свислочь	2560	562	16	30
Криница	Свислочь	96	610	8	10
Дрозды	Свислочь	210	649	4	15
Вяча	Вяча	168	108	5	20
Дубровское	Усяжа	345	201	8	15
Петровичское	Волма	480	214	10	15
Стайки	Тростянка	10	86	1	—
Птичье	Птичье	85	143	6	10

Исходя из роли водосборных бассейнов пригородной территории Минска в обеспечении водно-ресурсных и рекреационных потребностей города и подверженности его загрязняющему влиянию, в ее пределах выделяются следующие их типы: 1) бассейн Вилейского водохранилища как водоема-донора водных ресурсов для города; 2) бассейны водохранилищ, используемых для массового отдыха и оздоровления городского населения (приведенные выше водоемы пригородного водного кольца); 3) бассейны рек, подверженных загрязняющему влиянию города (р. Свислочь); 4) бассейны рек, не используемых для нужд города и не подверженных его загрязняющему влиянию (рис. 1).

Наиболее значимые для функционирования города водосборные бассейны приходятся на северную часть пригородной территории. Бассейны водохранилищ, используемых для массового отдыха городского населения, занимают сравнительно небольшую площадь. Тем самым облегчаются возможности проведения на них водоохранных мер.

Ландшафтно-экологические условия водосборных бассейнов пригородных водохранилищ. Определяющим внешним фактором формирования качества вод водохранилищ является экологическое состояние их водосборных бассейнов. Оно зависит от наличия и размещения в пределах бассейнов объектов, выступающих источниками воздействий на водные ресурсы, с одной стороны, и объектов экологической стабилизации, с другой стороны. Загрязняющее влияние источников воздействий на реку и построенное на ней водохранилище может осуществляться путем сбросов в них сточных вод, площадного смыва загрязняющих веществ, а также их поступления с подземными водами.

Существенным фактором, определяющим экологическое состояние водосборных бассейнов, является их природно-ландшафтное строение. Оно оказывает влияние на характер и интенсивность хозяйственного освоения территории, а также распределение на ней источников загрязняющих веществ, путем миграции и каналы поступления в водоемы.

Указанные пути и каналы в значительной мере зависят от высотного положения ландшафтов. Выполненные расчеты потенциального плоского смыва применительно к ландшафтам различного высотного уровня рассматриваемой пригородной территории показали, что для ландшафтов возвышенностей его величина составляет 3,7–3,8 т/га, для средневысотных ландшафтов она почти в 2 раза ниже – 1,7, для ландшафтов низин данная величина самая низкая – 1,4 т/га. Для

характеристики естественной защищенности грунтовых вод проведено сопоставление ландшафтной карты с картой защищенности этих вод [16]. В результате установлено снижение степени защищенности от возвышенных и средневысотных к низинным ландшафтам.

Следовательно, ландшафты возвышенностей в большей степени подвержены почвенной эрозии, но имеют повышенную защищенность подземных вод. С занимаемых ими площадей вероятность поступления загрязняющих веществ в водоемы посредством поверхностного смыва с продуктами эрозии, очевидно, будет выше. Ландшафты низин, наоборот, являются устойчивыми к почвенному смыву, но характеризуются низкой защищенностью подземных вод. С их территории более значимым каналом загрязнения водоемов должен выступить подземный сток. На средневысотные ландшафты приходится промежуточное положение.

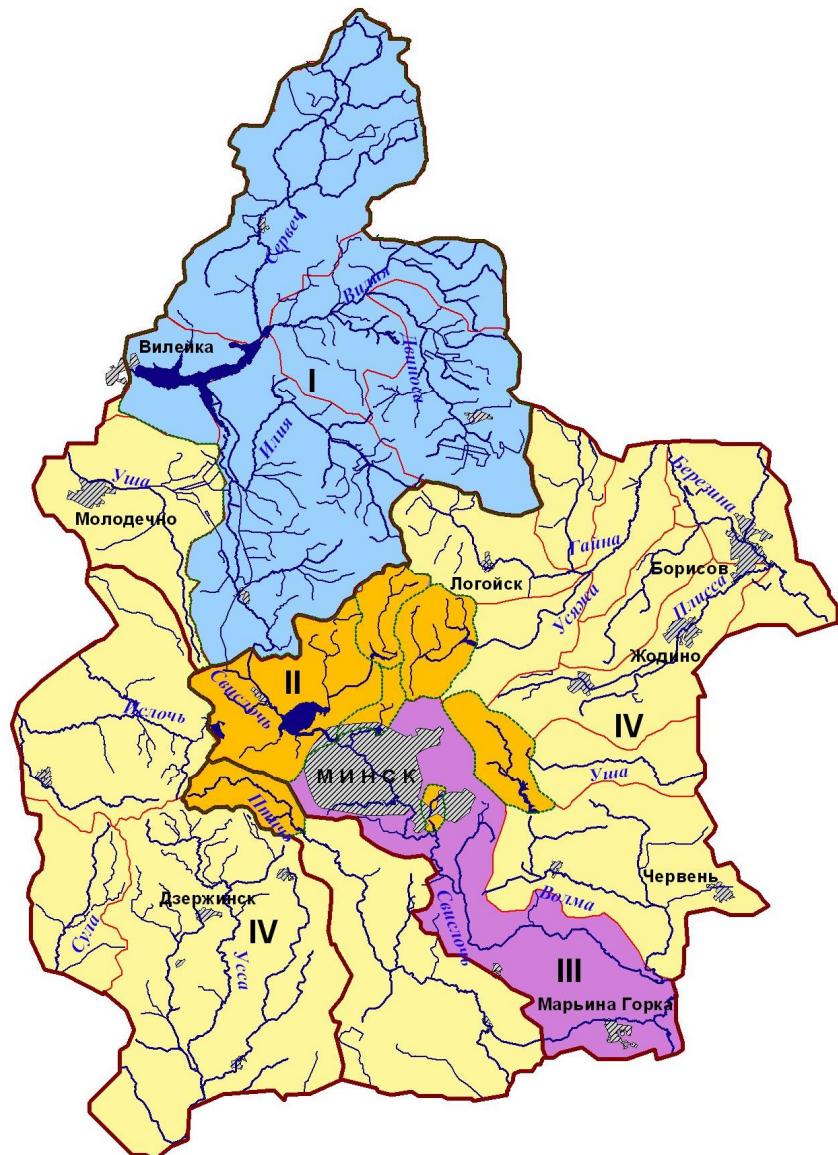


Рис. 1. Водосборные бассейны пригородной территории г. Минска:
I – бассейн Вилейского водохранилища; II – бассейны водохранилищ, используемых для массового отдыха городского населения; III – бассейны рек, подверженных загрязняющему влиянию города; IV – бассейны рек, не используемых для нужд города и не подверженных его загрязняющему влиянию

Fig. 1. Catchment basins of the suburban area of Minsk:

I – basin of the Vileika reservoir; II – basins of reservoirs used for mass recreation of the urban population; III – basins of rivers exposed to the city's pollution; IV – river basins that are not used for the needs of the city and are not subject to its polluting influence

Для оценки ландшафтно-экологических условий водосборных бассейнов рассматриваемых пригородных водохранилищ по каждому из них выполнены расчеты ландшафтной структуры, лесистости и доли сельскохозяйственных угодий (табл. 2). Ландшафтная структура этих бассейнов существенно различается. В пределах водосборных бассейнов водохранилищ Заславское, Криница, Дрозды, Вяча, Дубровенское, Птич преобладают ландшафты возвышенностей (3/4 занимаемой площади и более), причем для двух последних наибольшая доля приходится на таковые с покровом лёссовидных суглинков, которые характеризуются самым высоким плодородием почв.

В ландшафтной структуре водосборных бассейнов водохранилищ Вилейского и Стайки широко распространены средневысотные ландшафты (более половины площади), также их доля довольно высока в бассейне водохранилища Петровичское. Низинные ландшафты повсеместно встречаются реже. Более высокой их долей (около 1/5) выделяются бассейны водохранилищ Вилейское и Вяча.

Таблица 2. Ландшафтная структура, лесистость и сельскохозяйственная освоенность бассейнов пригородных водохранилищ г. Минска, %

Table 2. Landscape structure, forest cover and agricultural development of the basins of suburban reservoirs of Minsk, %

Водохранилище	Ландшафты			Лесистость, %	Доля сельхозугодий, %
	возвышен- ностей	средне- высотные	низинные		
Заславское	74	15	11	28	52
Криница				28	53
Дрозды				28	50
Петровичское	53	38	9	63	26
Птич	93	1	6	17	69
Стайки	15	73	12	22	38
Вилейское	21	58	21	51	35
Дубровское	91	–	9	28	59
Вяча	79	–	21	62	24
<i>В среднем:</i>	<i>36</i>	<i>46</i>	<i>18</i>	<i>47</i>	<i>44</i>

Из приведенной ландшафтной структуры водосборных бассейнов пригородных водохранилищ следует, что для большей их части, где распространены в основном ландшафты возвышенностей, повышенное значение в поступлении загрязняющих веществ будет иметь поверхностный сток. При этом его опасность будет зависеть от проявления эрозионных процессов.

Среди исследуемых водохранилищ наиболее подвержены эрозии водосборные бассейны, находящиеся в пределах эрозионно опасных холмисто-моренно-эрэзионных ландшафтов возвышенностей (Заславское, Криница, Дрозды, Вяча, Дубровское). Меньшей эрозионной опасностью отличаются водосборные бассейны водохранилищ, расположенных в пределах вторичных водно-ледниковых, вторично-моренных и камово-моренно-эрэзионных ландшафтов (Вилейское, Петровичское, Стайки).

На всей пригородной территории, занятой бассейнами рек, на которых построены водохранилища (за исключением р. Тростянки), не имеется больших городов и источников отведения сточных вод. Основную опасность загрязнения для большинства из них представляют сельскохозяйственные угодья, сельские населенные пункты, а также дороги. Ведущим природным водорегулирующим и водоохранным объектом являются леса.

Самой высокой степенью сельскохозяйственного освоения и низкой лесистостью выделяются водосборные бассейны с преобладанием ландшафтов возвышенностей, у которых покровные отложения представлены лёссовидными суглинками; доля сельскохозяйственных угодий здесь превышает 50 %, а лесов составляет менее 30 % (Заславское, Криница, Дрозды, Птич, Дубровское). Минимальные показатели сельскохозяйственных земель (24–26 %) и максимальные показатели лесов (62–63 %) отмечаются также у бассейнов с преимущественным распространением ландшафтов возвышенностей, но в отложениях которых лёссовидные суглинки практически не встречаются (Вяча, Петровичское).

С лесистостью бассейнов согласуется степень их застройки. Бассейны с низкой лесистостью характеризуются более высокой долей застроенных земель. Особенно выделяется в данном отношении бассейн водохранилища Стайки, у которого застроено 30 % площади, в том числе 10 % приходится на городские земли Минска.

Наиболее неблагоприятным для качества вод водоемов является сочетание низкой лесистости их бассейнов с высокой эрозионной опасностью. В этом случае повышается угроза загрязнения и заилиения водоемов почвенными частицами.

С учетом рассмотренных факторов можно провести группировку водосборных бассейнов пригородных водохранилищ по экологическому состоянию. Наиболее напряженным оно будет у бассейнов водохранилищ Стайки, Птич и Дубровское. Для первого из них факторами такой напряженности выступят низкая лесистость, высокая застройка, а также наличие на его территории полигона складирования городских отходов Тростенец, который выступает локальным источником загрязнения вод. Для двух других – низкая лесистость в сочетании с высокой эрозионной опасностью.

Менее напряженным экологическим состоянием будут характеризоваться бассейны водохранилищ, расположенных на р. Свисочи, – Заславское, Криница, Дрозды. Они отличаются умеренными показателями лесистости и эрозионной опасности. Сравнительно благоприятным будет экологическое состояние бассейнов водохранилищ Вилейское, Вяча, Петровичское за счет их высокой лесистости и низкого сельскохозяйственного использования.

Оценка водоохранной эффективности современной организации природных комплексов водосборных бассейнов пригородных водохранилищ. Приведенная выше характеристика ландшафтно-экологических условий водосборных бассейнов отражает предпосылки загрязнения водохранилищ. Показатель лесистости этих бассейнов как основной природный фактор их экологической стабилизации, очевидно, может использоваться для общей оценки природного равновесия на занимаемых ими территориях.

В то же время применительно к выполнению водоохранной функции отмеченный показатель следует рассматривать лишь как вспомогательный. Основное значение в данном случае имеет экологическое состояние водоемов. В случае, когда отсутствуют прямые сбросы в них сточных вод, наличие загрязнения водоемов будет свидетельствовать о том, что организация лесов в пределах их водосборных бассейнов недостаточно эффективна, отсутствие загрязнения, наоборот, выступит признаком благополучного положения в данном отношении.

На пригородной территории Минска преобладающее значение имеют диффузные источники загрязнения вод, связанные с сельским хозяйством. Поэтому расположенные в водосборных бассейнах водохранилищ леса играют исключительно важную роль в обеспечении качества их вод.

Для установления водоохранной эффективности указанных лесов выполнена оценка загрязнения вод пригородных водоемов в сопоставлении с лесистостью их водосборных бассейнов. Показателями загрязнения приняты биогенные вещества – соединения азота и фосфора, которые отражают специфику воздействий такого источника, как сельское хозяйство.

Формирование качества вод водохранилищ определяется, во-первых, составом поступающих в них речных вод, во-вторых, физико-химическими и биологическими процессами, происходящими внутри самих водохранилищ. Исследуемую водоохранную эффективность лесов, расположенных в их водосборных бассейнах, очевидно, будут отражать воды речных створов, приуроченных к местам впадения рек в водохранилища. Соответственно, для ее оценки рассматривались показатели содержания биогенных веществ в водах, как этих створов, так и непосредственно водохранилищ. Всего из каждого водоема и впадающей в него реки было отобрано и проанализировано от 21 (водохранилища Дубровское и Волма) до 38 (водохранилище Вилейское) проб.

Рассчитанные средние для всех водоемов концентрации каждого из оцениваемых веществ – нитритов, азота аммонийного, нитратов, фосфора фосфатов – показали, что их величины по каждому из этих веществ в речных створах выше, нежели в самих водохранилищах (рис. 2). По трем веществам – нитритам, азоту аммонийному, фосфору фосфатов – данное превышение составляет примерно 2,0 раза, по нитратам – 1,4 раза. Подобные соотношения показателей свидетельствуют о решающем влиянии водосборных бассейнов на содержание биогенных элементов в водах водохранилищ.

Для оценки загрязнения вод самих водохранилищ определялась повторяемость превышений ПДК по всем рассматриваемым веществам. Согласно полученным данным, в их составе основную роль играют соединения азота аммонийного и нитритного (табл. 3). По обоим из них частота превышения ПДК оказалась примерно одинаковой, составив 26 и 27 % соответственно. Загрязнение фосфором фиксировалось почти в 3 раза реже.

Суммарная доля всех водных проб, в которых отмечались превышения ПДК хотя бы по одному из биогенных элементов, является довольно высокой, составляя 45 % от их общего количества. Применительно к отдельным водоемам имеют место существенные различия по данному показателю, что позволяет провести их соответствующее ранжирование.

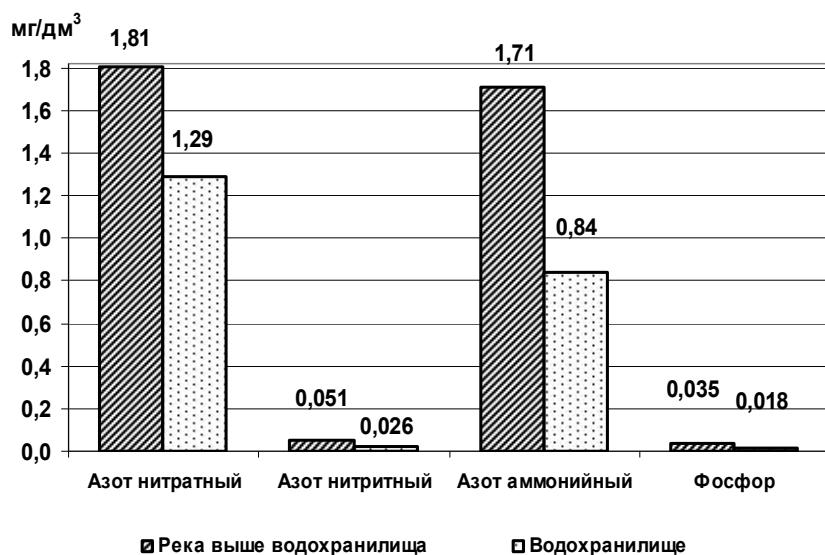


Рис. 2. Среднегодовые концентрации азота нитратного, азота нитритного, азота аммонийного и фосфора фосфатов в пригородных водохранилищах Минска и реках, на которых они построены, 2010–2020 гг.

Fig. 2. Average annual concentrations of nitrate nitrogen, nitrite nitrogen, ammonium nitrogen and phosphorus phosphates in the suburban reservoirs of Minsk and the rivers on which they are built, 2010–2020

Таблица 3. Лесистость водосборных бассейнов и частота превышения ПДК биогенных веществ в воде пригородных водохранилищ г. Минска, %

Table 3. Forest cover of Catchment basins and the frequency of exceeding the MPC of nutrients in the water of suburban reservoirs of Minsk, %

Водохранилище	Лесистость бассейна	Азот нитритный	Азот аммонийный	Фосфор фосфатов	Итого выше ПДК
Заславское	28	15	12	15	35
Криница	28	4	8	8	19
Дрозды	28	8	—	12	19
Петровичское	63	33	—	19	48
Птичье	17	8	16	20	44
Стайки	22	86	100	—	100
Вилейское	51	14	22	3	33
Дубровское	28	10	5	10	24
Вяча	62	14	9	14	23
<i>Всего:</i>	<i>47</i>	<i>27</i>	<i>26</i>	<i>10</i>	<i>45</i>

В порядке повышения остроты проблемы загрязнения вод пригородные водохранилища распределяются следующим образом:

- водоемы с периодическим загрязнением (частота превышения ПДК – 10–30 %): Криница, Дрозды, Дубровенское, Вяча;
- водоемы с неслучайным загрязнением (частота превышения ПДК – 30–50 %): Заславское, Петровичское, Птичье, Вилейское;
- водоемы с устойчивым загрязнением (частота превышения ПДК – более 50 %): Стайки.

Данное ранжирование водохранилищ по уровню биогенного загрязнения вод не совпадает с приведенной выше группировкой их водосборных бассейнов по экологическому состоянию, в том числе степени лесистости. В последнем случае можно выделить такие их группы, как: 1) водоемы

с высокой лесистостью бассейнов (свыше 50 %): Петровичское, Вяча, Вилейское; 2) водоемы с низкой лесистостью бассейнов (менее 30 %): все остальные.

Несовпадение группировок водохранилищ по частоте загрязнения вод, с одной стороны, и лесистости их водосборных бассейнов, с другой стороны, свидетельствует о том, что такой водоохраняющий фактор, как высокая залесенность бассейна не является достаточным условием обеспечения должного качества вод. Например, повторяемость превышения ПДК в воде водохранилища Петровичское, имеющего самую большую лесистость водосборного бассейна – 63 %, оказалось в 2 раза выше, нежели у водохранилища Дубровское с низкой лесистостью – 28 %.

Одна из причин указанного различия заключается, по-видимому, в размещении лесов. В нынешнем состоянии оно не обеспечивает достаточного перекрытия каналов поступления биогенных веществ в реки и построенные на них водохранилища.

В целом, полученные оценки качества вод пригородных водохранилищ свидетельствуют о по-всеместной недостаточной водоохранной эффективности существующей организации лесов в их водосборных бассейнах, в том числе имеющих высокую лесистость. Из этого следует необходимости такого же по-всеместного принятия дополнительных мер по формированию соответствующих бассейновых природных каркасов.

Вместе с тем подобного рода меры не должны носить исключительный характер. Их следует совмещать с внедрением экологически приемлемых технологий природопользования (внесения удобрений, предотвращения почвенной эрозии и др.), улучшения санитарного состояния территорий, постановки барьеров вокруг источников загрязнения.

Выходы.

1. Бассейновая дифференциация пригородной территории крупнейшего города должна предусматривать выделение бассейнов тех водоемов, которые обеспечивают удовлетворение его водохозяйственных и рекреационных потребностей, что является основанием для придания им приоритетного значения при планировании водоохранных мер. По отношению к Минску это бассейн Вилейского водохранилища и группы водохранилищ, построенных вблизи города на малых реках. Данные водоемы следует рассматривать как ядра природного каркаса пригородной территории.

2. Экологическое состояние рассматриваемых водосборных бассейнов, оказывающее влияние на качество вод водохранилищ, определяется их природно-ландшафтным строением. Большой степенью хозяйственного освоения и меньшей сохранностью природных угодий отличаются бассейны, занятые ландшафтами возвышенностей с лессовыми покровными отложениями, которые характеризуются высоким плодородием почв. Главным источником загрязнения вод выступает сельское хозяйство.

3. Основным критерием водоохранной эффективности организации лесов в водосборных бассейнах водохранилищ следует принять качество их вод. Все пригородные водохранилища Минска подвержены биогенному загрязнению, интенсивность которого не зависит от лесистости их водосборных бассейнов, что, во-первых, отражает более высокую значимость пространственной организации лесов, нежели их площади в пределах этих бассейнов, во-вторых, обуславливает потребность по-всеместного принятия мер по формированию бассейновых природных каркасов в сочетании с совершенствованием применяемых технологий природопользования.

Список использованных источников

1. Дьяконов, К. Н. Экологическое проектирование и экспертиза / К. Н. Дьяконов, А. В. Дончева. – М. : Аспект Пресс, 2002. – 384 с.
2. Мирзеханова, З. Г. Экологический каркас территории: назначение, содержание, пути реализации / З. Г. Мирзеханова // Проблемы региональной экологии. – 2000. – № 4. – С. 42–55.
3. Реймерс, Н. Ф. Природопользование : словарь-справочник / Н. Ф. Реймерс. – М. : Мысль, 1990. – 637 с.
4. Вергунов, А. П. Архитектурно-планировочные принципы формирования природных комплексов Москвы и Московской агломерации / А. П. Вергунов // Природные комплексы в архитектурно-планировочной структуре Москвы и Московской агломерации. – М., 1978. – С. 6–40.
5. Владимиров, В. В. Город и ландшафт / В. В. Владимиров, Е. М. Микулина, З. Н. Яргина. – М. : Мысль, 1986. – 238 с.
6. Колбовский, Е. Ю. Городской ландшафт и конструирование экологического каркаса города / Е. Ю. Колбовский // Инженерная география. Экология урбанизированных территорий : докл. Междунар. конф. – Ярославль, 1999. – С. 78–83.
7. Краснощекова, Н. С. Формирование природного каркаса в генеральных планах городов / Н. С. Краснощекова. – М. : Архитектура, 2010. – 184 с.

8. Градостроительные средства оздоровления окружающей среды в Белорусской ССР / А. В. Ершов [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1987. – 224 с.
9. Природно-экологический каркас как основа зеленой инфраструктуры урбанизированной территории / Л. А. Кравчук [и др.] // Эколого-географические проблемы перехода к зеленой экономике в странах и регионах СНГ / редкол. : В. С. Хомич (гл. ред.), В. Ф. Логинов, Е. В. Санец. – Минск : СтройМедиаПроект, 2019. – С. 116–131.
10. Струк, М. И. Принципиальная схема организации природного каркаса крупного города / М. И. Струк // Актуальные проблемы геоэкологии и ландшафтования : сб. науч. ст. – Минск, 2016. – Вып. 3. – С. 88–91.
11. Струк, М. И. Методика эколого-географического обоснования организации внешнего природного каркаса города / М. И. Струк, С. Г. Живнач // Природопользование. – Минск, 2016. – Вып. 30. – С. 86–95.
12. Струк, М. И. Ландшафтно-экологическое районирование пригородной территории Минска / М. И. Струк, С. Г. Живнач // Современное ландшафтно-экологическое состояние и проблемы оптимизации природной среды регионов : материалы XIII Междунар. ландшафтной конф., посвящ. столетию со дня рожд. Ф. Н. Милькова, Воронеж, 14–17 мая 2018 г. : в 2 т. / ред. : В. Б. Михно [и др.]. – Воронеж : ИСТОКИ, 2018. – Т. 1. – С. 436–438.
13. Бутримович, Т. Схема планировки пригородной зоны города Минска / Т. Бутримович // Архитектура и строительство. – 2008. – № 11. – С. 12–20.
14. Водные объекты Республики Беларусь : справочник [Электронный ресурс] / Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь. РУП ЦНИИКИВР. – Минск, 2010. – Режим доступа: http://www.cricuwr.by/static/INVENT_VO/FrontPage.htm. – Дата доступа: 25.03.2021.
15. Туристическая инфраструктура Минской области. Минский областной исполнительный комитет [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.minsk-region.gov.by/turizm-i-otdykh/turisticheskaya-infrastruktura203/>. – Дата доступа: 25.03.2021.
16. Авхимович, А. Н. Оценка защищенности подземных вод Минской агломерации / А. Н. Авхимович, О. В. Васнева // Літасфера. – 2013. – № 2 (39). – С. 101–106.

References

1. D'yakonov K. N., Doncheva A. V. *Ekologicheskoye proyektirovaniye i ekspertiza* [Environmental planning and expertise]. Moscow, 2002, 384 p. (in Russian)
2. Mirzehhanova Z. G. *Ekologicheskiy karkas territorii: naznachenie, soderzhanie, puti realizacii* [Ecological framework of the territory: purpose, content, ways of implementation] *Problemy regional'noj ekologii = Regional ecology problems*, 2000, no. 4, pp. 42–55. (in Russian)
3. Reymers N. F. *Prirodopol'zovanie: slovar'-spravochnik* [Nature management: dictionary-reference]. Moscow, 1990, 637 p. (in Russian)
4. Vergunov A. P. *Arhitekturno-planirovochnye principy formirovaniya prirodnih kompleksov Moskvy i Moskovskoj aglomeracii* [Architectural and planning principles for the formation of natural complexes in Moscow and the Moscow agglomeration]. *Prirodnye kompleksy v arhitekturno-planirovochnoj strukture Moskvy i Moskovskoj aglomeracii* [Natural complexes in the architectural and planning structure of Moscow and the Moscow agglomeration]. 1978, pp. 6–40. (in Russian)
5. Vladimirov V. V., Mikulina E. M., Yargina Z. N. *Gorod i landshaft* [City and landscape]. Moscow, 1986, 238 p. (in Russian)
6. Kolbovskij E. Yu. *Gorodskoj landshaft i konstruirovaniye ekologicheskogo karkasa goroda* [Urban landscape and construction of the ecological framework of the city]. *Doklady mezhdunarodnoj konferencii «Inzhenernaya geografiya. Ekologiya urbanizirovannyh territorij»* [Proc. of the Int. conf. "Engineering geography. Ecology of urbanized territories"]. Yaroslavl', 1999, pp. 78–83. (in Russian)
7. Krasnoshchekova N. S. *Formirovanie prirodnogo karkasa v general'nyh planakh gorodov* [Formation of the natural framework in the general plans of cities]. Moscow, 2010, 184 p. (in Russian)
8. Yershov A. V., Rebenok L. V., Dyskin B. M., Ajsina V. I. *Gradostroitel'nye sredstva ozdorovleniya okruzhayushchej sredy v Belorusskoj SSR* [Urban planning means of improving the environment in the Belorussian SSR]. Minsk, 1987, 224 p. (in Russian)
9. Kravchuk L. A., Khomich V. S., Struk M. I., Sanec E. V., Ovcharova E. P., Zhivnach S. G., Romankevich Yu. A. *Prirodno-ekologicheskiy karkas kak osnova zelenoy infrastruktury urbanizirovannoy territorii* [Natural and ecological framework as the basis for the green infrastructure of an urbanized area]. *Ekologo-geograficheskie problemy perekhoda k zelenoy ekonomike v stranah i regionah SNG* [Ecological and geographical problems of the transition to a green economy in the countries and regions of the CIS]. Minsk, 2019, pp. 116–131. (in Russian)
10. Struk M. I. *Principial'naya skhema organizacii prirodnogo karkasa krupnogo goroda* [Principal Scheme of the organization of the natural frame of a large city] *Aktual'nye problemy geoekologii i landshaftovedeniya = Actual problems of geoecology and landscape science*, Minsk, 2016, issue 3, pp. 88–91. (in Russian)
11. Struk M. I., Zhivnach S. G. *Metodika ekologo-geograficheskogo obosnovaniya organizacii vneshnego prirodnogo karkasa goroda* [Methods of ecological-geographical substantiation of the organization of the external natural frame of the city]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, Minsk, 2016, issue 3, pp. 86–95. (in Russian)
12. Struk M. I., Zhivnach S. G. *Landshaftno-ekologicheskoe rayonirovanie prigorodnoy territorii Minska* [Landscape and ecological zoning of the suburban area of Minsk]. *Materialy XIII Mezhdunarodnoy landshaftnoy konferencii*,

- posvyashchennoy stoletiyu so dnya rozhdeniya F. N. Mil'kova «Sovremennoe landshaftno-ekologicheskoe sostoyanie i problemy optimizacii prirodnoy sredy regionov»* [Proc. of the XIII Int. landscape conf. dedicated to the centenary of the birth of F. N. Milkova "Modern landscape-ecological state and problems of optimization of the natural environment of the regions"]. Voronezh, 2018, pp. 436–438. (in Russian)
- 13. Butrimovich T. *Skhema planirovki prigorodnoy zony goroda Minska* [The planning scheme of Minsk suburban area] *Arkhitektura i stroitel'stvo = Architecture and construction*, 2008, no. 11, pp. 12–20. (in Russian)
 - 14. *Vodnye ob'yekty Respubliki Belarus': spravochnik. Ministerstvo prirodnyh resursov i okhrany okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus'*. RUP CNIIKIVR [Reference book "Water bodies of the Republic of Belarus". Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus. RUE "Central Research Institute for the Integrated Use of Water Resources"]. Available at: http://www.cricuwr.by/static/INVENT_VO/FrontPage.htm (accessed 25 March 2021) (in Russian)
 - 15. *Turisticheskaya infrastruktura Minskoy oblasti. Minskoy oblastnoy ispolnitel'nyy komitet* [Tourist infrastructure of the Minsk region. Minsk regional executive committee]. Available at: <http://www.minsk-region.gov.by/turizm-i-otdykh/turisticheskaya-infrastruktura203/> (accessed 25 March 2021) (in Russian)
 - 16. Avhimovich A. N., Vasneva O. V. *Ocenka zashchishchennosti podzemnyh vod Minskoy aglomeracii* [Assessment of the protection of groundwater in the Minsk agglomeration]. *Litasfera = Lithosphere*, 2013, no. 2 (39), pp. 101–106. (in Russian)

Информация об авторах

Струк Михаил Игоревич – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: Struk-17@mail.ru.

Жывнач Светлана Геннадьевна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: zhyunach@gmail.com

Information about the authors

Mikhail I. Struk – Ph. D. (Geography), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: Struk-17@mail.ru.

Svetlana G. Zhivnach – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: zhyunach@gmail.com

СОСТОЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ В ПРЕДЕЛАХ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО КОРИДОРА II ПОРЯДКА (ДОЛИНЫ р. МЫШКИ, г. МИНСК)

Е. В. Санец, Е. П. Овчарова, Л. А. Кравчук, С. В. Савченко, Г. М. Бокая

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. Данна оценка состояния компонентов природной среды (воды, донных отложений, почв и растительного покрова) в пределах долинного комплекса реки Мышики (г. Минск). Показано, что в современных условиях, несмотря на значительную антропогенную трансформацию, долинный комплекс сохраняет высокий потенциал для выполнения необходимых функций в качестве экологического коридора II порядка. На участках поймы р. Мышики сформировавшаяся растительность сохраняет свою специфику благодаря устойчивому гидрологическому режиму. Природные комплексы здесь имеют достаточно высокое экологическое-рекреационное значение. В более благоприятном состоянии находится участок реки в среднем течении, где проточность лучше и пойма представлена резервными озелененными территориями. Менее благоприятное состояние присуще остаточным водоемам с нарушенной проточностью в верховьях реки, где долина в большей степени представлена участками текущей, многоквартирной и общественной застройки. Наибольшую нагрузку река испытывает в устье – на участке выше и ниже выпуска очистных сооружений поверхностных сточных вод. Здесь река не справляется с антропогенной нагрузкой, ассимиляционный потенциал – 11–12 баллов, в донных отложениях сформированы полиеlementные аномалии кадмия, свинца, меди и цинка, а также нефтепродуктов.

Наиболее загрязненными почвами характеризуется участок долины р. Мышики, расположенный в низкой приусадебной пойме, где сформировалась педогеохимическая аномалия из ассоциации элементов, включающей кадмий, никель, цинк, свинец, медь и марганец, а также нефтепродукты.

Ключевые слова: экологический коридор; малый городской водоток; долина реки; природный комплекс; ассимиляционный потенциал; донные отложения.

Для цитирования. Санец Е. В., Овчарова Е. П., Кравчук Л. А., Савченко С. В., Бокая Г. М. Состояние компонентов природной среды в пределах экологического коридора II порядка (долины р. Мышики, г. Минск) // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 73–92.

STATE OF NATURAL ENVIRONMENTAL COMPONENTS WITHIN THE ECOLOGICAL CORRIDOR OF THE ORDER II (THE MYSHKA RIVER VALLEY, MINSK)

Е. В. Sanets, A. P. Aucharova, L. A. Kravchuk, S. V. Savchenko, H. M. Bokaya

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. This article presents an assessment of the state of natural environment components (water, bottom sediments, soil and vegetation) within the valley complex of the Myshka River (Minsk). It is shown that in modern conditions, despite significant anthropogenic transformation, the valley complex retains a high potential for performing the necessary functions as an ecological corridor of the order II. The vegetation of the Myshka floodplain steadily retains its specificity due to the stable hydrological regime. Natural complexes here have a high ecological and recreational value. The section of the river in the middle course is in a more favorable condition, where the flow is better and the floodplain is represented by reserve green areas. A less favorable state is inherent in residual water bodies with disturbed flow in the upper course of the river, where the valley is mostly represented by areas of residential and public buildings. The river experiences the greatest load at the mouth – in the area above and below the outlet of surface wastewater treatment facilities. Here the river cannot cope with the anthropogenic load, the assimilation potential is 11–12 points, polyelement anomalies of oil products, cadmium, lead, copper and zinc are formed in the bottom sediments.

The area of the Myshka River valley, located in a low riverbed floodplain, has a most polluted soils. Here, a pedogegeochemical anomaly from an association of elements, including petroleum products, cadmium, nickel, zinc, lead, copper, and manganese.

Keywords: ecological corridor; small urban watercourse; river valley; natural complex; assimilation potential; bottom sediments.

For citation. Sanets E. V., Aucharova A. P., Kravchuk L. A., Savchenko S. V., Bokaya H. M. State of natural environmental components within the ecological corridor of the oder II (the Myshka River valley, Minsk). *Nature Management*, 2021, № 1, pp. 73–92.

Введение. Понятие «экологические (зеленые) коридоры» появилось в ландшафтной архитектуре крупных городов Европы и США еще в конце XIX – начале XX в. и было обусловлено ростом урбанизации, повышением плотности и этажности застройки, ухудшением экологической ситуации в городах. В этот период возникла необходимость рационального сочетания урбанизированных и природных компонентов жизненной среды и обеспечения баланса между ними. Путем введения объединяющих элементов пытались также повысить связность между отдельными рекреационными территориями и избавиться от фрагментарности и монотонности городского ландшафта [1].

На фоне дефицита природных ландшафтов в городской среде немаловажная роль в формировании экологических коридоров принадлежит долинному комплексу рек. Несмотря на значительное техногенное преобразование в пределах урбанизированной территории, он по-прежнему остается уникальным природным базисом, с которым связано развитие и функционирование городских территорий. С одной стороны, гидографическая сеть обеспечивает дискретность городской застройки, создавая определенную комфортность проживания в больших массивах застроенных пространств, а с другой – прилегающие к водным объектам природные комплексы являются местами концентрации биоты и средой обитания диких животных, сохранившихся в городских условиях [2–4]. При этом реки, транзитом дренирующие урбанизированную часть водосбора, осуществляют связь городских природных и природно-антропогенных ландшафтов с естественными биогеоценозами пригородных территорий, объединяя их в единую экологическую структуру.

Материалы и результаты исследований. Выделение экологических коридоров на территории г. Минска проводилось на основании геоморфологической карты по долинному комплексу рек, который включает в себя пойму, первую надпойменную террасу, долинный зандр, а также частично балки и овраги в пределах долинного зандра, и корректировалось с учетом сохранившейся в настоящее время на территории города речной сети.

На территории города могут быть выделены гидроэкологические коридоры нескольких порядков (рис. 1). Так, например, на территории г. Минска долинный комплекс р. Свислочи является коридором I порядка и обеспечивает непрерывную связь между природными и природно-антропогенными территориями в системе город – пригород. Долинные комплексы рек Лошицы и Мышки, а также Слепянской водной системы отнесены к коридорам II порядка, обеспечивающим непрерывную связь между природными и природно-антропогенными территориями в пределах городской территории.

Река Мышка, как и вся гидографическая сеть г. Минска, претерпела существенные изменения в процессе градостроительного освоения территории. Ее протяженность уменьшилась с 7 км (исток находился в районе современной ул. Притыцкого, за д. Медвежино) до 2 км. В 1960-е годы после строительства у д. Петровщина водозабора № 2 началось ее обмеление. В настоящее время часть реки до ул. Железнодорожной представлена условно проточными остаточными водоемами. В виде водотока река существует ниже по течению вдоль ул. Семашко до впадения в р. Лошицу. Русло реки, что важно для выполнения экологических функций, находится в естественном состоянии.

В пределах сохранившегося долинного комплекса р. Мышки почти 50 % приходятся на резервные озелененные территории всех типов, что создает предпосылки для устойчивого функционирования данного экологического коридора II порядка. Эти территории, главным образом, приурочены к среднему и нижнему течению реки. Территории, приуроченные к верхнему течению, трансформированы в большей степени и представлены участками текущей, многоквартирной и общественной застройки.

Оценка состояния компонентов природной среды в долине р. Мышки проводилась на основе результатов полевых исследований в период с 2017 по 2020 г., которые включали опробование поверхностных вод, донных отложений, почв, а также описание растительности. Картосхема расположения точек опробования представлена на рис. 2.

Характеристика растительного покрова долины р. Мышки приведена в разрезе выделов м209, м78, м234, м83, м230 (рис. 3).



Рис. 1. Картосхема положения гидроэкологического коридора II порядка – долины р. Мышки в системе экологических коридоров г. Минска

Fig. 1. Schema of the II order hydroecological corridor position – the Myshka River valley in the system of ecological corridors in Minsk

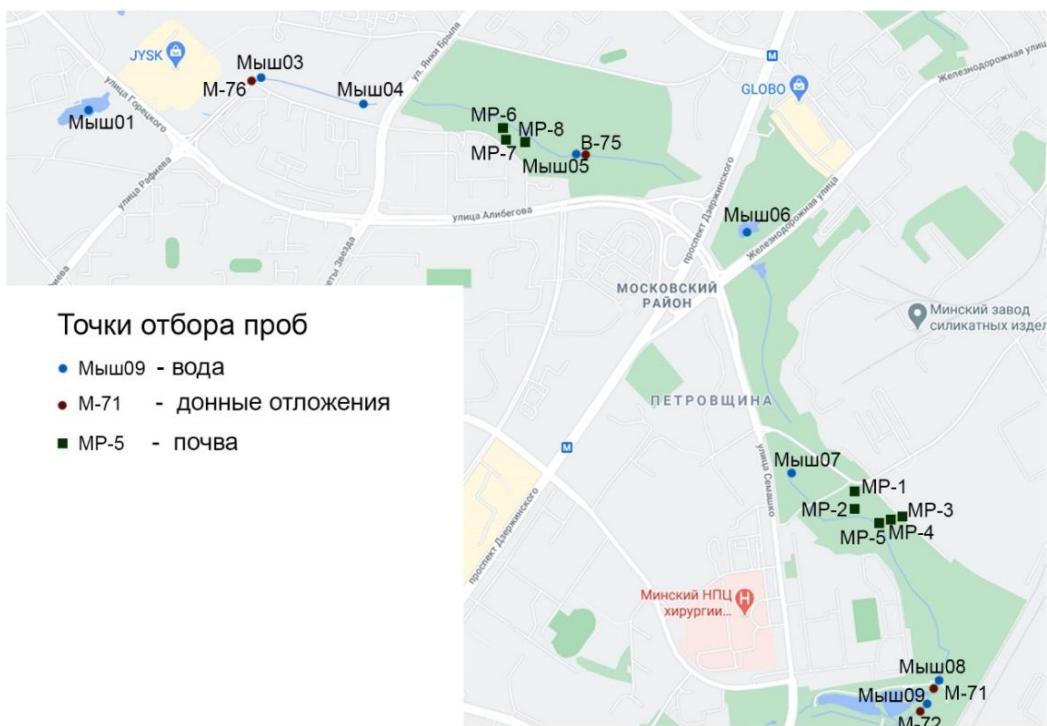


Рис. 2. Картосхема расположения точек опробования поверхностных вод, донных отложений и почв в пределах экологического коридора II порядка – долины р. Мышки

Fig. 2. Schema of the location of surface waters, bottom sediments and soils sampling points within the II order ecological corridor – the Myshka River valley

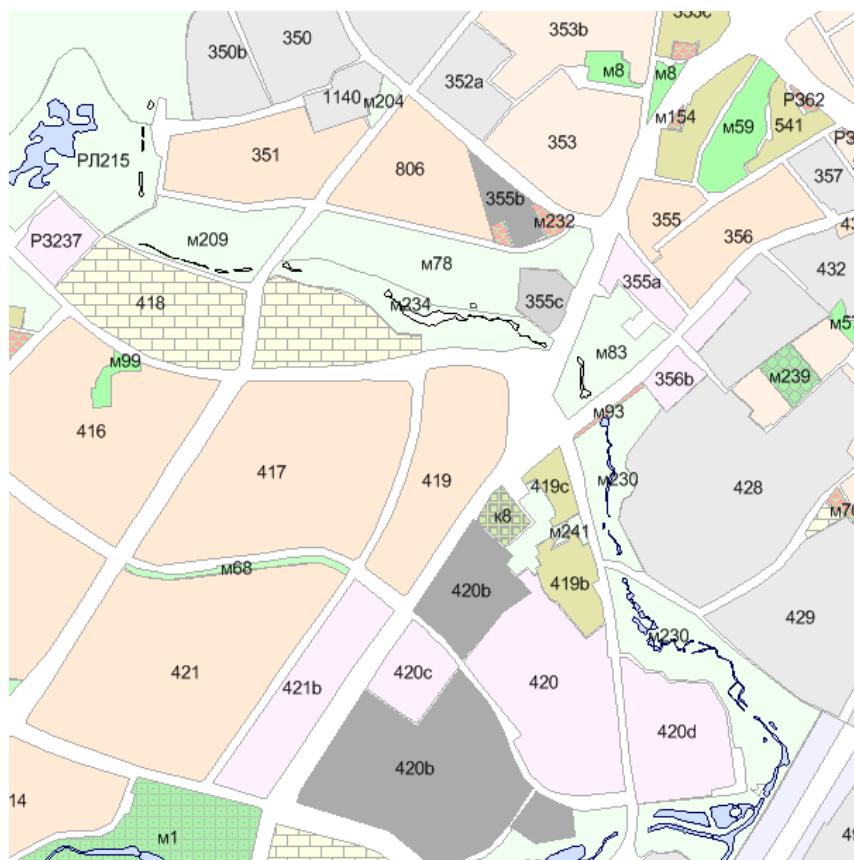


Рис. 3. Расположение выделов озелененных территорий в долине р. Мышки

Fig. 3. Location of green areas in the Myshka River valley

Растительный покров долины р. Мышки формировался в условиях сложных градостроительных преобразований и техногенных воздействий на экосистемы долины (загрязнение воздуха, почв, подтопление, стихийные рекреационные нагрузки). Из основных факторов преобразования природных комплексов следует отметить:

– использование в конце ХХ–начале ХХI века наименее заросших древесно-кустарниковой растительностью (ДКР) и незатопляемых участков поймы под стихийные огорода. Данный процесс на территории Минска охватил практически все более-менее плодородные земли на неудобьях, приближенных к жилой застройке, в том числе и участки долины р. Мышки;

— строительство и развитие транспортной инфраструктуры, расчленившее долинный комплекс на участки, ограниченные дорожными насыпями. Строительство крупных магистралей, пересекающих долину реки в нескольких местах, привело к изменению рельефа (создание насыпей, отвалов грунтов и отходов строительства), фрагментации долины на относительно изолированные участки, уничтожению естественной древесно-кустарниковой растительности и травянистого покрова на прилегающих участках с созданием культурфитоценозов (организация газонов, посадки деревьев и кустарников при благоустройстве). Данные процессы особенно активно развивались в верхней и средней части долины р. Мышки в 2010–2015 гг.;

– благоустройство озелененных территорий в виде дополнительных посадок деревьев и кустарников, посева и косьбы газонных трав на отдельных участках, приближенных к местам концентрации рекреационного спроса.

Особенности ландшафтно-экологических условий (пойма малой реки), а также высокое антропогенное преобразование территории в процессе градостроительной деятельности и рекреации определили современную структуру растительного покрова долины р. Мышки.

В наименее измененном виде сохранились участки поймы в верхней и средней части, где в условиях высокого увлажнения сохранилась и продолжает эффективно функционировать типичная пойменная растительность.

Как показывает анализ ретроспективных снимков (по материалам Google Earth), значительная часть долины р. Мышки активно использовалась населением под огороды. Естественный растительный покров на таких участках уничтожен в процессе вскапывания и посадки сельскохозяйственных растений. После прекращения «городского огородничества» (примерно с 2005 г.) на нарушенных участках началось активное внедрение сорных растений, в том числе инвазивных видов – борщевика Сосновского, Золотарника канадского, что определило включение отдельных участков вблизи р. Мышки в план мероприятий по регулированию численности инвазивных видов и проведению комплекса мер по их уничтожению.

Естественная древесно-кустарниковая растительность, характерная для длительно подтопляемых участков долины, произрастает полосой вдоль русла и заводей. В составе древостоев преобладают разновозрастные ива ломкая, встречается ива белая, ива пепельная, ива козья, ива трехтычинковая и др. Изредка отмечаются самосевные деревья ольхи черной, березы повислой, клена ясенелистного.

Существенную часть в растительном покрове долины р. Мышки составляют разновозрастные культурные посадки деревьев и кустарников, приуроченные, как правило, к склонам долины. Они представлены в основном саженцами клена, липы, ясения, тополя и других пород.

Травянистый покров в долине р. Мышки весьма разнообразен, его структура определяется как природными особенностями территории, так и антропогенными воздействиями на растительность (антропогенным изменением рельефа, гидрологического режима, почвенного покрова). Немаловажное влияние на структуру травянистой растительности имеет также систематический уход за территорией в процессе ее благоустройства (посадка деревьев и кустарников, посев и косьба трав, планомерное уничтожение инвазивных видов). Существенным фактором воздействия на растительный покров отдельных участков является также стихийное рекреационное использование территории.

Выдел m209 (рис. 4). Большая часть выдела, за исключением поймы, достаточно сильно преобразована. Здесь складировались отвалы грунтов строительства, позже склоны долины были снивелированы. На большей части выдела на насыпных грунтах сформирован газон, который систематически выкашивается. На левом склоне долины высажены саженцы. На узкой полосе поймы вблизи русла р. Мышки у водоемов многоствольными куртинами произрастают средневозрастные деревья ивы ломкой. Местами на участке встречается береза повислая. В северной части в насаждениях вблизи водозабора произрастает тополь бальзамический, куртинами встречаются кустарниковые формы ивы (И. мирзинолистная, И. пепельная, И. трехтычинносная и др.). В напочвенном покрове на рекультивированных участках доминируют газонные травы (райграс, мятылик, овсяницы, ежа сборная и др.), высаженные после нивелирования рельефа. На избыточно увлажненных участках произрастают прибрежно-водные сообщества, характерные для нарушенных мест. В травянистом ярусе в местах с избыточным увлажнением на богатых почвах вблизи водоемов произрастает рогоз широколистный, встречается Р. узколистный, тростник обыкновенный, двукисточник тростниковый, нередки осоки и другие влаголюбивые виды. На более возвышенных участках, не подверженных косьбе, развивается мезофильное разнотравье, где наряду со злаками встречаются донник белый, пижма обыкновенная, тысячелистник обыкновенный, купырь лесной, дербенник иволистный, мать-и-мачеха, а также сорные виды травянистых растений – крапива двудомная, полынь обыкновенная, золотарник канадский, отмечены единичные куртины борщевика Сосновского.

Выделы m78 и m234 расположены между улицами Я. Брыля, Сапеги, Алибегова и пр. Дзержинского. Древесно-кустарниковая растительность покрывает большую часть данного выдела. Левосторонний участок долины занят сохранившейся частью плодового сада, дополненного культурными древесными посадками лиственных пород, в том числе тополя бальзамического. Напочвенный покров здесь сформирован злаками с участием лугового разнотравья. Систематически выкашивается (рис. 5). Участок изрезан многочисленными тропами со стороны жилого района по ул. Сапеги.

В пойме в древесно-кустарниковом ярусе доминируют ивы – многоствольными куртинами произрастают средневозрастные деревья ивы ломкой, встречаются кустарники И. пепельной, И. трехтычиночной, нередки осины, клен ясенелистный.

Прибрежно-водная растительность в пойме р. Мышки представлена тростниками, двукисточниками, стройноосоковыми, рогозовыми сообществами. На менее затопляемой части произрастают теневыносливые злаки с участием сныти обыкновенной, подмаренника цепкого, иван-чая, крапивы двудомной, купыря лесного, донника белого, клевера лугового и других представителей лугового разнотравья.



Рис. 4. Общий вид фитоценозов в пределах выдела м209

Fig. 4. General view of phytocenoses within the m209 unit



Рис. 5. Общий вид фитоценозов в пределах выделов м78 (а) и м234 (б)

Fig. 5. General view of phytocenoses within the m78 (a) and m234 (b) units

Выдел м83 ограничен пр. Дзержинского, улицами Железнодорожной и Алибегова и торговым центром по ул. Уманской. Растительный покров сформирован массивами древесно-кустарниковой растительности с участием ивы ломкой, березы повислой, клена остролистного и других лиственных пород (рис. 6). На участке высажены саженцы лиственных пород, проложена велодорожка.



Рис. 6. Общий вид фитоценозов в пределах выдела м83

Fig. 6. General view of phytocenoses within the m83 unit

Напочвенный растительный покров на большей части выдела сформирован злаками с участием клевера лугового, К. ползучего, тысячелистника обыкновенного, пижмы обыкновенной, полыни обыкновенной, одуванчика лекарственного, мать-и-мачехи обыкновенной (на эродированных участках) и другого разнотравья. Систематически выкашивается. На увлажненных участках единичны рогоз широколистный, осоки, тростник, встречается частуха подорожниковая.

Выдел м230 расположен между улицами Железнодорожной, Семашко и Машинистов. Древесно-кустарниковая растительность выдела сформирована как естественными массивами, так и культурными посадками лиственных деревьев. В массивах преобладают устойчивые к высокому уровню грунтовых вод ивы (ива ломкая, в том числе И. шаровидная, И. белая, в том числе И. плакучая, И. пепельная, И. трехтычинковая, И. мирзинолистная и др.), встречаются клен остролистный, К. ясенелистный, береза повислая, тополь бальзамический, вяз шершавый, ясень, липа и др. (рис. 7).



Рис. 7. Общий вид фитоценозов в пределах выдела м230

Fig. 7. General view of phytocenoses within the m230 unit

Напочвенный покров на большей части выдела сформирован злаками с участием лугового разнотравья, сорных видов, периодически выкашивается.

На затопленных участках и вблизи очистных узкой полосой развита прибрежно-водная растительность – тростник обыкновенный, двукисточник тростниковый, рогоз, осоки и др.

Природные комплексы, существующие в настоящее время в долине р. Мышки, имеют достаточно высокое экологическое-рекреационное значение.

Благодаря высоким запасам ассимиляционной фитомассы, особенно в сообществах поймы, фотосинтетическая активность растительных комплексов способствует охлаждению воздуха, что приводит к снижению температуры подстилающей поверхности в жаркий летний день на 2–4 °C по сравнению с рядом расположенными застроенными территориями.

Высока рекреационная значимость долины р. Мышки. В жилых кварталах, непосредственно прилегающих к данному экологическому коридору, проживает около 110 тыс. жителей. Однако на большей части этой территории отсутствует рекреационное благоустройство, хотя на отдельных участках, приближенных к жилым массивам, отмечается развитие стихийных троп.

В перспективе, согласно Схеме озелененных территорий общего пользования г. Минска, здесь планируется создание системы парков жилых районов.

Однако следует отметить, что на отдельных участках в долине р. Мышки проходит воздушная линия электропередач с широкой зоной санитарного разрыва (до 20 м), что является ограничивающим фактором развития рекреационной инфраструктуры, по крайней мере вблизи ВЛЭП.

Учитывая достаточно высокое биологическое разнообразие, познавательную, образовательную и эстетическую ценность пойменных ландшафтов в долине р. Мышки, здесь целесообразно создание системы природных парков (или единого природного парка) с экологическими тропами, минимальной рекреационной инфраструктурой, приближенной к жилым массивам, при условии восстановления целостности гидрографической сети.

Состояние почвенного покрова оценивалось в пределах заложенных ландшафтно-геохимических профилей (см. рис. 2): профили № 1 и № 2 – в пределах выдела м230, профиль № 3 – в пределах выдела м234. Характеристика почв приведена в табл. 1. Потенциальными источниками загрязнения почв на данной территории являются транспорт и рекреационная деятельность.

Таблица 1. Характеристика почвенных проб

Table 1. Description of soil samples

Номер точки	Приуроченность	Характеристика
MP-1	Центральная пойма	Супесь уплотненная, гумусированная, коричневого цвета, без камней и антропогенных включений
MP-2	Прирусовая пойма	Супесь увлажненная, гумусированная, серо-коричневого цвета, без камней и антропогенных включений
MP-3	Склон долины реки	Супесь слабогумусированная, коричневого цвета, с камнями и антропогенными включениями
MP-4	Центральная низкая пойма	Супесь гумусированная, увлажненная, серо-коричневого цвета, с включениями отмерших частей растений
MP-5	Прирусовая низкая пойма	Супесь увлажненная, гумусированная, серо-коричневого цвета, без камней, с включениями растительных остатков
MP-6	Центральная пойма	Супесь гумусированная, увлажненная, серо-коричневого цвета, с включениями отмерших частей растений
MP-7	Склон долины реки	Супесь гумусированная, коричневого цвета, с включениями дернины и мелких камней
MP-8	Прирусовая пойма	Супесь влажная, гумусированная, серого цвета, без камней и антропогенных включений

Профиль № 1 расположен на левом берегу р. Мышки южнее ул. С. Ковалевской. Точки отбора проб почв расположены в центральной (MP1) и прирусовой (MP2) пойме реки. По функциональному использованию территория относится к ландшафтно-рекреационной зоне. Из древесных пород встречается преимущественно ива. Травянистый покров представлен злаковым разнотравьем, тростником, таволгой.

Профиль № 2 расположен на левом берегу р. Мышки южнее ул. С. Ковалевской, восточнее профиля № 1. Точки отбора проб почв расположены на склоне долины реки (MP3), в центральной низкой (MP4) и прирусовой низкой (MP5) пойме р. Мышки. По функциональному использованию территория относится к ландшафтно-рекреационной зоне. Из древесных пород встречается преимущественно ива. Травянистый покров густой, плохо проходимый, представлен преимущественно тростником, таволгой, на склоне – злаковым разнотравьем.

Профиль № 3 расположен на правом берегу р. Мышки (в настоящее время на данном участке представленной остаточными русловыми водоемами) севернее ул. Алибегова. Точки отбора проб почв расположены на склоне (МР7), в центральной (МР6) и прирусловой пойме (МР8) долины реки. По функциональному использованию территория относится к ландшафтно-рекреационной зоне. Растительный покров представлен густыми древесными насаждениями – березой, ивой, ольхой и др. Травянистый покров – преимущественно злаковым разнотравьем, в пойме также тростником, таволгой и др.

Фактическое содержание тяжелых металлов и нефтепродуктов в почвах долины р. Мышки в г. Минске приведено в табл. 2.

Оценка валового содержания тяжелых металлов и нефтепродуктов в почвах, отобранных на участках природных комплексов в долине р. Мышки показала, что концентрации кадмия и никеля превышают педогеохимический фон, установленный для почв г. Минска в целом, во всех исследованных образцах отобранных проб почв: свинца – в 63 %, нефтепродуктов – в 50, меди и цинка – в 25, марганца – в 50 %. Превышения над гигиеническими нормативами отмечаются в 100 % проб почв для кадмия, в 50 % проб для нефтепродуктов, в 25 % проб для цинка, в единичных пробах для свинца, меди и никеля.

Таблица 2. Фактическое содержание тяжелых металлов и нефтепродуктов (НП) в верхнем (0–20 см) горизонте почв долины р. Мышки

Table 2. The content of heavy metals and oil products (OP) in the upper (0–20 cm) soil horizon of the Myshka River valley

Номер точки отбора	Химическое вещество, мг/кг почвы						
	НП	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Mn
MP-1	300,0*	3,76	29,44	14,89	51,71	11,58	242,7
MP-2	145,0	3,54	26,25	13,01	41,98	9,95	216,25
MP-3	43,0	3,55	21,2	11,76	48,73	11,28	315,4
MP-4	1027,0	3,63	27,73	18,94	147,64	12,40	468,7
MP-5	3620,0	4,37	81,36	61,97	325,52	36,23	706,9
MP-6	14,0	3,77	18,86	8,44	25,07	12,46	70,7
MP-7	10,0	3,79	18,02	10,28	29,60	10,58	62,5
MP-8	42,0	3,99	19,08	11,13	26,67	10,42	130,9
Среднее значение для г. Минска (фон) [5]	133,7	0,19	20,4	17,1	57,1	6,3	217,0
ПДК/ОДК [6]	100**	0,5	32,0***	33,0	55,0	20,0	1500,0

* Полужирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК/ОДК.

** Источник [7].

*** Источник [8].

Расчет коэффициента контрастности (отношение максимального значения содержания химического вещества к его минимальному содержанию) свидетельствует о неоднородности поступления и накопления металлов в почвах рассматриваемой территории. Наиболее равномерно распределены в почвах кадмий (1), никель (4) и свинец (5). Для цинка и марганца коэффициент контрастности значительно выше и составляет 13 и 11 соответственно. Нефтепродукты имеют крайне высокий коэффициент контрастности (362).

Поэлементный анализ содержания изучаемых тяжелых металлов показал, что коэффициент концентрации (K_c) для кадмия, рассчитанный по отношению к фону, составляет от 18,5 до 23,0, фактическое содержание изменяется от 3,54 до 4,37 мг/кг, что выше допустимого уровня в 7,1–8,7 раза (средняя степень загрязнения). Для свинца K_c изменяется от 0,9 до 4,0, фактические значения составляют от 18,02 до 81,36 мг/кг, при этом максимальное значение равно 2,5 ПДК (низкая степень загрязнения). Содержание меди в почвах долины р. Мышки изменяется от 8,44 до 61,97 мг/кг с K_c от 0,5 до 3,6, наибольшее значение превышает норматив в 1,9 раза.

Коэффициент концентрации цинка варьирует от 0,4 до 5,7, фактическое содержание изменяется от 25,07 до 325,52 мг/кг, при этом среднее значение равно 1,6 ОДК (низкая степень загрязнения), максимальное – 5,9 ОДК (средняя степень загрязнения).

Концентрация никеля в почвах долины р. Мышки значительно выше, чем в почвах долины р. Свислочи, и изменяется от 8,44 до 61,97 мг/кг с K_c от 1,6 до 5,8, наибольшее значение превышает гигиенический норматив в 1,8 раза.

Загрязнение почв марганцем ни на одном из участков не выявлено. Коэффициент концентрации по отношению к среднему для города значению равен 0,3–3,3, фактическое содержание варьирует от 62,5 до 706,9 мг/кг.

Для нефтепродуктов K_c варьирует от 0,07 до 27,1, фактические значения составляют от 10,0 до 3620,0 мг/кг, при этом среднее и максимальное значения равны 6,5 ПДК (средняя степень загрязнения) и 36,2 ПДК (высокая степень загрязнения) соответственно.

Наиболее загрязненными почвами характеризуется участок долины р. Мышки, расположенный в низкой прирусловой пойме (МР5). Накопление на данном участке избыточного содержания ряда элементов может быть связано с расположением точки отбора на гипсометрически пониженном участке.

Здесь сформировалась педогеохимическая аномалия из ассоциации элементов, образующих геохимический ряд (по коэффициентам концентрации, рассчитанным по отношению к средним для г. Минска значениям): $\text{НП}_{27,1} - \text{Cd}_{23,0} - \text{Ni}_{5,8} - \text{Zn}_{5,7} - \text{Pb}_{4,0} - \text{Cu}_{3,6} - \text{Mn}_{3,3}$. Расчет суммарного коэффициента загрязнения Z_c , равного 66,5, позволяет отнести почвы данной территории к категории очень высокой степени загрязнения.

По коэффициентам концентрации, рассчитанным по отношению к гигиеническим нормативам, ассоциация элементов-загрязнителей образует следующий ряд: $\text{НП}_{36,2} - \text{Cd}_{8,7} - \text{Zn}_{5,9} - \text{Pb}_{2,5} - \text{Cu}_{1,9} - \text{Ni}_{1,8}$. Различия данных геохимических рядов обусловлены тем, что для некоторых химических веществ среднее содержание в почвах города превышает установленные для них ПДК/ОДК. По суммарному коэффициенту загрязнения Z_c , который равен 52,0, почвы характеризуются очень высокой степенью загрязнения.

Согласно ранее проведенным исследованиям [9], на территории природных комплексов, приуроченных к долине р. Мышки в г. Минске, содержание кадмия в почвах составляло 0,5 мг/кг, или 1,0 ОДК, изменяясь от 0,16 мг/кг до 1,38 мг/кг (2,8 ОДК), что ниже значений, полученных при современных исследованиях.

Содержание свинца за истекший период также повысилось в среднем в 1,9 раза. Ранее среднее содержание металла составляло 15,9 мг/кг, минимальное – 8,9, максимальное – 34,4 мг/кг (или 1,1 ПДК).

Произошло также накопление в почвах цинка, меди и никеля. Ранее среднее, минимальное и максимальное содержание цинка составляло 26,6, 13,3 и 72,0 мг/кг соответственно. При этом наибольшее значение достигало 1,3 ОДК (низкая степень загрязнения), меди – 8,6, 4,0 и 36,3 мг/кг (или 1,1 ОДК), никеля – 9,2, 6,1 и 18,0 мг/кг соответственно.

Исследование тяжелых металлов в почвах по линии профиля № 2 показало, что наименьшими значениями всех исследованных химических веществ по сравнению с другими участками характеризуются почвы склона долины реки, где происходит транзит элементов на нижележащие территории: кадмия – в 1,2 раза, марганца – в 2,2, никеля – в 3,2, свинца – в 3,8, меди – в 5,3, цинка – в 6,7, нефтепродуктов – в 84,2 раза. При этом наибольшим накоплением всех элементов характеризуются почвы прирусловой низкой поймы, относящейся к супераквальным ландшафтам (рис. 8, а).

По коэффициенту концентрации (рассчитанному по отношению к средним для г. Минска значениям) тяжелые металлы и нефтепродукты в почвах долины р. Мышки по линии профиля № 2 образуют следующие ряды: трансэлювиальный ландшафт – $\text{Cd}_{18,7} - \text{Ni}_{1,8} - \text{Mn}_{1,5} - \text{Pb}_{1,0} - \text{Zn}_{0,9} - \text{Cu}_{0,7} - \text{НП}_{0,3}$; транссупераквальный – $\text{Cd}_{19,1} - \text{НП}_{7,7} - \text{Zn}_{2,6} - \text{Mn}_{2,2} - \text{Ni}_{1,7} - \text{Pb}_{1,4} - \text{Cu}_{1,1}$; супераквальный ландшафт – $\text{Cd}_{27,1} - \text{Cd}_{23,0} - \text{Ni}_{5,8} - \text{Zn}_{5,7} - \text{Pb}_{4,0} - \text{Cu}_{3,6} - \text{Mn}_{3,3}$. Данные ряды свидетельствуют о накоплении по сравнению с другими городскими территориями большинства исследованных элементов, что обусловлено гипсометрически пониженным расположением исследованных участков. Рассчитанный для данных ландшафтов Z_c , вследствие высокого содержания в почвах кадмия и нефтепродуктов, равен для трансэлювиального ландшафта 18,9 (средняя степень загрязнения), транссупераквального и супераквального – 29,8 (высокая степень загрязнения) и 66,5 (очень высокая степень загрязнения) соответственно.

Ряды из ассоциации исследованных химических веществ при использовании в качестве критерия при расчете коэффициента концентрации гигиенических нормативов (ПДК/ОДК) содержания тяжелых металлов в почвах несколько иные: трансэлювиальный ландшафт – $\text{Cd}_{7,1} - \text{Zn}_{0,9} - \text{Pb}_{0,7} - \text{Ni}_{0,6} - \text{Cu}, \text{НП}_{0,4} - \text{Mn}_{0,2}$; транссупераквальный – $\text{НП}_{10,3} - \text{Cd}_{7,3} - \text{Zn}_{2,7} - \text{Pb}_{0,9} - \text{Ni}_{0,6} - \text{Cu}_{0,6} - \text{Mn}_{0,3}$; супераквальный ландшафт – $\text{НП}_{36,2} - \text{Cd}_{8,7} - \text{Zn}_{5,9} - \text{Pb}_{2,5} - \text{Cu}_{1,9} - \text{Ni}_{1,8} - \text{Mn}_{0,5}$. Суммарный коэффициент загрязнения Z_c для трансэлювиального ландшафта равен 4,3 (низкая степень загрязнения), для транссупераквального – 16,7 (средняя степень загрязнения), супераквального – 50,5 (очень высокая степень загрязнения).

Оценка содержания тяжелых металлов в почвах по линии профиля № 3 показала, что концентрации большинства элементов (за исключением кадмия) ниже, чем в почвах профиля № 2. При этом существенных различий в накоплении элементов в разных ландшафтных условиях не наблюдается. Наименьшими значениями нефтепродуктов, свинца и марганца характеризуются почвы склона долины реки, кадмия, меди и цинка – центральной поймы, никеля – прирусловой поймы (рис. 8, б). В то же время в прирусловой пойме как наиболее пониженной по сравнению с другими участками отмечается незначительное накопление меди и марганца. При этом содержание марганца значительно ниже, чем в почвах профиля № 2.

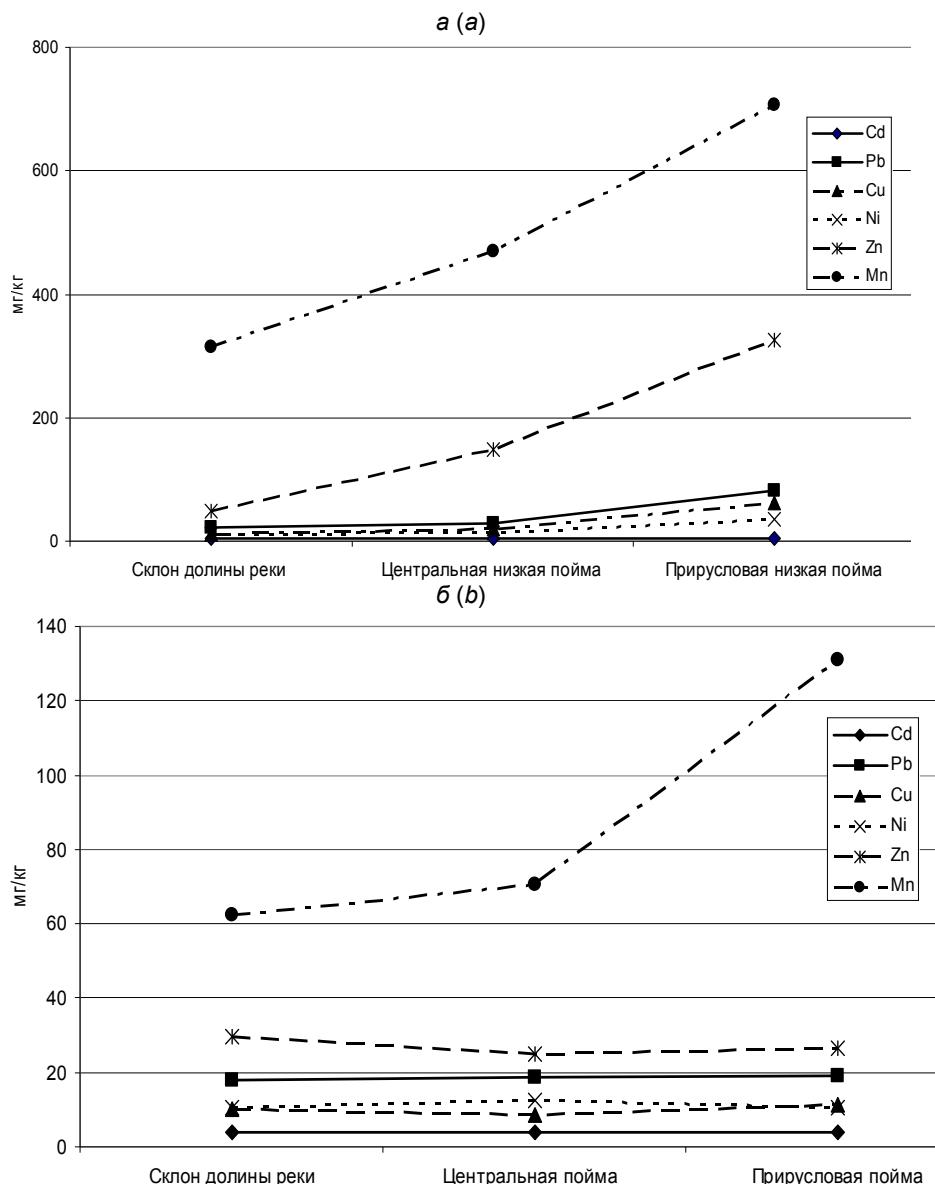


Рис. 8. Содержание тяжелых металлов в верхнем горизонте почв в долине р. Мышки:
а – профиль № 2; б – профиль № 3

Fig. 8. The content of heavy metals in the upper soil horizon in the Myshka River valley:
a – profile № 2; b – profile № 3

По коэффициентам концентрации (рассчитанным по отношению к городскому фону) исследованные металлы в почвах профиля № 3 образуют следующие ряды: трансэлювиальный ландшафт – Cd_{19,9} – Ni_{1,7} – Pb_{0,9} – Cu_{0,6} – Zn_{0,5} – Mn_{0,3} – НП_{0,07}; транссупераквальный – Cd_{19,8} – Ni_{2,0} – Pb_{0,9} – Cu_{0,5} – Zn_{0,4} – Mn_{0,3} – НП_{0,1}; супераквальный ландшафт – Cd_{21,0} – Ni_{1,7} – Pb_{0,9} – Cu_{0,7} – Mn_{0,6} – Zn_{0,5} – НП_{0,3}. Полученные ряды свидетельствуют о пониженной концентрации в почвах экологического коридора большинства исследованных элементов по сравнению с почвами города в целом. Исключение составляет кадмий, накопление которого характерно для почв всех исследованных участков. Рассчитанный для почв Z_c для трансэлювиального ландшафта равен 17,9, для транссупераквального – 18,0, для супераквального – 19,7, что свидетельствует о средней степени загрязнения почв профиля № 3. Это происходит за счет крайне высокого содержания кадмия.

Ассоциации химических веществ, полученные при сравнении фактических значений с гигиеническими нормативами (ПДК/ОДК), образуют по линии профиля следующие ряды: трансэлювиальный ландшафт – Cd_{7,6} – Pb_{0,6} – Ni, Zn_{0,5} – Cu_{0,3} – НП_{0,1} – Mn_{0,04}; транссупераквальный – Cd_{7,5} – Ni, Pb_{0,6} –

$Zn_{0,5} - Cu_{0,3} - H\pi_{0,1} - Mn_{0,05}$; супераквальный ландшафт – $Cd_{8,0} - Pb_{0,6} - Ni, Zn_{0,5} - H\pi_{0,4} - Cu_{0,3} - Mn_{0,09}$. Загрязнение почв средней степени загрязнение фиксируется только для кадмия.

Таким образом, оценка концентрации тяжелых металлов в почвах экологического коридора II порядка показала, что концентрации кадмия и никеля превышают фон для почв г. Минска в целом во всех исследованных образцах, свинца – в 63 %, меди и цинка – в 25 %, марганца и нефтепродуктов – в 50 % отобранных проб почв. Превышения над гигиеническими нормативами отмечаются в 100 % проб почв для кадмия, в 50 % проб для нефтепродуктов, в 25 % проб для цинка, в единичных пробах для свинца, меди и никеля.

Наиболее загрязненными почвами характеризуется участок долины р. Мыши, расположенный в низкой прирусовой пойме, где сформировалась педогеохимическая аномалия из ассоциации элементов, включающей нефтепродукты, кадмий, никель, цинк, свинец, медь и марганец. Превышение гигиенических нормативов наблюдается здесь для кадмия, цинка, свинца, меди и никеля.

В почвенном покрове по линии поперечного профиля № 2 наименьшими значениями всех исследованных элементов характеризуются почвы трансэлювиального ландшафта, наибольшими значениями – почвы супераквального, где содержание элементов увеличивается от 1,2 раза для кадмия до 84,2 раза для нефтепродуктов. При этом в почвах супераквального ландшафта содержание нефтепродуктов и металлов, за исключением марганца, превышает установленные для них гигиенические нормативы.

Оценка содержания тяжелых металлов в почвах по линии профиля № 3 показала, что концентрации большинства элементов (за исключением кадмия) ниже, чем в почвах профиля № 2. При этом существенных различий в накоплении элементов в разных ландшафтных условиях не наблюдается. Наименьшими значениями содержания нефтепродуктов, свинца и марганца характеризуются почвы трансэлювиального ландшафта, кадмия, меди и цинка – транссупераквального, никеля – супераквального. В супераквальном ландшафте как наиболее пониженном по сравнению с другими участками отмечается незначительное накопление меди и марганца. Превышения над нормативами по линии профиля отмечается только для кадмия.

В целом, почвенный покров долины р. Мыши трансформирован незначительно и в ряде случаев сохранился в естественном виде, что обуславливает накопление различных химических веществ в течение более длительного периода по сравнению с трансформированными городскими почвами.

Для оценки качества воды р. Мыши на территории г. Минска отобрано около 20 водных проб (см. рис. 2). Описание места расположения точек отбора приведено в табл. 3.

Таблица 3. Точки отбора проб воды р. Мыши

Table 3. Water sampling points of the Myshka River

Номер точки отбора	Место расположения
Мыш01	Водоем (остаточный) в границах улиц М. Горецкого, Рафиева, Михалово, Колхозной
Мыш03	Водоемы (остаточные) между улицами Михайловской и Острожских
Мыш04	Водоемы (остаточные) у ул. Я. Брыля
Мыш05	Водоемы (остаточные) вдоль ул. Алибегова
Мыш06	Водоемы (остаточные) между пр. Дзержинского и ул. Железнодорожной
Мыш07	Водоток, р. Мышка вдоль ул. Семашко
Мыш08	Водоток, р. Мышка выше сброса очистных сооружений дождевого коллектора Запад, Юго-Запад
Мыш09	Водоток, река Мышка ниже сброса очистных сооружений дождевого коллектора Запад, Юго-Запад

В ходе химико-аналитических работ выполнено определение макрокомпонентного состава водных проб, а также содержания биогенных веществ и нефтепродуктов. На основе полученных данных определены тип воды и ассимиляционный потенциал (согласно работе [10]) р. Мыши на разных участках.

В табл. 4 представлено содержание основных макрокомпонентов и биогенных веществ в воде р. Мыши.

Согласно данным обследования, состояние реки по гидрохимическим показателям можно считать относительно стабильным. Так, общая минерализация воды в указанный период колебалась в пределах 228,2–383,7 мг/дм³. Максимальные значения как общей минерализации воды, так и макрокомпонентов солевого состава фиксировались в апреле 2020 г.

Таблица 4. Содержание основных макрокомпонентов и биогенных веществ в воде р. Мышки, 2017–2020 гг.**Table 4. The content of the main macrocomponents and nutrients in the water of the Myshka River, 2017–2020**

Номер точки отбора	Дата отбора	рН	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	N-NO_3^-	N-NO_2^-	N-NH_4^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	P-PO_4^{3-}	Минерализация, мг/дм ³
			мг/дм ³			мгN/дм ³			мг/дм ³			мгP/дм ³			
Мыш01	25.06.2018	8,5	6	158,6	33,3	2,0	0,096	0,002	0,078	28,1	14,6	28,4	6,6	0,005	277,2
	07.04.2020	8,3	6	146,4	16,7	10,5	0,068	0,000	0,257	36,1	9,7	7,0	2,2	0,304	236,1
Мыш03	28.09.2018	7,1	н. о.	244,0	43,3	10,2	0,133	0,007	0,078	32,1	29,2	22,4	1,8	0,006	383,7
	07.04.2020	8,1	6	305,0	66,7	20,2	0,045	0,000	0,070	68,1	21,9	17,0	1,1	0,015	506,4
Мыш04	19.09.2017	7,1	н. о.	231,8	3,1	2,8	0,023	0,001	0,156	36,1	24,3	7,3	3,6	0,005	309,6
Мыш05	19.09.2017	7,0	н. о.	231,8	3,1	2,0	0,068	0,001	0,226	36,1	24,3	6,8	3,9	0,027	306,7
	28.09.2018	7,3	н. о.	164,7	50,0	16,2	0,027	0,002	0,078	16,0	26,8	21,6	1,7	0,023	297,3
	07.04.2020	7,8	н. о.	170,8	66,7	28,6	0,090	0,000	0,140	28,1	31,6	20,0	1,3	0,070	347,9
Мыш06	28.09.2018	7,0	н. о.	140,3	20,0	12,6	0,023	0,001	0,083	32,1	9,7	11,2	2,2	0,005	228,2
Мыш07	19.09.2017	7,2	н. о.	219,6	9,2	2,3	0,023	0,001	0,148	40,1	14,6	13,1	5,1	0,005	304,4
Мыш08	19.09.2017	7,1	н. о.	170,8	12,2	2,0	0,045	0,001	0,404	40,1	9,7	10,1	3,8	0,005	247,4
	28.09.2018	6,7	н. о.	213,5	43,3	16,9	0,023	0,001	2,109	48,1	14,6	34,4	2,3	0,149	376,5
	07.04.2020	8,3	6	170,7	66,7	24,4	0,361	0,031	0,171	16,0	36,5	32,6	1,7	0,220	357,2
Мыш09	19.07.2016	7,3	н. о.	219,7	37,4	7,5	0,011	0,006	0,801	24,1	30,4	14,0	2,0	0,010	366,1
	19.09.2017	7,0	н. о.	207,4	33,5	3,2	0,034	0,003	0,163	24,1	24,3	20,8	4,7	0,005	318,6
	28.09.2018	6,7	н. о.	195,2	46,7	16,8	0,023	0,001	0,898	32,1	14,6	35,4	2,0	0,007	344,1
	07.04.2020	7,9	н. о.	183,0	56,7	24,2	0,474	0,147	0,902	16,0	36,5	26,0	1,5	0,109	347,9
ПДК для водоемов рыбоводного назначения [11]	6,5–8,5	–	–	300,0	100,0	9,030	0,024	0,390	180,00	40,0	120,0	50,0	0,066	1000,00	

П р и м е ч а н и е. Полужирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК.

Если рассмотреть усредненные значения общей минерализации за период наблюдения, то можно сделать вывод, что наибольшую минерализацию воды (445 мг/дм^3) имеют остаточные водоемы между улицами Михайловской и Острожских. Также можно сделать вывод о том, что для участка реки, где сохранена проточность (от ул. Железнодорожной до устья реки), наблюдается увеличение общей минерализации с 228,2 до $344,9 \text{ мг/дм}^3$ (в 1,5 раза).

Превышения ПДК азота нитритного (до 6 ПДК) и азота аммонийного (до 5 ПДК) отмечались в воде реки в нижнем течении выше и ниже выпуска очистных сооружений для поверхностных сточных вод. В апреле 2020 г. превышения ПДК фосфора фосфатного в 1,1–4,6 раза отмечались практически на всем протяжении реки.

Содержание хлоридов (являются одним из индикаторов уровня антропогенной нагрузки) в воде также было максимальным в апреле 2020 г. и составляло $56,7\text{--}66,7 \text{ мг/дм}^3$.

Оценка ионного состава воды по результатам опробования в 2017–2020 гг. показала, что в сентябре 2017 г. и сентябре 2018 г. для водотока был характерен зональный гидрокарбонатный кальциево-магниевый или магниево-кальциевый тип вод (табл. 5). Исключение составил остаточный водоем в границах улиц М. Горецкого, Рафиева, Михалово и Колхозной, где тип вод был азональным хлоридно-гидрокарбонатным магниево-натриево-кальциевым.

Таблица 5. Балльная оценка гидрохимической трансформации р. Мышки по первичным индикаторам, содержание нефтепродуктов и тип воды

Table 5. Ball score of the hydrochemical transformation of the Myshka River by primary indicators, oil content and type of water

Номер точки отбора	Дата отбора	Сумма баллов	Ассимиляционный потенциал	Нефтепродукты, мг/дм^3	Тип воды*
Мыш01	25.06.2018	7	Не превышен	0,029	Хлоридно-гидрокарбонатная магниево-натриево-кальциевая
	07.04.2020	10	Верхняя допустимая граница	2,520	Гидрокарбонатная магниево-кальциевая
Мыш03	28.09.2018	7	Не превышен	0,033	Гидрокарбонатная кальциево-магниевая
	07.04.2020	8	Не превышен	0,014	Хлоридно-гидрокарбонатная магниево-кальциевая
Мыш04	19.09.2017	5	Не превышен	–	Гидрокарбонатная кальциево-магниевая
Мыш05	19.09.2017	6	Не превышен	–	Гидрокарбонатная кальциево-магниевая
	28.09.2018	7	Не превышен	0,190	Хлоридно-гидрокарбонатная магниевая
	07.04.2020	10	Верхняя допустимая граница	0,068	Хлоридно-гидрокарбонатная магниевая
Мыш06	28.09.2018	6	Не превышен	0,022	Гидрокарбонатная магниево-кальциевая
Мыш07	19.09.2017	5	Не превышен	–	Гидрокарбонатная магниево-кальциевая
Мыш08	19.09.2017	7	Не превышен	–	Гидрокарбонатная кальциевая
	28.09.2018	13	Превышен	0,171	Гидрокарбонатная натриево-кальциевая
	07.04.2020	13	Превышен	0,031	Хлоридно-гидрокарбонатная натриево-магниевая
Мыш09	19.07.2016	10	Верхняя допустимая граница	–	Гидрокарбонатная кальциево-магниевая
	19.09.2017	7	Не превышен	–	Гидрокарбонатная кальциево-магниевая
	28.09.2018	10	Верхняя допустимая граница	0,165	Хлоридно-гидрокарбонатная магниево-натриево-кальциевая
	07.04.2020	15	Превышен	0,904	Хлоридно-гидрокарбонатная магниевая

* По классификации О. А. Алекина [12].

П р и м е ч а н и е. Полужирным шрифтом выделена выявленная трансформация.

В сентябре 2018 г. азональный хлоридно-гидрокарбонатный магниево-натриево-кальциевый тип вод фиксировался на участке реки ниже выпуска очистных сооружений поверхностных сточных вод. В целом за весь период наблюдения на данном участке заметно устойчивое нарушение соотношения ионов в сторону увеличения доли хлоридов (до 31 %-экв) и натрия (до 35 %-экв).

Высокое содержание в воде водных объектов хлорид-иона и иона натрия в период отсутствия поверхностного стока может свидетельствовать о трансформации подземных вод на территории города за счет применения в зимний период противогололедных солевых смесей.

Интересно отметить такой факт, что высокие концентрации хлоридов и натрия в поверхностных водах с трансформацией типа вод на территории г. Минска отмечались даже в апреле 2020 г. после беснежной зимы 2019/20 гг., когда противогололедные смеси не применялись. Отсюда можно сделать вывод, что в г. Минске в результате длительного (многолетнего) применения противогололедных песчано-солевых смесей сформировалась локальная гидрохимическая аномалия, охватывающая поверхностные и подземные воды, характеризующаяся высокими концентрациями хлоридов и натрия, а также изменением типа воды на азональный хлоридный натриевый (в комбинации с другими анионами и катионами). Можно предположить, что подобная ситуация характерна и для других городов Беларуси, однако для подтверждения этого факта необходимо проведение гидрохимических исследований в других городах.

Результаты оценки гидрохимической трансформации и ассимиляционного потенциала р. Мышки в соответствии с методикой, описанной в работе [10], показали, что содержание как макро-компонентов, так и биогенных элементов в воде водных объектов на территории городов – величина весьма непостоянная, зависящая от множества факторов. Поэтому для получения более точной картины техногенной гидрохимической трансформации водных объектов необходимо проведение их опробования в течение нескольких лет.

В целом (см. табл. 5), в наиболее неблагополучном состоянии водоток находился в апреле 2020 г. В четырех из пяти точек опробования ассимиляционный потенциал водотока был превышен или находился на грани превышения (балл ≥ 10), что свидетельствует о неспособности водного объекта справляться с гидрохимической нагрузкой, природные возможности к самоочищению и восстановлению благоприятного экологического состояния уже исчерпаны. Об антропогенной нагрузке свидетельствуют и величины содержания в воде нефтепродуктов, превышающие ПДК в 1,4–18,0 раза. Максимальное количество нефтепродуктов ($2,5 \text{ мг}/\text{дм}^3$) зафиксировано в апреле 2020 г. в остаточном водоеме в верховьях реки (Мыш01).

Если рассматривать усредненные за период наблюдения величины ассимиляционного потенциала водотока от верховьев до устья, то можно выделить следующие тенденции (рис. 9):

- более высокий балл ассимиляционного потенциала (8–9), но не превышающий границу 10 баллов, присущ остаточным водоемам с нарушенной проточностью в верховьях реки (Мыш01/03);
- в среднем течении, где проточность лучше и пойма представлена резервными озелененными территориями, балл ассимиляционного потенциала ниже и составляет 5–8, что свидетельствует о способности водотока справляться с гидрохимической нагрузкой (Мыш04/05/06/07);
- в устье на участке выше и ниже выпуска очистных сооружений поверхностных сточных вод, река не справляется с антропогенной нагрузкой, здесь фиксируется превышение ассимиляционного потенциала, гидрохимическая трансформация составляет 11–12 баллов (Мыш08/09).

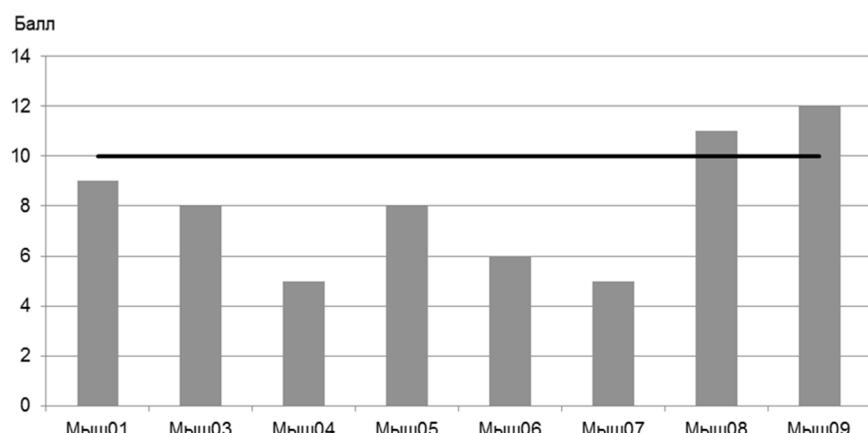


Рис. 9. Ассимиляционный потенциал р. Мышки (усредненные значения за 2017–2020 гг.)

Fig. 9. Assimilation potential of the Myskha River (averaged values for 2017–2020)

В табл. 6 представлено содержание тяжелых металлов (кадмия, свинца, меди, цинка, никеля и марганца) в воде р. Мышки по данным опробования в июле 2020 г. Для кадмия, свинца, меди и никеля превышения ПДК в воде обследованных участков р. Мышки не выявлены.

В то же время на всем протяжении реки характеризуется повышенным содержанием марганца. Превышения над фоновым содержанием (ПДК) составили 3,5–15,1 раза. Следует отметить, что концентрации марганца выше ПДК многократно фиксируются в воде водоемов и водотоков, а также в подземных водах Беларусь, и часто обусловлены природными условиями.

Об антропогенной нагрузке, превышающей ассимиляционную способность водотока, свидетельствуют концентрации цинка в воде реки в нижнем течении выше (в 1,7 раза выше фонового содержания / ПДК) и ниже (в 2,8 раза выше фонового содержания / ПДК) выпуска очистных сооружений поверхностных сточных вод дождевых коллекторов Запад, Юго-Запад.

На загрязнение воды в реке за счет поверхностного стока с территории города в то же время указывает и рост в 3,2 раза содержания меди вниз по течению реки с 1,12 мкг/дм³ (верховья) до 3,61 мкг/дм³ (устье).

В межгодовой динамике гидрохимическое состояние р. Мышки относительно стабильно. Наиболее выраженными являются сезонные колебания, которые связаны главным образом с поступлением талого поверхностного стока в зимне-весенний период. Во время снеготаяния река не справляется с антропогенной нагрузкой, о чем свидетельствует азональный тип воды с высокой долей хлоридов и натрия.

Таблица 6. Содержание тяжелых металлов в воде р. Мышки, мкг/дм³

Table 6. The content of heavy metals in the water of the Myshka River, mkg/dm³

Точка отбора	Кадмий	Свинец	Медь	Цинк	Никель	Марганец
Мыш03	0,69	1,95	1,12	10,8	0,55	575,5
Мыш05	0,52	2,85	1,36	9,9	4,6	132,1
Мыш08	0,13	3,85	2,94	27,5	3,2	208,5
Мыш09	0,36	4,15	3,61	45,1	2,8	214,0
Предельно допустимая концентрация для водоемов рыбохозяйственного назначения [10]	5	100	–	–	10	–
Природное фоновое содержание металлов в воде водоемов / водотоков в бассейне р. Днепр (ПДК) [10]	–	–	4,50	16,00	–	38,00

П р и м е ч а н и е. Полужирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК/ОДК.

В более благоприятном состоянии находится участок реки в среднем течении, где проточность лучше и пойма представлена резервными озелененными территориями.

Менее благоприятное состояние присуще остаточным водоемам с нарушенной проточностью в верховьях реки.

Наибольшую нагрузку река испытывает в устье на участке выше и ниже выпуска очистных сооружений поверхностных сточных вод. На данном участке река не справляется с антропогенной нагрузкой, ассимиляционный потенциал составляет 11–12 баллов.

В целом, в нижнем течении вода реки содержит тяжелые металлы в больших концентрациях по сравнению с верховьем, такая же тенденция характерна и для донных отложений.

Содержание тяжелых металлов и нефтепродуктов в донных отложениях р. Мышки в г. Минске представлено в табл. 7.

Оценка валового содержания показала, что превышения над гигиеническими нормативами, установленными для почв, отмечаются для кадмия и цинка в 100 % проб донных отложений, меди и нефтепродуктов – в 60, свинца – в 40 % проб донных отложений.

Расчет коэффициента контрастности свидетельствует о неоднородности поступления и накопления металлов в донных отложениях: для кадмия, свинца и никеля – <2, цинка – 6, марганца – 7, меди – 11, нефтепродуктов – 99,8.

Поэлементный анализ содержания изучаемых тяжелых металлов показал, что донные отложения повсеместно загрязнены кадмием и цинком.

Таблица 7. Содержание тяжелых металлов и нефтепродуктов в донных отложениях р. Мышки**Table 7. The content of heavy metals and oil products in the bottom sediments of the Myshka River**

Номер точки отбора	Описание донных отложений	Химическое вещество, мг/кг почвы						
		НП	Cd	Pb	Cu	Zn	Ni	Mn
М-76 (Мыш03)	Растительные остатки (фрагменты стеблей, корней), мелкие камни, фрагменты раковин моллюсков	97,0	4,43	22,73	17,18	56,20	14,94	720,40
В-75 (Мыш05)	Иловатые, содержат растительные остатки (фрагменты стеблей, веток, корней)	73,0	3,74	22,06	18,01	68,17	14,97	444,33
М-71 (Мыш08)	Иловатые, с включением растительных остатков, раковин моллюсков, мелких камешков, субстанций антропогенного происхождения (полиэтилен)	1599,0	3,36	32,60	44,73	122,1	17,17	297,92
М-72 (Мыш09)	Иловатые, с включением растительных остатков (фрагменты стеблей)	7287,0	3,83	36,21	181,54	326,5	19,99	419,8
ПДК/ОДК [6]		100,0*	0,5	32,0**	33,0	55,0	20,0	1500,0

П р и м е ч а н и е. Полужирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК/ОДК.

* Источник [7].

** Источник [8].

Коэффициент концентрации (K_c), рассчитанный по отношению к гигиеническим нормативам, для кадмия составляет от 5,0 (низкая степень загрязнения) до 8,9 (средняя степень загрязнения). Среднее содержание элемента в донных отложениях превышает гигиенический норматив в 7,1 раза (средняя степень загрязнения).

Коэффициент концентрации цинка, который варьирует от 1,0 до 5,9, свидетельствует о низкой и средней степени загрязнения донных отложений данным металлом. При этом среднее значение содержания цинка равно 2,7 ОДК (низкая степень загрязнения).

Для свинца K_c изменяется от 0,7 до 1,1 со средним значением, равным 0,9. По максимальному значению K_c донные отложения характеризуются низкой степенью загрязнения.

Содержание меди в донных отложениях имеет K_c от 0,5 до 5,5 (средняя степень загрязнения) со средним показателем, равным 2,3 (низкая степень загрязнения).

Загрязнение донных отложений никелем и марганцем ни на одном из участков водотока не выявлено. Концентрация никеля в донных отложениях невысокая: с K_c от 0,5 до 0,99, со средним значением 0,8. Для марганца K_c находится в диапазоне от 0,07 до 0,5, среднее его значение достигает 0,3.

Для нефтепродуктов K_c изменяется в широком диапазоне – от 0,7 до 72,9, со средним значением, равным 24,0. По среднему и максимальному значениям содержания нефтепродуктов донные отложения характеризуются высокой и очень высокой степенью загрязнения соответственно.

Оценка содержания тяжелых металлов и нефтепродуктов в донных отложениях р. Мышки, отобранных выше (М-71) и ниже (М-72) выпуска очистных сооружений поверхностного стока дождевых коллекторов Запад, Юго-запад, показала, что ниже по течению наблюдается увеличение концентрации всех исследованных веществ. При этом различия составляют: для марганца – 1,4 раза, цинка – 2,7, меди – 4,1, нефтепродуктов – 4,6 раза, для остальных элементов различия незначительные (рис. 10).

По содержанию меди и цинка донные отложения из низкой степени загрязнения (выше выпуска) переходят в среднюю степень загрязнения (ниже выпуска).

На данных участках реки в донных отложениях сформировались полиэлементные аномалии из нефтепродуктов, кадмия, свинца, меди и цинка. Концентрации нефтепродуктов крайне высокие – до 16,0–72,9 ПДК.

В донных отложениях выше выпуска очистных сооружений аномалия из ассоциации элементов образует следующий ряд (по коэффициентам концентрации, рассчитанным по отношению к ПДК/ОДК): НП_{16,0} – Cd_{6,7} – Zn_{2,2} – Cu_{1,4} – Pb_{1,0}. Расчет суммарного коэффициента загрязнения Z_c , равного 23,3, позволяет отнести донные отложения данного отрезка р. Мышки к категории высокой степени загрязнения.

Ниже выпуска очистных сооружений поверхностного стока аномалия представляет собой следующий геохимический ряд: НП_{72,9} – Cd_{7,7} – Zn_{5,9} – Cu_{5,5} – Pb_{1,1}. По коэффициенту загрязнения Z_c , который равен 89,1, донные отложения здесь имеют очень высокую степень загрязнения за счет аномально высокого содержания нефтепродуктов.

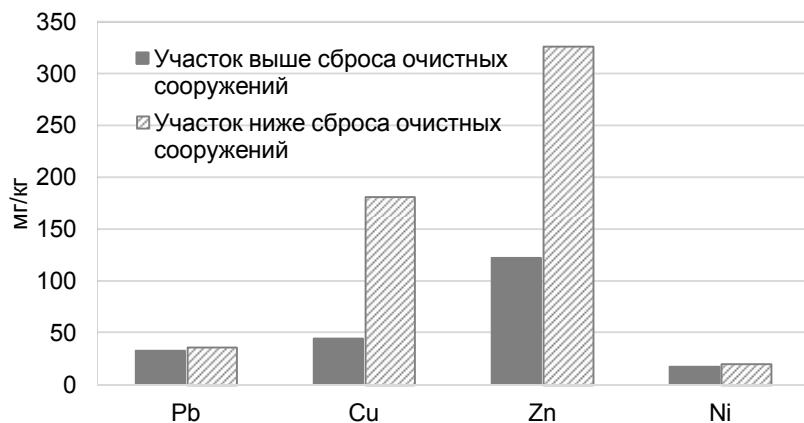


Рис. 10. Содержание тяжелых металлов в донных отложениях р. Мышки выше и ниже выпуска очистных сооружений поверхностного стока дождевых коллекторов Запад, Юго-Запад

Fig. 10. Content of heavy metals in bottom sediments of the Myshka River above and below the urban runoff treatment facilities outlet of the Zapad, Jugo-Zapad collectors

Заключение. Несмотря на существенную антропогенную трансформацию долины и водного режима реки, выявленное загрязнение почв, воды и донных отложений, долинный комплекс р. Мышки сохраняет высокий потенциал для выполнения необходимых функций в качестве экологического коридора II порядка. На участках поймы р. Мышки благодаря устойчивому гидрологическому режиму растительность достаточно устойчиво сохраняет свою специфику. Природные комплексы здесь имеют достаточно высокое эколого-рекреационное значение. Благодаря высоким запасам ассимиляционной фитомассы, особенно в сообществах поймы, фотосинтетическая активность растительных комплексов способствует охлаждению воздуха, что приводит к снижению температуры подстилающей поверхности в жаркий летний день на 2–4 °C по сравнению с рядом расположенных застроенными территориями. В жилых кварталах, непосредственно прилегающих к данному экологическому коридору, проживает около 110 тыс. жителей, но на большей части этой территории отсутствует рекреационное благоустройство, что обуславливает высокую рекреационную значимость долины р. Мышки. Учитывая достаточно высокое биологическое разнообразие, познавательную, образовательную и эстетическую ценность пойменных ландшафтов в долине реки, здесь целесообразно создание системы природных парков (или единого парка) с экологическими тропами, минимальной рекреационной инфраструктурой, приближенной к жилым массивам, при условии восстановления целостности гидрографической сети.

В целом, почвенный покров долины р. Мышки трансформирован незначительно и в ряде случаев сохранился в естественном виде, что обусловливает накопление различных химических веществ в течение более длительного периода по сравнению с трансформированными городскими почвами. Наиболее загрязненными почвами характеризуется участок долины р. Мышки, расположенный в низкой прирусовой пойме, где сформировалась педогеохимическая аномалия из ассоциации элементов, включающей нефтепродукты, кадмий, никель, цинк, свинец, медь и марганец.

В межгодовой динамике гидрохимическое состояние р. Мышки относительно стабильно. Наиболее выраженными являются сезонные колебания, связанные главным образом с поступлением талого поверхностного стока в зимне-весенний период. В период снеготаяния река не справляется с антропогенной нагрузкой, о чем свидетельствует азональный тип воды с высокой долей хлоридов и натрия. В более благоприятном состоянии находится участок реки в среднем течении, где проточность лучше и пойма представлена резервными озелененными территориями. Менее благоприятное состояние присуще остаточным водоемам с нарушенной проточностью в верховьях реки. Наибольшую нагрузку река испытывает в устье на участке выше и ниже выпуска очистных сооружений поверхностных сточных вод. На данном участке река не справляется с антропогенной нагрузкой, асимиляционный потенциал составляет 11–12 баллов.

Об антропогенной нагрузке, превышающей асимиляционную способность водотока, свидетельствуют концентрации цинка в воде реки в нижнем течении выше (в 1,7 раза выше фонового содержания / ПДК) и ниже (в 2,8 раза выше фонового содержания / ПДК) выпуска очистных сооружений поверхностных сточных вод дождевых коллекторов Запад, Юго-Запад. На загрязнение воды в реке за счет поверхностного стока с территории города указывает и рост в 3,2 раза содержания меди вниз по течению реки с 1,12 мкг/дм³ (верховья) до 3,61 мкг/дм³ (устье).

В нижнем течении реки содержатся тяжелые металлы в больших концентрациях по сравнению с верховьем, такая же тенденция характерна и для донных отложений. На участках устья реки в донных отложениях сформировались полизлементные аномалии из нефтепродуктов, кадмия, свинца, меди и цинка. Концентрации нефтепродуктов крайне высокие – до 16,0–72,9 ПДК. По содержанию меди и цинка донные отложения из низкой степени загрязнения (выше выпуска очистных сооружений поверхностного стока) переходят в среднюю степень загрязнения (ниже выпуска очистных сооружений поверхностного стока).

В донных отложениях выше выпуска очистных сооружений аномалия из ассоциации элементов образует следующий ряд (по коэффициентам концентрации, рассчитанным по отношению к ПДК/ОДК): НП_{16,0} – Cd_{6,7} – Zn_{2,2} – Cu_{1,4} – Pb_{1,0}. Суммарный коэффициент загрязнения Z_c , равный 23,3, позволяет отнести донные отложения данного отрезка р. Мышки к категории высокой степени загрязнения. Ниже выпуска аномалия имеет следующий геохимический ряд: НП_{72,9} – Cd_{7,7} – Zn_{5,9} – Cu_{5,5} – Pb_{1,1}. Суммарный коэффициент загрязнения – 89,1, донные отложения здесь имеют очень высокую степень загрязнения за счет аномально высокого содержания нефтепродуктов.

Список использованных источников

1. Ahern, John F. Greenways as Strategic Landscape Planning: Theory and Application / John F. Ahern // Wageningen University, The Netherlands. – Wageningen, 2002. – 156 p.
2. Емельянова, О. В. Ельцовка-1 как один из определяющих элементов экологического каркаса городов / О. В. Емельянова, Н. В. Горшко, О. В. Мигаутина // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2017. – № 3. – С. 55–71.
3. Зборовская, М. И. Значение водных объектов в формировании экологического каркаса урбанизированной территории / М. И. Зборовская, В. А. Зимнюков, Н. Ю. Козимиров // Экологические и биологические системы. – М., 2015. Т. 20 : Ecological studies, hazards, solutions. – С. 20–23.
4. Никитин, А. В. Структура экологического каркаса города Казани / А. В. Никитин, Н. М. Мингазова // Экологический консалтинг. – 2012. – № 4 (48). – С. 15–18.
5. Волшаник, В. В. Классификация городских водных объектов / В. В. Волшаник, А. А. Суздалева. – М. : Изд-во АСВ, 2008. – 112 с.
6. Национальная система мониторинга окружающей среды в Республике Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ecoinfo.by/uploads/archive/Book2015/1-soil-25-11.pdf>. – Дата доступа: 11.10.2020.
7. ГН 2.1.7.12-1-2004 Перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве // Сборник нормативных документов по разделу коммунальной гигиены. – Минск, 2005.
8. Предельно допустимые концентрации нефтепродуктов в землях (включая почвы) для различных категорий земель. Утв. Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь, 12.03.2012, № 17/1.
9. Нормативы предельно допустимых концентраций подвижных форм никеля, меди и валового содержания свинца в землях (включая почвы), расположенных в границах населенных пунктов, для различных видов территориальных зон по преимущественному функциональному использованию территорий населенных пунктов. Утв. Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь, 19.11.2009, № 125.
10. Городская среда: геоэкологические аспекты / В. С. Хомич [и др.]. – Минск : Беларуская наука, 2013. – 301 с.
11. Овчарова, Е. П. Состояние водных объектов урбанизированных территорий (на примере городов Минской области) / Е. П. Овчарова, Е. В. Санец, О. В. Кадацкая // Природопользование. – Минск, 2016. – Вып. 29. – С. 65–75.
12. Об установлении нормативов качества воды поверхностных водных объектов. Утв. Постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, 30.03.2015, № 13.
13. Алекин, О. А. Основы гидрохимии / О. А. Алекин. – Л. : Гидрометеоиздат, 1970. – 290 с.

References

1. Ahern John F. Greenways as Strategic Landscape Planning: Theory and Application. Wageningen University, The Netherlands. Wageningen, 2002, 156 p.
2. Yemel'yanova O. V., Goroshko N. V., Migautina O. V. Yel'tsovka-1 kak odin iz opredelyayushchikh elementov ekologicheskogo karkasa gorodov [Yeltsovka-1 as one of the defining elements of the ecological framework of cities]. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika = Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Applied ecology. Urbanism, 2017, no. 3, pp. 55–71. (in Russian)
3. Zborovskaya M. I. Zimnyukov V. A., Kozimirov N. Yu. Znacheniye vodnykh ob'yektov v formirovaniyu ekologicheskogo karkasa urbanizirovannoy territorii [The value of water bodies in the ecological framework formation of urbanized territory]. Ekologicheskiye i biologicheskiye sistemy = Ecological and biological systems. Moscow, 2015, vol. 20: Ecological studies, hazards, solutions, pp. 20–23. (in Russian)

4. Nikitin A. V., Mingazova N. M. *Struktura ekologicheskogo karkasa goroda Kazani* [Structure of the ecological framework of the city of Kazan]. *Ekologicheskij konsalting = Environmental consulting*, 2012, no. 4 (48), pp. 15–18. (in Russian)
5. Volshanik V. V., Suzdaleva A. A. *Klassifikatsiya gorodskikh vodnykh ob'yektorov* [Classification of urban water bodies]. Moscow, DIA Publishing House, 2008, 112 p. (in Russian)
6. *Natsional'naya sistema monitoringa okruzhayushchey sredy v Respublike Belarus'* [National system of environmental monitoring in the Republic of Belarus]. Available at: <http://www.ecoinfo.by/uploads/archive/Book2015/1-soil-25-11.pdf> (accessed October 11, 2020). (in Russian)
7. GN 2.1.7.12-1-2004 *Perechen' predel'no dopustimykh kontsentratsiy (PDK) i oriyentirovchno dopustimykh kontsentratsiy (ODK) khimicheskikh veshchestv v pochve* [Standard 2.1.7.12 1 2004. The list of maximum permissible concentrations (MPC) and approximate permissible concentrations (APC) of chemicals in the soil]. *Sbornik normativnykh dokumentov po razdelu kommunal'noy gigiyeny* [Proc. of normative documents on the section of communal hygiene]. Minsk, 2005. (in Russian)
8. *Predel'no dopustimye kontsentratsii nefteproduktov v zemlyakh (vklyuchaya pochyv)* dlya razlichnykh kategoriy zemei' [Maximum permissible concentration of oil products in lands (including soils) for different categories of lands]. Approved by the Decree of the Ministry of Health of the Republic of Belarus, March 12, 2012, no. 17/1. (in Russian)
9. *Normativy predel'no dopustimykh kontsentratsiy podvizhnykh form nikelya, medi i valovogo soderzhaniya svintsa v zemlyakh (vklyuchaya pochyv), raspolozhennykh v granitsakh naseleennykh punktov, dlya razlichnykh vidov teritorial'nykh zon po preimushchestvennomu funktsional'nomu ispol'zovaniyu territoriy naseleennykh punktov* [Standards for maximum permissible concentrations of mobile forms of nickel, copper and gross lead content in lands (including soils) located within the boundaries of settlements, for various types of territorial zones for the predominant functional use of the territories of settlements]. Approved by the Resolution of the Ministry of Health of the Republic of Belarus, November 19, 2009, no. 125. (in Russian)
10. Khomich V. S. [et al.]. *Gorodskaya sreda: geoekologicheskiye aspeky* [Urban environment: geoecological aspects]. Minsk, 2013, 301 p. (in Russian)
11. Aucharova E. P., Sanets E. V., Kadetskaya O. V. *Sostoyaniye vodnykh ob'yektorov urbanizirovannykh territoriy (na primere gorodov Minskoy oblasti)* [The state of water bodies in urbanized territories (on the example of cities in the Minsk region)]. *Prirodopol'zovaniye = Nature Management*, 2016, Issue 29, pp. 65–75. (in Russian)
12. *Ob ustanovenii normativov kachestva vody poverkhnostnykh vodnykh ob'yektorov* [On the establishment of water quality standards for surface water bodies]. Approved by the Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, March 30, 2015, no. 13. (in Russian)
13. Alekin O. A. *Osnovy gidrokhimii* [Fundamentals of hydrochemistry]. Leningrad, 1970, 290 p. (in Russian)

Информация об авторах

Санец Елена Васильевна – кандидат географических наук, заведующий лабораторией оптимизации геосистем, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: elena-sanets@yandex.by

Очарова Елена Петровна – кандидат географических наук, научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: geosystem1@rambler.ru

Кравчук Людмила Александровна – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kravchu-k@yandex.ru

Савченко Светлана Валентиновна – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Бокая Галина Михайловна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Information about the authors

Elena V. Sanets – Ph. D. (Geography), Head of the Laboratory of Geosystems Optimization, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: elena-sanets@yandex.by

Alena P. Aucharova – Ph. D. (Geography), Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: geosystem1@rambler.ru

Ludmila A. Kravchuk – Ph. D. (Geography), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kravchu-k@yandex.ru

Svetlana V. Savchenko – Ph. D. (Geological and Mineralogical), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Halina M. Bokaya – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРИГОДНОСТИ ОСАДКОВ ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ)

Е. Н. Басалай

Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларусь, Брест, Беларусь

Аннотация. Изложены результаты исследований состава и свойств осадков городских сточных вод (ОГСВ) очистных сооружений девяти разных по величине городов Брестской области по трем группам показателей: агрохимическим, микробиологическим и содержанию тяжелых металлов. Приводится сравнение полученных для ОГСВ данных с аналогичными показателями для местных почв, литературными данными по свойствам ОГСВ, сопоставление с нормативными требованиями к ОГСВ в РФ, странах ЕС, США и др. Показано, что при высоком удобрительном потенциале ОГСВ городов Брестской области, обусловленном высоким содержанием органических и питательных веществ (азота, фосфора, калия), использование ОГСВ в сельском хозяйстве ограничивается его микробиологическим загрязнением и высокими содержаниями тяжелых металлов (цинка, меди, никеля, хрома), превышающими предельно допустимые концентрации, установленные требованиями к ОГСВ в РФ и других странах. На основании полученных результатов и приведенного в статье обзора о способах обращения с ОГСВ в разных странах мира дается оценка пригодности ОГСВ городов Брестской области и Беларуси в целом для различных видов использования. При недостаточной разработанности нормативно-правового регулирования в области обращения с ОГСВ наиболее приемлемыми для условий Беларуси способами обращения с ОГСВ в среднесрочной перспективе являются применение их для рекультивации нарушенных земель, в качестве изолирующего слоя на полигонах твердых коммунальных отходов, в городском и лесном хозяйстве (в цветоводстве, парках, скверах, питомниках и т. п.), а также анаэробное сбраживание с получением органических удобрений и энергии.

Ключевые слова: городские очистные сооружения; осадки городских сточных вод; агрохимические показатели; тяжелые металлы; микробиологическое загрязнение; использование осадков сточных вод.

Для цитирования. Басалай Е. Н. Геоэкологическая оценка пригодности осадков городских сточных вод для различных видов использования (на примере Брестской области) // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 93–117.

GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF SUITABILITY OF URBAN WASTEWATER SLUDGE FOR VARIOUS USES (ON THE EXAMPLE OF BREST REGION)

E. N. Basalai

The Polesie Agrarian Ecological Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Brest

Abstract. The article considers the results of studies of the composition and properties of urban wastewater sludge (UWWS) of treatment facilities in 9 different cities of Brest region in three groups of indicators: agrochemical, microbiological, and heavy metal content. A comparison of the data obtained for UWWS with similar indicators for local soils, literature data on the properties of UWWS, comparison with the regulatory requirements for UWWS in the Russian Federation, the EU, the USA, etc. is presented. Shown that with the high fertilizing potential of UWWS in cities of Brest region, due to high content of organic and nutrient substances (nitrogen, phosphorus, potassium), the use of UWWS in agriculture is limited by its microbiological contamination and high concentrations of heavy metals (zinc, copper, nickel, chromium), exceeding maximum permissible concentrations established by the requirements for UWWS in the Russian Federation and other countries. Based on the results obtained and the review given in the article about the ways of handling UWWS in different countries of the world, an assessment of the suitability of UWWS in cities of Brest region and Belarus as a whole for various types of use is given. With insufficient development of regulatory and legal regulation in the field of the management of UWWS, the most acceptable methods for the conditions of Belarus for the management of UWWS in the medium term are their use for the reclamation of disturbed land, as an insulating layer in landfills of solid municipal waste, in urban and forestry (in floriculture, in parks, squares, nurseries, etc.), and also anaerobic digestion with the production of organic fertilizers and energy.

Keywords: urban wastewater treatment plants; urban wastewater sludge; agrochemical indicators; heavy metals; microbiological pollution; use of wastewater sludge.

For citation. Basalai E. N. Geoecological assessment of suitability of urban wastewater sludge for various uses (on the example of Brest region). *Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 93–117.

Введение. Побочным продуктом очистки городских сточных вод (СВ) являются осадки, количество которых ежегодно повышается в связи с увеличением численности городского населения, интенсивным развитием городов-спутников, повышением эффективности работы очистных сооружений (ОС), вводом в эксплуатацию новых либо реконструкцией действующих городских ОС. Об этом свидетельствует ежегодное увеличение мощностей ОС во всех административных областях Беларуси (рис. 1).

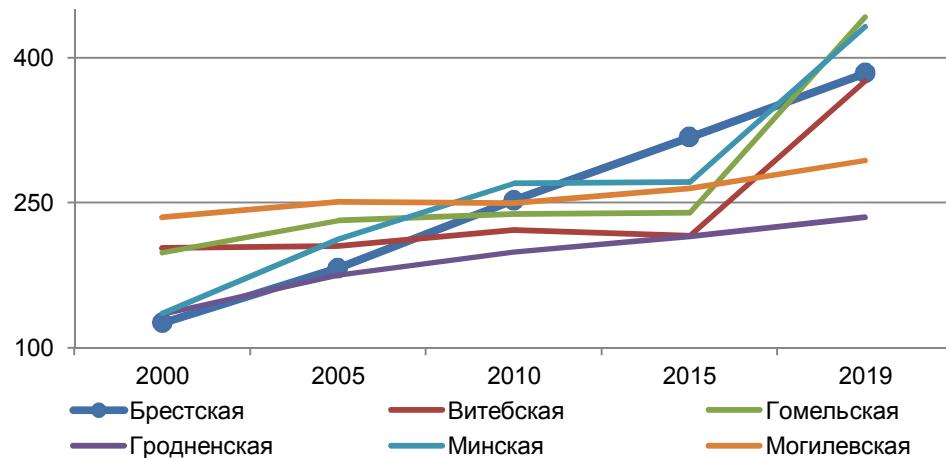


Рис. 1. Изменение мощности очистных сооружений в областях Республики Беларусь, 2000–2019 гг., млн м³/год

Fig. 1. Change in capacity of wastewater treatment plants in regions of the Republic of Belarus, 2000–2019, million m³ per year

Осадки городских сточных вод (ОГСВ) представлены твердой фракцией СВ, которая состоит из минеральных и органических веществ, выделенных из СВ в процессе их очистки методом отстаивания (осадок сооружений биологической очистки хозяйственно-фекальных СВ – сырой осадок), и комплекса микроорганизмов, участвовавших в процессе биологической очистки СВ и выведенных из технологического процесса (избыточный активный ил). Преобладающая часть осадков ОГСВ в Беларуси, в том числе в Брестской области, проходит обработку на иловых площадках (ИП) для обезвоживания и подсушивания. При отсутствии альтернативных вариантов обращения с образующимися ОГСВ ИП становятся объектами длительного хранения данного вида отходов. В реестре объектов хранения и захоронения отходов Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь зарегистрировано 159 объектов хранения ОГСВ [4], на которых по состоянию на 2019 г. накоплено 12,781 млн т осадков при ежегодном образовании более 2 млн ОГСВ в год (2,152 млн т за 2019 г.) [1].

Одним из важнейших критериев при выборе и экономическом обосновании способов обращения с ОГСВ являются ставки экологического налога за захоронение и хранение отходов производства. В Беларуси для ОГСВ действует льготный режим налогообложения в соответствии с указом Президента Республики Беларусь от 31 декабря 2019 г. № 503 «О налогообложении». Например, за хранение осадков сооружений биологической очистки хозяйственно-фекальных СВ 3-го класса опасности ставка налога за хранение на 2020 г. составляет 0,17 руб/т, в то время как для отходов такого же класса опасности – 11,64 руб/т. Для ила активного ОС 4-го класса опасности – 0,13 руб/т, в то время как для отходов аналогичного класса опасности 5,82 руб/т [21]. В этой связи действующие в Беларуси ставки экологического налога за хранение опасных отходов производства являются очень низкими, не стимулируют работу по поиску вариантов использования ОГСВ и хранение становится практически безальтернативным вариантом обращения с ОГСВ. Возможности же размещения ОГСВ на объектах хранения в Беларуси практически исчерпаны [5], поэтому поиск альтернативных вариантов обращения с накопленными и вновь образующимися ОГСВ имеет важное значение и является весьма актуальным.

Накопленные ОГСВ специфичны по составу, условиям образования и обработки, что напрямую зависит от специализации городов и наличия в них различных предприятий, качества поступающих на очистку СВ и способов обработки СВ и ОГСВ, и отражает особенности функционирования конкретного населенного пункта. Однако в Беларуси работы по инвентаризации и комплексному обследованию ИП, ранжированию размещенных на них ОГСВ в зависимости от их состава и свойств, способов обработки и возможностей использования не проведены [5]. ОГСВ не являются объектами аналитического контроля и как отдельный объект нормативно-правового регулирования в области обращения с отходами не выделяются. При этом имеются научный задел и опыт работы в области разработки нормативно-технических документов, регламентирующих их использование. При наличии заинтересованности с учетом накопленного отечественного опыта и опыта стран ЕС в данной области могут быть разработаны и введены в действие технические нормативные правовые акты (ТНПА), регулирующие обращение с ОГСВ [5].

ОГСВ содержат в своем составе значительное количество органических и минеральных веществ, обладают высоким энергетическим потенциалом и при проведении соответствующей обработки могут использоваться в различных отраслях промышленности, энергетики и в сельском хозяйстве [25]. Например, для отдельных категорий ОГСВ в Беларуси разработаны единичные локальные ТНПА, которые устанавливают требования к отдельным продуктам из ОГСВ: ТУ BY 300003249.001-2009 «Удобрение и почвоулучшающая добавка из осадков сточных вод» (УП «Витебскводоканал»), ТУ BY 291000450.001-2015 «Удобрение органическое на основе обезвоженного сброшенного осадка сточных вод» (КУПП «Брестский мусороперерабатывающий завод»), ТУ BY 500031747.001-2018 «Удобрение органоминеральное «ОРГАМИН» (ОАО «Щучинагрохимсервис»), ТУ BY 290061754.006-2019 «Удобрения органические улучшенного состава с добавлением осадков сточных вод» (Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси), ТУ BY 290061754.007-2019 «Почвогрунты с использованием осадков сточных вод» (Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси) и др.

Цель работы – изучить состав и свойства ОГСВ, накопленных на ИП в городах Брестской области, и дать оценку их пригодности для различных видов использования.

Для достижения поставленной цели выполнен обзор литературных источников по данной теме, изучены способы обращения и законодательство в области обращения с ОГСВ в разных странах мира, осуществлен отбор и проведены аналитические испытания проб ОГСВ ОС в городах Брестской области, оценена пригодность ОГСВ для различных видов использования по агрохимическим и микробиологическим показателям, содержанию тяжелых металлов (ТМ).

Методика и объекты исследований. В качестве объектов исследований выбраны ОС восьми городов Брестской области, на которых функционируют ИП, в том числе четырех средних (Берёза, Лунинец, Ивацевичи, Кобрин) и четырех малых (Пружаны, Малорита, Каменец, Ганцевичи) городов. Также исследован ОГСВ г. Бреста, который поступает на КПУП «Брестский мусороперерабатывающий завод» и проходит обработку в анаэробных условиях [15]. Исследования в большинстве городов проводились в 2018–2019 гг., в Кобрине – в 2016–2020 гг., в Бресте – в 2017–2020 гг.

Отбор проб ОГСВ проводили на ИП в соответствии с ГОСТ Р 56226-2014 и РД РБ 0212.6-2002. Изучение проб выполняли по комплексу агрохимических показателей по стандартным методикам: рН_{KCl} (ГОСТ 27979-88), содержание влаги и сухого остатка (ГОСТ 26713-85), содержание органического вещества и золы (ГОСТ 27980-88), общих азота (ГОСТ 26715-85), фосфора (ГОСТ 26717-85), калия (ГОСТ 26718-85). В ОГСВ было также определено содержание валовых форм ТМ: свинца, цинка, кадмия, меди, никеля, кобальта, хрома, железа и марганца (ГОСТ 26929-94 и ГОСТ 30178-96). Пробы, отобранные для химического анализа, упаковывали и транспортировали в герметичных емкостях из химически нейтрального материала.

Отбор проб для микробиологических исследований осуществляли согласно ГОСТ 17.4.4.02-84 и ГОСТ Р 56226-2014, определение микробиологических показателей – в соответствии с Инструкцией 4.2.10-12-9-2006. Для оценки санитарно-микробиологических свойств ОГСВ были соблюдены условия асептики: отбор проб производили стерильным инструментом, пробы были помещены в стерильную тару, упакованы в сумку-холодильник и сразу доставлены в лабораторию на анализ, который выполнялся в тот же день.

При подготовке статьи использована собранная и обобщенная автором информация об ОС Брестской области за 2016–2020 гг. и авторские результаты аналитических испытаний. Всего отобрано и проанализировано 143 образца ОГСВ, в том числе в Кобрине – 67 образцов, Малорите – 27, Берёзе – 21, Бресте – 9, Пружанах – 6, Каменце – 5, Лунинце – 2, Ганцевичах и Ивацевичах – по 3 образца). Привлекались также литературные источники по рассматриваемой проблеме, материалы Европейского статистического бюро [22], Директива по осадкам сточных вод 86/278/EЭС [33] и Стандарт по использованию и удалению ОГСВ [18].

Результаты и их обсуждение. Обработка ОГСВ в большинстве стран ЕС осуществляется с применением перспективных безотходных технологий с минимальным воздействием на компоненты природной среды без ухудшения качества вод, почв и растительности. Например, в целях защиты морской среды в 1998 г. Европейским законодательством введен запрет на сброс ОГСВ в морские воды. В этой связи в зависимости от сложившихся традиций и региональных геоэкологических условий в странах ЕС наиболее распространены следующие способы обращения с образующимися объемами ОГСВ:

1) прямое использование в сельском хозяйстве после обработки. Наиболее распространенными методами обработки в ЕС являются анаэробная (применяется в 88,9 % стран ЕС) и аэробная (применяется в 74,0 % стран ЕС). В течение 2016 г. в сельском хозяйстве применено от 0,5 % (Эстония) до 80,9 % (Ирландия) образующихся объемов ОГСВ. В объемном отношении наибольшее количество ОГСВ применяется в сельском хозяйстве в Испании (941,6 тыс. т/год, или 80,2 % от образованного объема ОГСВ), Германии (423,5 тыс. т/год, или 23,6 %) и Франции (351,0 тыс. т/год, или 34,9 % от образованного объема ОГСВ). В некоторых странах ЕС (Нидерландах, Словакии, Мальте) ОГСВ в сельском хозяйстве не применялся (данные за 2016 г.) [22];

2) компостирование с последующим использованием в зеленом строительстве либо сельском хозяйстве: в течение 2016 г. подвергалось компостированию от 0,1 % (Румыния) до 84,2 % (Эстония) образованного ОГСВ. В объемном отношении наибольшее количество переработанных подобным образом ОГСВ отмечено во Франции (287 тыс. т/год, или 28,5 % от образованного объема ОГСВ) Германии (200,5 тыс. т/год, или 11,2 %), и Венгрии (127,8 тыс. т/год, или 59,4 % от образованного объема ОГСВ) [22]. Компостирование ОГСВ в 2016 г. не применялось в Испании, Бельгии, Греции, Португалии, Республике Кипр, Мальте.

Основная масса ОГСВ г. Лондона (80 %) применяется на сельскохозяйственных землях, 60 % сброшенного ОГСВ г. Парижа используется в сельском хозяйстве в качестве удобрения и компостов, весь ОГСВ с завода из Броммы, г. Стокгольм (Швеция) полностью используется на сельскохозяйственных землях, весь объем ОГСВ г. Хельсинки (Финляндия) компостируется с последующим использованием в зеленом строительстве. ОГСВ г. Вильнюса (Литва) используется для производства компоста и гранул для рекультивации карьеров и зеленых массивов, обезвоженный и стабилизированный ОГСВ г. Варшавы (Польша) находит применение в сельском хозяйстве. Значительная часть смеси сырого осадка и избыточного активного ила станции очистки бытовых СВ «Paljassaare» г. Таллина (Эстония) уплотняется, компостируется с торфом и реализуется населению в качестве плодородного грунта.

3) сжигание: в 2016 г. было сожжено от 0,2 % (Румыния) до 92 % (Нидерланды) образующихся объемов ОГСВ; наибольшие объемы термической обработки ОГСВ в 2016 г. среди стран ЕС приходились на Германию (1142,9 тыс. т/год, или 63,7 % от образованного объема ОГСВ), Нидерланды (319,8 тыс. т/год, или 92 %) и Францию (136 тыс. т/год, или 13,5 % от образованного объема ОГСВ) [22]. На крупных городских ОС в Швейцарии, Италии, Нидерландах, Франции, Польше и других странах ЕС хорошо известным и апробированным методом является сжигание ОГСВ в кипящем слое. В течение 2010–2015 гг. в странах ЕС по инициативе Германии, в которой образуется больше всего ОГСВ в Европе (1794,4 тыс. т за 2016 г.), осуществлены меры по уменьшению количества ОГСВ, вынесенного внутривенно, и увеличению объемов сжигания ОГСВ. В соответствии с Указом об ОГСВ, принятым 18 января 2017 г. в Германии, после переходных периодов в 12 и 15 лет применение ОГСВ в сельском хозяйстве будет возможно только для ОС мощностью до 50 000 ЭН (эквивалент населения). Проектом Федерального плана обращения с отходами, принятым 11 февраля 2017 г. в Австрии, предусмотрено значительное сокращение использования ОГСВ в сельском хозяйстве: в течение десятилетнего переходного периода отказаться от прямого сельскохозяйственного использования, а также прекратить компостирование ОГСВ на ОС мощностью равной либо превышающей 20 000 ЭН. Например, весь объем образованного ОГСВ станции очистки СВ «Ebswien» г. Вены (Австрия) обезвоживается и сжигается.

4) на полигоны в развитых странах ЕС поступает менее 16 % образованного ОГСВ, однако в некоторых странах подобным способом утилизируется более половины образованных объемов ОГСВ: например, 100 % на Мальте и 73,9 % в Румынии. В объемном отношении наибольшее количество утилизируемых подобным образом ОГСВ за 2016 г. отмечено в Румынии (177,6 тыс. т/год, или 73,9 % от образованного объема ОГСВ), Испании (120,9 тыс. т/год, или 10,3 %) и Греции (34,0 тыс. т/год, или 28,4 % от образованного объема ОГСВ) [22].

Таким образом, в странах ЕС преобладают способы обращения с ОГСВ, направленные на применение ОГСВ в качестве удобрений в виде обработанного ОГСВ либо в составе компоста, а также использование методов термической утилизации ОГСВ [1]. Например, в 2016 г. 48 % от общего количества образованных ОГСВ в 24 странах ЕС было использовано путем внутривенного внесения

(32 % в сельском хозяйстве в виде обработанного ОГСВ и 16 % в виде компоста) и 31 % направлен на сжигание (рис. 2, А). Согласно [34], именно использование ОГСВ путем внесения в землю и его сжигание станут основными методами утилизации ОГСВ в странах ЕС.

Среди других способов обращения с ОГСВ выделяется разновидность депонирования ОГСВ для восстановления высушенным ОГСВ рельефа в карьерах и оврагах, повышения отметок поверхности низин в Греции, Дании, Бельгии, Финляндии, Италии, Франции [37].

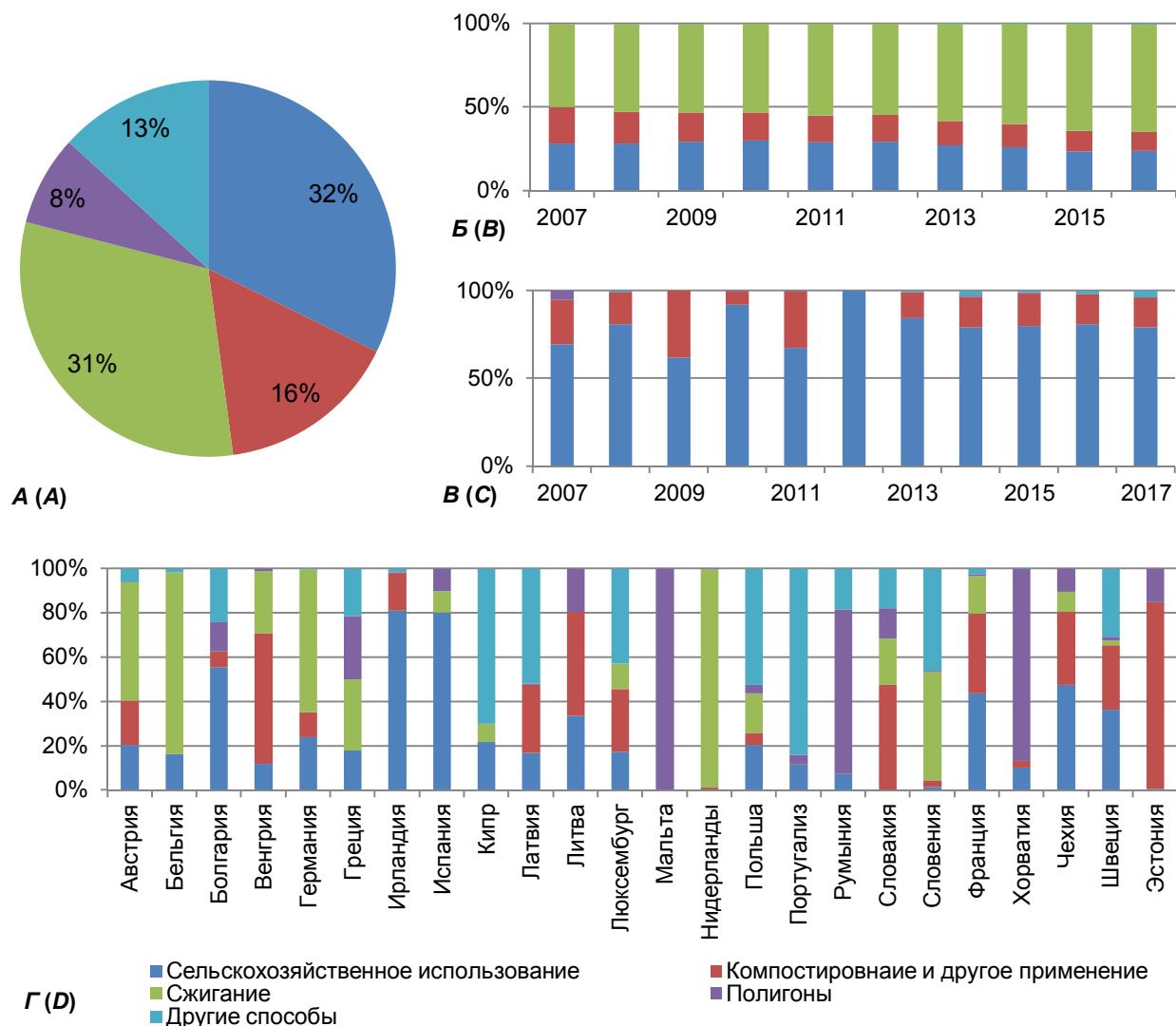


Рис. 2. Направления использования ОГСВ в странах ЕС (по [22]):
А – соотношение направлений использования ОГСВ в 24* странах ЕС в 2016 г.;
Б – в Германии в течение периода 2007–2016 гг.; В – в Ирландии в течение периода 2007–2017 гг.;
Г – соотношение направлений использования по каждой из 24* стран ЕС в 2016 г.

*В связи с отсутствием данных по Дании, Италии и Финляндии

Fig. 2. Areas of the use of UWWs in the EU countries (according to [22]):
A – the ratio of areas of the use of UWWs in 24* EU countries in 2016;
B – in Germany during the period 2007-2016; C – in Ireland during the period 2007–2017;
D – the ratio of areas of the use for each of the 24* EU countries in 2016.

*Due to the lack of data for Denmark, Italy and Finland

Необходимо отметить, что в странах ЕС действует Директива по осадкам сточных вод 86/278/EEC [33], которая устанавливает требования к ОГСВ при их применении в сельском хозяйстве с учетом охраны окружающей среды. Она регламентирует поступление ТМ в почву, устанавливая предельно допустимые концентрации (ПДК) в ОГСВ для шести элементов – свинца, кадмия, меди, никеля, хрома, ртути, а также допустимые нормы содержания элементов в почве, в которую они вно-

сятся [35]. Многими странами ЕС дополнительно установлены более жесткие требования, которые учитывают также содержание различных загрязняющих веществ в ОГСВ (например, антибиотиков, гормонов и др.) [1], что на практике оказалось равносильно запрету на внесение продуктов переработки ОГСВ в почву и повлекло снижение применения ОГСВ в сельском хозяйстве.

В Китае 29,3 % ОГСВ в 2019 г. было внесено в землю в качестве удобрения, 26,7 % сожжено и 20,1 % складировано на свалках; при этом в стране функционировало 5476 муниципальных ОС, на которых образовалось 39,0 млн т ОГСВ влажностью 80 % [39]. В то же время более 80 % ОГСВ утилизируется крайне неэффективно [32, 38]. В связи с тем, что накопление ОГСВ в Китае растет в среднем на 13 % в год с 2007 г. [40], а общие выбросы парниковых газов вследствие сжигания ОГСВ в Китае в 2019 г. достигли $108,18 \cdot 10^8$ кг в эквиваленте СО₂, китайские ученые рекомендуют отказаться от этой практики в пользу, например, анаэробного брожения с последующим внесением в каменистую почву с высоким содержанием известняка [32, 39].

На территории Беларуси, России и Украины обработка ОГСВ в основном осуществляется на ИП с последующим хранением на них либо вывозом подсущенного ОГСВ на полигоны твердых коммунальных отходов (ТКО). Так, весь объем образующегося на Бортнической станции аэрации (Киев, Украина) ОГСВ вывозится на ИП, а после естественной сушки и стабилизации захоранивается на полигонах. На Курьяновской и Люберецкой станциях аэрации (Москва, Россия) применяются несколько способов обработки ОГСВ – складирование на ИП и последующий вывоз на полигоны ТКО, сжигание, а также обработка в метантенках с получением тепло- и электроэнергии. На Минской станции аэрации на 18 ИП поступает 720–810 т/сут обезвоженного ОГСВ влажностью около 80 % (данные за 2019 г.) с последующей утилизацией на полигонах ТКО; подобная схема обращения с отходами применяется на ОС большинства городов Брестской области (за исключением гг. Столина, Бреста, Барановичей). ОГСВ ОС г. Бреста с 2012 г. поступает на КПУП «Брестский мусороперерабатывающий завод» (до 2012 г. – на 7 ИП) и проходит обработку в метантенках с выработкой тепло- и электроэнергии; после обезвоживания на предприятии образуется примерно 83–104 т/сут ОГСВ влажностью около 80 % (данные за 2019 г.).

Необходимо отметить, что во многих европейских странах правительства предоставляют налоговые льготы для производителей биогаза, образующегося при анаэробном сбраживании отходов. Например, в Дании на этих условиях эксплуатируются 18 биогазовых заводов, способных ежегодно перерабатывать 1,2 млн т биомассы (75 % отходов животноводства и 25 % других органических отходов) [3]. В фермерских хозяйствах ЕС, Канады, Австралии действуют установки производительностью 100–200 м³ биогаза в сутки [3]. В Китае эксплуатируются более 5 млн семейных биогазовых установок, производящих суммарно около 1,3 млрд м³ биогаза в год. В Индии также действуют несколько миллионов установок, в последние годы здесь ежегодно вводится 5–6 тыс. небольших установок по выработке биогаза [36].

На территории Брестской области ИП функционируют в Пинске, Кобрине, Берёзе, Ивацевичах, Каменце, Пружанах, Малорите, Дрогичине, Иваново, Ганцевичах, Лунинце и Ляховичах. ОГСВ районных центров Брестской области в основном относятся к отходам 4-го класса опасности (например, ОГСВ гг. Малориты, Берёзы, Ганцевичей); некоторые ОГСВ относятся к отходам 3-го класса опасности (например, ОГСВ г. Кобрина). Ежегодно количество образованных на территории области ОГСВ возрастает (рис. 3).

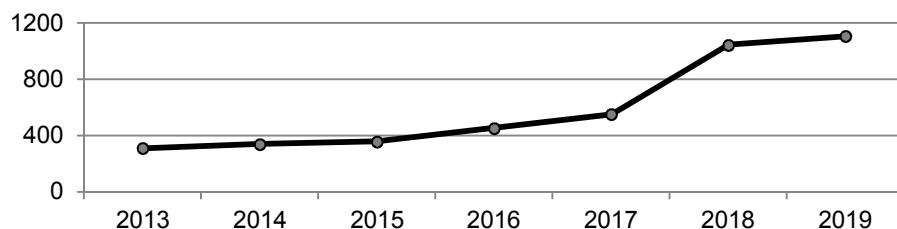


Рис. 3. Динамика образования ОГСВ на территории Брестской области, 2013–2019 гг., тыс. т/год

Fig. 3. Dynamics of UWWS formation in the territory of Brest region, 2013–2019, thousand tons per year

В Беларуси ОГСВ как отдельный объект нормативно-правового регулирования не выделяются. Деятельность по обращению с ним регулируется Законом Республики Беларусь «Об обращении с отходами», в соответствии с которым отходы должны использоваться в соответствии с требованиями данного документа и иных актов законодательства, в том числе обязательных для соблюдения ТНПА.

К ним относятся технические регламенты Республики Беларусь, технические кодексы установившейся практики (ТКП), государственные стандарты Республики Беларусь, общегосударственные классификаторы Республики Беларусь, технические условия (ТУ) и стандарты организаций. Если для отходов в Беларуси разработан ряд ТНПА, в отношении ОГСВ они в настоящее время отсутствуют. Согласно Общегосударственному классификатору отходов, образующихся в Республике Беларусь, осадки сооружений биологической очистки хозяйственно-фекальных СВ относятся к опасным отходам 3-го класса (умеренно опасные), а ил активный ОС – к 4-му классу (малоопасные). При этом на большинстве ОС Беларуси данные отходы смешиваются и, согласно действующему положению, смеси присваивается класс опасности более опасного ее компонента.

Способы обработки ОГСВ в Беларуси в основном заключаются в их обезвоживании и размещении на ИП. Возможными вариантами обращения с ОГСВ являются следующие.

1. Размещение, при котором ОГСВ хранится на объектах хранения либо захоранивается на полигонах ТКО. В настоящее время среди различных способов обработки ОГСВ в Беларуси преобладает их размещение на объектах хранения. В реестре объектов хранения и захоронения отходов объектами хранения ОГСВ являются: ИП, иловые пруды, илонакопители, иловые и песковые площадки, отстойники осадка биологических прудов, площадки для хранения осадка, а также ОС, на территории которых хранятся осадки. При этом лишь малая часть (около 12 %) объектов хранения оснащена противофильтрационными экранами либо другими вариантами защиты. Поскольку обработка (подсушивание) ОГСВ на ИП, осуществляется путём фильтрации и подземного удаления воды, что основано на способности осадка при длительном его нахождении на ИП к расслаиванию на твердую фракцию, жидкую (иловую воду) и газообразную (метан, углекислый газ), с последующим хранением является основным способом обращения с ОГСВ в Брестской области и в Беларуси в целом, то негативные последствия подобного хранения на ИП зачастую сопровождаются формированием экологических, экономических и социальных проблем [2]. В связи с этим необходимо выполнять ряд рекомендаций по экологически безопасному функционированию ИП [2].

2. Внесение в землю. Компостирование и использование в сельском хозяйстве в качестве органического удобрения, в зеленом строительстве, лесном и садово-парковом хозяйстве, промышленном цветоводстве, при рекультивации нарушенных земель (карьеров, полигонов отходов, дорожных насыпей) в качестве почвоулучшающих добавок позволяет обеспечивать возврат питательных элементов в основные геохимические циклы. Несмотря на высокий удобрительный потенциал ОГСВ, необходимо четкое соблюдение множества условий и ограничений (например, установление состава и свойств ОГСВ, расчет доз внесения, учет требований к охране окружающей среды и др.), что существенно усложняет реализацию их удобрительного потенциала. Поэтому данный метод применяется в Беларуси в довольно ограниченном объеме. В настоящее время в Беларуси отсутствуют государственные стандарты, устанавливающие требования к ОГСВ при их использовании по любым направлениям, в том числе внесении в землю. При этом действующие государственные стандарты Российской Федерации ГОСТ Р 54651-2011, ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 [8] и ГОСТ Р 54534-2011 [9] в Беларуси не приняты в качестве национальных. Поэтому в Беларуси действуют ТНПА локального уровня – технические условия (ТУ). Проект ТУ, разработанный юридическим лицом, должен пройти государственную экологическую экспертизу и при положительном ее заключении – государственную регистрацию в БелГИСС. Зарегистрированные ТУ имеют срок действия 5 лет, по истечении которых он может быть продлен.

2.1. Применение в качестве удобрений. В качестве ориентиров для разработки ТУ могут применяться государственные стандарты России в отношении применения ОГСВ в качестве удобрений в сельском хозяйстве [8], а также зарегистрированные и действующие в Беларуси ТУ иных организаций. Например, в Беларуси разработаны и зарегистрированы ТУ на удобрение органоминеральное «Оргамин» на основе ОГСВ г. Минска, отходов растительного и животного происхождения и негашеной извести для сельскохозяйственных культур [26], удобрение и почвоулучшающую добавку на основе ОГСВ г. Витебска [30], удобрение органическое на основе обезвоженного сброшенного осадка СВ г. Бреста, которое предназначено для повышения плодородия низкобонитетных почв сельскохозяйственных угодий, увеличения урожайности сельскохозяйственных культур и качества газонов [15], и др.

2.2. Использование для рекультивации. Согласно санитарным нормам и правилам «Требования к обращению с отходами производства и потребления» (утверждены Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 30.12.2006 № 143) допускается применение твердых отходов 3-го и 4-го классов опасности для рекультивации земель, не предназначенных в дальнейшем для выращивания сельскохозяйственных культур. В качестве ориентиров для разработки ТУ могут применяться государственные стандарты России в отношении применения ОГСВ для рекультивации нарушенных земель [9], а также зарегистрированные и действующие в Беларуси ТУ иных организаций.

Например, в Беларуси действуют разработанные и утвержденные ТУ «Составы для рекультивации нарушенных земель», которые регламентируют использование ОГСВ для горнотехнической и биологической рекультивации.

2.3. Применение в качестве изолирующего слоя на полигонах ТКО. В соответствии с ТКП 17.11-02-2009 (02120/02030) отходы производства 4-го класса опасности, имеющие однородную структуру с размером фракций до 250 мм, в водной вытяжке которых содержание токсичных отходов находится на уровне фильтрата ТКО, и характеризующиеся БПК_{полн.} и ХПК не более 300 мг О₂/дм³, могут использоваться в качестве изолирующего слоя. Этой характеристике, при проведении соответствующих аналитических испытаний, могут соответствовать либо ОГСВ, либо его компоненты (например, подсущенный ил ОС). В данном случае для применения ОГСВ в качестве изолирующего слоя необходимо разработать и утвердить соответствующее ТНПА.

3. Энергетическое использование. Направлено на обезвреживание с получением энергии (моносжигание и сжигание в смеси с другими отходами, анаэробное сбраживание) либо без получения энергии (аэробная стабилизация).

3.1. Биогазовые технологии. Подобные методы реализованы на территории Брестской области. Например, на ОС г. Барановичи с 2017 г. функционирует биогазовый комплекс, в котором ОГСВ проходит стадию анаэробного сбраживания в метантенках. Благодаря работе комплекса в регионе улучшилась экологическая обстановка за счет уменьшения площади эксплуатируемых ИП, сокращения выбросов метана и углекислого газа (что сказалось на отсутствии неприятных запахов), а также вредного воздействия на почвенный покров и подземные воды. Функционирование биогазового комплекса позволило уменьшить объемы складируемого ОГСВ на ИП ОС г. Барановичи в течение 2019 г. в 10,8 раза (со 109,8 тыс. до 7,5 тыс. м³), переработать 1983,7 т ОГСВ, получить 920,6 тыс. м³ биогаза и выработать 3 059,0 Гкал теплознергии и 2 918,1 МВт·ч электроэнергии [24]. В настоящее время обезвоженный ОГСВ после анаэробного сбраживания размещается на ИП.

С 2011 г. в г. Бресте функционирует КПУП «Брестский мусорорперерабатывающий завод», на котором применяются технологии механико-биологической переработки жидких отходов (ОГСВ г. Бреста) и ТКО: жидкофазное анаэробное сбраживание ОГСВ (смесь сырого осадка из первичных отстойников и избыточного активного ила вторичных отстойников) в метантенках и механико-биологическая переработка ТКО с твердофазным сбраживанием пищевых отходов в ферmentорах [15]. Благодаря функционированию завода отпада необходимость отчуждения земель под ИП, на 20 % увеличился ресурс действующего полигона ТКО за счет извлечения и переработки биологической фракции, улучшилась экологическая обстановка в регионе за счет снижения выбросов метана, углекислого газа и сероводорода и вредного воздействия на почвенный покров и грунтовые воды. На предприятии за счет переработки ОГСВ и пищевых отходов в течение 2019 г. получено 6 231,4 тыс. м³ биогаза, выработано 11 194,0 Гкал теплознергии и 13 018,2 МВт·ч электроэнергии. Сброшенный ОГСВ используется в качестве перстилающего слоя на полигонах ТКО.

3.2. Моносжигание и сжигание в смеси с другими отходами. В Беларуси сжигание ОГСВ в смеси с другими отходами, а также моносжигание ОГСВ не применяется. При подобном использовании ОГСВ необходимо руководствоваться Экологическими нормами и правилами (ЭкоНиП) 17.01.06-001-2017, в которых приведены нормы выбросов загрязняющих веществ (например, диоксидов серы, азота, твердых частиц, ТМ и др.) при сжигании отходов, в том числе ОГСВ. Требования ЭкоНиП согласуются с требованиями Директивы по осадкам сточных вод 86/278/EEC [33]. Предполагается внедрение комплекса по моносжиганию ОГСВ в рамках реконструкции Минской очистной станции [1].

4. Применение в производственных процессах. В литературе имеется информация о таких способах обращения с ОГСВ, как: производство топливных брикетов [6, 11, 23], например, на основе ОГСВ г. Гомеля и древесных отходов в различных соотношениях (с 25, 50 и 67%-ным содержанием древесных отходов и без их добавления) получение четырех марок брикетов [23]; производство керамических строительных материалов [25, 28] и асфальтобетона [19]; получение вермикомпостов, например, на основе ОГСВ г. Минска и различных субстратов (листового опада, соломы, торфа и т. д.) [12, 17] и др.

Для принятия решения о способе обращения с ОГСВ важно иметь информацию об их составе и свойствах, в том числе физико-химических (содержание органического вещества и биогенных элементов, влажности и pH), содержании загрязняющих веществ (например, ТМ) и санитарно-микробиологических (наличие бактерий, вирусов, простейших и гельминтов). В этой связи нами были отобраны ОГСВ девяти городов Брестской области и проанализированы по трем группам показателей – агрохимическим и микробиологическим свойствам и содержанию ТМ.

I. Агрохимические свойства ОГСВ

Содержание биогенных элементов и органического вещества, влажность и pH влияют на выбор дозы внесения ОГСВ при их применении в сельском хозяйстве в качестве удобрений. Требования

к агрохимическим характеристикам ОГСВ для внесения в почву законодательно установлены в РФ (табл. 1) при применении удобрений органических на основе ОГСВ в соответствии с ГОСТ Р 54651-2011, при применении ОГСВ в качестве удобрений в соответствии с ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 [8] или для рекультивации нарушенных земель в соответствии с ГОСТ Р 54534-2011 [9]. В Республике Беларусь, в странах ЕС и США требования к агрохимическим характеристикам ОГСВ не установлены.

В ходе экспериментальных исследований в образцах ОГСВ городов Брестской области выявлено высокое содержание органического вещества, достаточное содержание азота и фосфора (см. табл. 1), которые соответствуют нормативам РФ [8, 9]. При этом необходимо учесть, что, несмотря на потребность растений в питательных веществах для роста и развития, чрезмерное использование ОГСВ может привести к накоплению азота и фосфора в почве и представлять риск загрязнения почвенного покрова, подземных и поверхностных вод за счет выщелачивания и последующей их радиальной и латеральной миграции, выноса плоскостной эрозией (фосфор связан с частицами почвы).

Измеренные средние значения pH_{KCl} ОГСВ в городах Брестской области колебались от 6,6 (ОГСВ г. Бреста) до 7,1 (ОГСВ г. Берёзы). Все исследованные ОГСВ Брестской области соответствуют установленным в РФ нормативам при применении ОГСВ в качестве удобрений [8] и для рекультивации нарушенных земель [9] (рис. 4, А).

Наибольшее среднее содержание органического вещества в ОГСВ г. Берёзы (95,2 %), наименьшее – в ОГСВ г. Бреста (77,4 %) (рис. 4, Б), что значительно выше минимального содержания, установленного российским нормативом [8]. Высокое содержание органического вещества в ОГСВ городов Брестской области обусловливает значительный потенциал ОГСВ как мелиоранта для улучшения гумусного состояния почв.

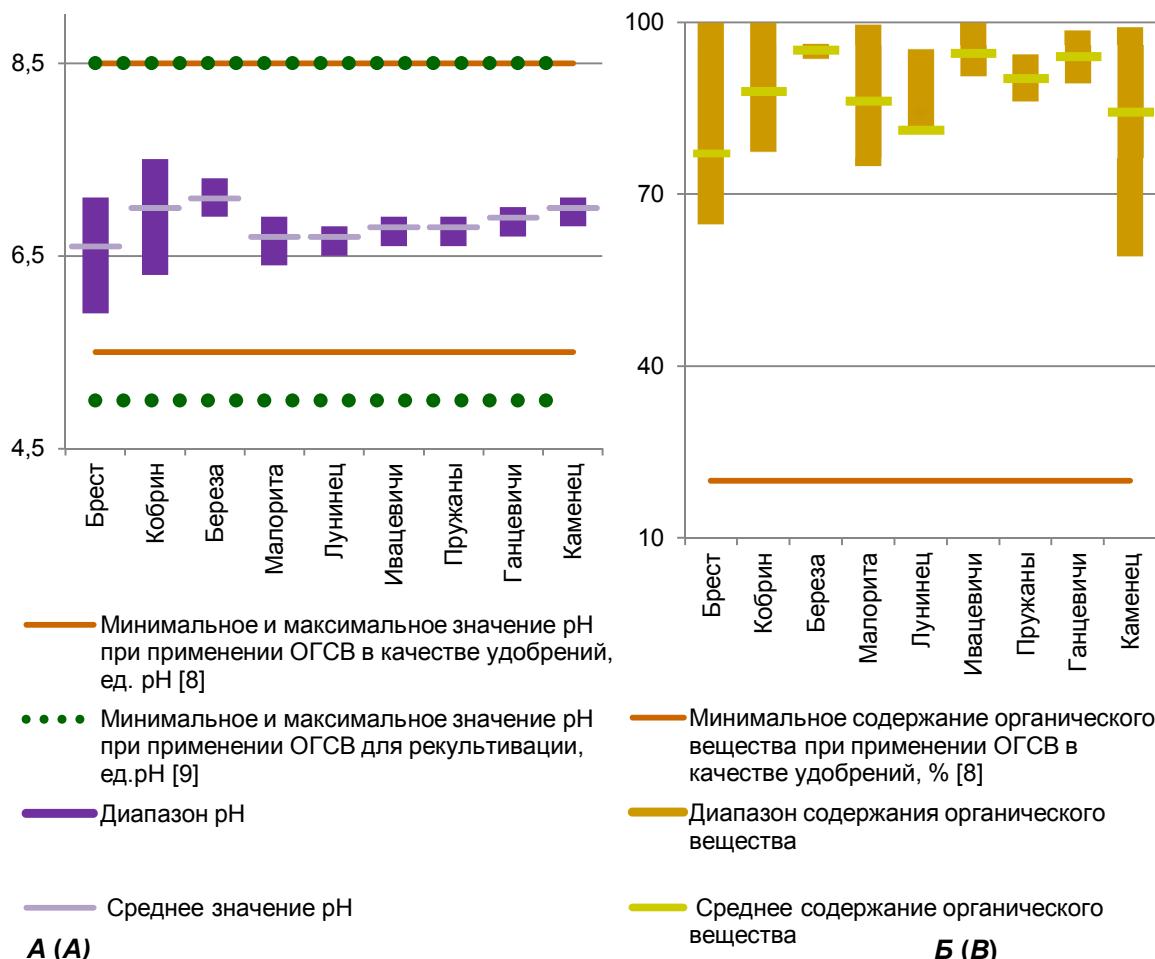


Рис. 4. Кислотность солевой вытяжки, ед. pH (А) и содержание органического вещества, % (Б) в ОГСВ городов Брестской области и их соответствие установленным в РФ нормативам [8, 9]

Fig. 4. Acidity of the salt extract, units of pH (A) and content of organic matter, % (B) in UWWS of cities of Brest region and their compliance with the standards established in the Russian Federation [8, 9]

Таблица 1. Агрохимические свойства ОГСВ городов Брестской области**Table 1. Agrochemical properties of UWWS of cities of Brest region**

Показатель, город (количество образцов)		pH, ед. pH	Органиче- ское ве- щество, %	Зола, %	Сухое веще- ство, %	Влага, %	Азот общий, %	Фосфор общий, %	Калий общий, %
ОГСВ THU Bendix и другие показатели	Брест (9)	6,6	77,4	22,6	15,8	84,2	2,4	1,9	0,30
	Кобрин (67)	7,0	88,1	11,9	19,1	80,9	3,7	4,0	0,26
	Береза (21)	7,1	95,2	4,8	11,6	88,4	3,4	3,0	0,28
	Малорита (27)	6,7	86,4	13,6	12,3	87,7	4,4	3,1	0,25
	Лунинец (2)	6,7	81,4	18,6	33,2	66,8	3,2	2,5	0,20
	Ивацевичи (3)	6,8	94,6	5,4	16,9	83,1	3,1	5,1	0,22
	Пружаны (6)	6,8	90,3	9,7	20,8	79,2	2,9	5,0	0,21
	Ганцевичи (3)	6,9	94,1	5,9	17,8	82,2	3,2	1,5	0,23
	Каменец (5)	7,0	84,5	15,5	29,5	70,5	4,3	4,3	0,36
	Значения показателей по ТУ BY 291000450.001-2015 ¹	Не ниже 5,5	Не менее 20	—	Не менее 20	Не более 80	Не менее 0,6	Не менее 1,5	н/н
Показатели THU для использования в качестве удобрений	Значение показателей по ТУ BY 300003249.001-2009 ²	5,5–8,5	Не менее 50	—	—	Не более 75	Не менее 0,6	Не менее 1,5	Не менее 0,6
	Значение показателей по ТУ BY 500031747.001-2018 ³ [26]	н/н ⁴	Не более 71	н/н	н/н	н/н	Не более 0,6–5,0	Не более 1,5–4	Не более 0,6–4
	Значения показателей по ГОСТ Р 54651-2011 для органических удобрений, производимых на основе ОГСВ	6,0–8,0	Не менее 30	н/н	н/н	Не более 70	Не менее 0,6	Не менее 0,7	Не менее 0,1
	Значение показателя по ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 [8] для применения ОГСВ в качестве удобрений	5,5–8,5 ⁵	Не менее 20	н/н	н/н	н/н	Не менее 0,6	Не менее 1,5	н/н
	Значение показателя по ГОСТ Р 54534-2011 [9] при применении ОГСВ для рекультивации нарушенных земель	Биол.	5,0–8,5	н/н	Не менее 65–85	Не менее 35	н/н	Не менее 0,5	н/н
		Технич.	5,0–8,5	н/н	Не менее 65 ⁶	Не менее 45 ⁶	н/н	н/н	н/н
Субрегиональный фон для пахотных земель [16]		5,75	—	—	—	—	—	0,008	0,016

¹ Значение показателей для ТУ BY 291000450.001-2015 «Удобрение органическое на основе обезвоженного сброшенного осадка сточных вод» (КУПП «Брестский мусороперерабатывающий завод»).

² Значение показателей для ТУ BY 300003249.001-2009 «Удобрение и почвоулучшающая добавка из осадков сточных вод» (УП «Витебскводоканал»).

³ Значение показателей по ТУ BY 500031747.001-2018 «Удобрение органоминеральное «Оргамин» (ОАО «ЩучинАгроХимСервис») [26].

⁴ н/н – не нормируется.

⁵ ОГСВ, имеющие значение реакции среды (pH_{KCl}) более 8,5, могут использоваться на кислых почвах в качестве органоизвестковых удобрений.

⁶ ОГСВ массовой долей сухого вещества 25–45 %, массовой долей золы 35–65 %, ХПК водной вытяжки более $700 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$ и БПК₅ водной вытяжки более $500 \text{ mgO}_2/\text{dm}^3$ могут быть использованы для технической рекультивации нарушенных земель при условии создания противофильтрационных экранов и дренажной системы.

Попадая в почву в составе ОГСВ и разлагаясь в теплое время года, азот высвобождается в доступной для растений форме [24] и снижает потребность во внесении азотных удобрений. Содержание общего азота (рис. 5, А) в ОГСВ городов Брестской области колеблется в среднем от 2,4 % (ОГСВ г. Бреста) до 4,4 % (ОГСВ г. Малориты) и в 4–7 раз превышает требуемое минимальное содержание вещества в ОГСВ согласно нормативам РФ [8, 9].

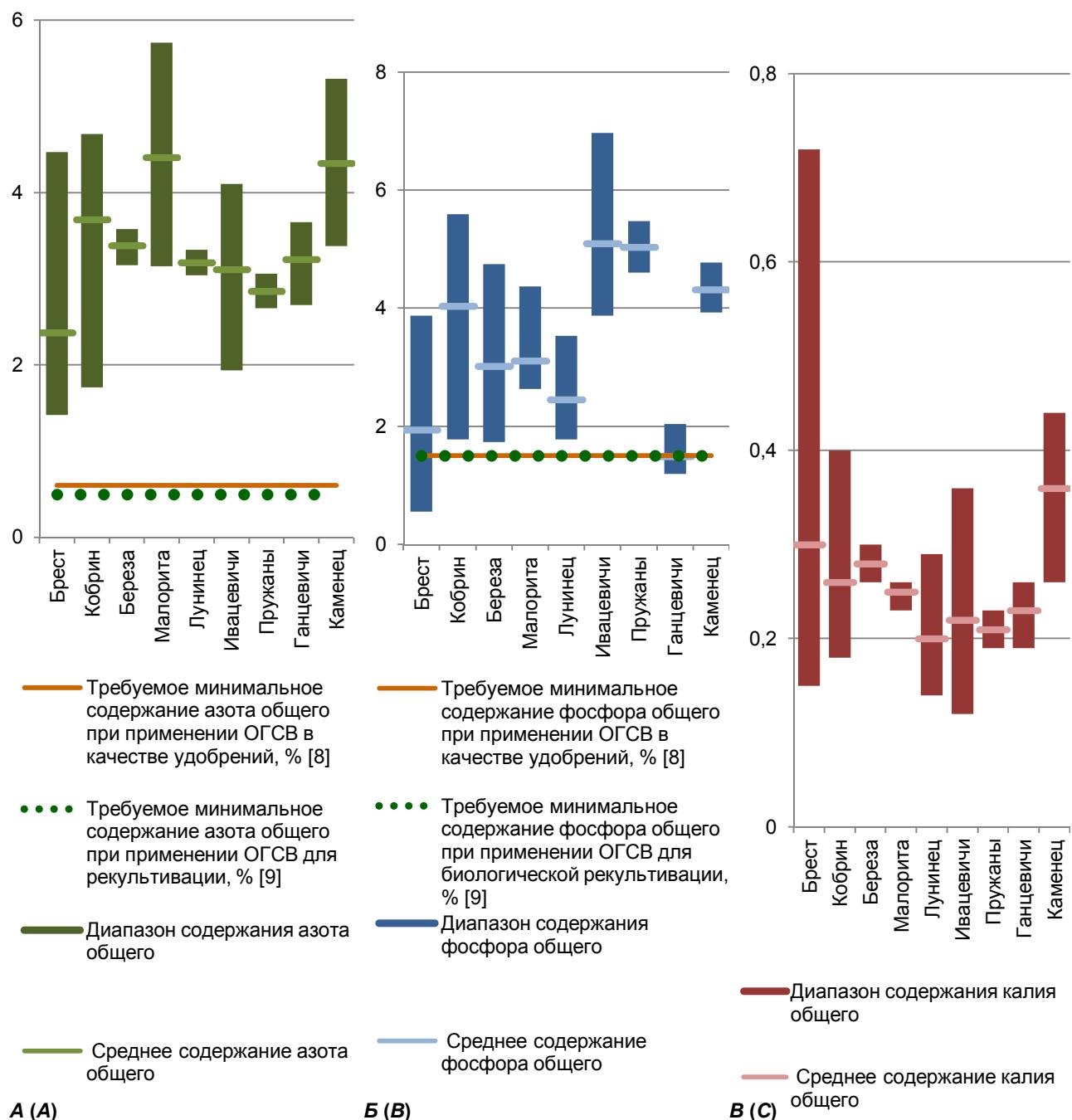


Рис. 5. Содержание общего азота (А), общего фосфора (Б) и общего калия (В) в ОГСВ городов Брестской области и их соответствие установленным в РФ нормативам [8, 9]

Fig. 5. Content of total nitrogen (A), total phosphorus (B) and total potassium (C) in UWWS of cities of Brest region and their compliance with the standards established in the Russian Federation [8, 9]

ОГСВ также является возобновляемым источником фосфора – важнейшего элемента питания для растений, характеризующего плодородие почв. При внесении ОГСВ в почву фосфор органических соединений минерализуется почвенной микрофлорой и переходит в доступную для растений форму. Считается, что весь фосфор, содержащийся в ОГСВ, доступен для растений и поглощается ими. Средние содержания общего фосфора в ОГСВ рассматриваемых городов изменяются в пределах от 1,5 % (ОГСВ г. Ганцевичи) до 5,1 % (ОГСВ г. Ивацевичи) (рис. 5, Б) и соответствуют либо превышают в 3,4 раза требуемое минимальное содержание вещества в ОГСВ при их использовании в качестве удобрений [8] и при рекультивации нарушенных земель [9].

Важным элементом питания для растений является калий, который содержится в почвах в основном в недоступной для растений форме. ОГСВ городов Брестской области характеризуются невысоким средним содержанием общего калия: от 0,20 % (ОГСВ г. Лунинца) до 0,36 % (ОГСВ г. Каменца) (рис. 5, В). Содержание общего калия в ОСВ не нормируется ни в России, ни в других странах.

Таким образом, содержание органического вещества и биогенных элементов свидетельствуют о высокой питательной ценности ОГСВ Брестской области и потенциальной возможности их использования в качестве органического удобрения либо его компонента, почвоулучшителя или субстрата для проведения биологической и технической рекультивации, применения в озеленении городов, сельском и садово-парковом хозяйстве. Несоответствия ОГСВ городов Брестской области нормативным документам в отношении влажности и содержания золы могут быть разрешены при разработке технологий их применения.

II. Содержание ТМ в ОГСВ

Одним из основных ограничивающих факторов применения ОГСВ в качестве удобрений является их загрязнение ТМ. Поэтому при внесении ОГСВ в почву необходимо строго соблюдать требования документов, регулирующих уровни содержания токсичных элементов в осадках и почве. Требования к ОГСВ для внесения в почву в отношении ТМ законодательно установлены в РФ, странах ЕС и США (табл. 2). В Беларуси отсутствуют документы подобного рода [1, 18].

В странах ЕС действует введенная 12 июня 1986 г. Директива по осадкам сточных вод 86/278/EЭС об охране окружающей среды, в частности почвы, при использовании ОГСВ в сельском хозяйстве. Она регламентирует содержание в ОГСВ шести ТМ – свинца, кадмия, меди, никеля, цинка и ртути (см. табл. 2), и допустимые нормы их поступления в почвы [33]. Поскольку данному документу уже более 34 лет, некоторыми странами ЕС установлены более жесткие ограничения в отношении ТМ и других органических загрязнителей и расширен их перечень. Например, по свинцу подобные поправки были внесены 52 % стран – участниц ЕС (14 стран из 27), по кадмию – 67 % (18 стран), по цинку – 37 % (10 стран) и т. д. Кроме того, некоторые страны ввели предельное содержание в ОГСВ и других ТМ, не регулируемых Директивой 86/278/EЭС: по хрому (22 страны), мышьяку (7 стран), молибдену (2 страны), кобальту и селену (1 страна).

В США 19 февраля 1993 г. был введен стандарт по использованию и удалению ОГСВ, который регулирует не только внесение ОГСВ в почву, но и размещение на полигонах для захоронения, а также сжигание ОГСВ [31]. Внесение ОГСВ в почву осуществляется в соответствии с Федеральными правилами, согласно которым ОГСВ является органическим удобрением и может продаваться наравне с прочими сельскохозяйственными удобрениями, если его состав удовлетворяет установленным требованиям. Ограничения при внесении ОГСВ в почву регламентируют содержание девяти ТМ: мышьяка, кадмия, меди, никеля, цинка, свинца, молибдена, селена и ртути (см. табл. 2) в виде предельных их концентраций в ОГСВ (мг/кг), среднемесячной концентрации ТМ (мг/кг), годовой нагрузки по ТМ (кг/га в год) и предельной нагрузки по ТМ за весь период применения ОГСВ (кг/га) [31].

В РФ, в соответствии с документом [9], возможно использование ОГСВ при проведении технической рекультивации нарушенных земель, регулируемое предельно допустимыми концентрациями загрязняющих веществ в ОГСВ (ПДК_{TP}). Осадки СВ используют в качестве инертного материала – наполнителя отработанных карьеров, полостей, выемок, образовавшихся при открытых горных работах, добыче полезных ископаемых, разработке песка, глины, щебня, для засыпки траншей при строительстве и ремонте линейных сооружений и т.п., а также при проведении биологической рекультивации ($\text{ПДК}_{\text{БР}}$) – в качестве почвогрунтов для создания плодородного слоя земли после проведения технического этапа рекультивации отработанных карьеров, полигонов коммунальных и производственных отходов и др. В документе [9] нормируется содержание в ОГСВ восьми ТМ – ртути, хрома, свинца, кадмия, никеля, меди, цинка и мышьяка (см. табл. 2).

Таблица 2. Содержание валовых форм ТМ в ОГСВ городов Брестской области и их нормативы в разных странах, мг/кг

Table 2. Content of gross forms of heavy metals in UWWS of cities of Brest region and their standards in different countries, mg/kg

Показатель, город (количество образцов)		Pb	Cd	Cu	Zn	Ni	Mn	Fe	Co	Cr
ОГСВ	Брест (9)	25,0	0,93	131,3	887,3	36,6	109,4	7 787,9	2,5	76,0
	Кобрин (67)	22,2	1,16	181,3	1 645,1	11,3	531,0	11 156,8	2,6	819,3
	Береза (21)	50,2	0,80	88,1	1 046,0	8,6	170,0	8 939,9	7,3	54,8
	Малорита (27)	18,1	0,89	80,9	770,9	9,2	93,8	7 432,7	нпо ¹	11,2
	Лунинец (2)	44,2	1,825	222,2	455,7	10,2	144,0	14 998,7	1,3	11,6
	Ивацевичи (3)	18,3	0,72	350,1	899,6	8,6	375,9	8 095,7	нпо	20,8
	Пружаны (6)	57,9	1,47	1 430,4	9 070,8	249,4	513,0	20 045,9	нпо	194,8
	Ганцевичи (3)	20,3	0,94	100,3	1 058,4	11,8	605,8	17 893,2	5,1	11,4
	Каменец (5)	15,5	0,60	110,9	733,9	10,0	176,2	8 277,7	0,62	15,7
	Значение показателей по ТУ BY 300003249.001-2009	УОСВ-1 ³	200	5	300	500	100	н/н ²	н/н	н/н
		УОСВ-2 ³	250	15	750	1 750	200	н/н	н/н	н/н
		УОСВ-3 ³	500	30	1 500	3 500	400	н/н	н/н	1 000
	Значения показателей по ТУ BY 790282162.009-2015	ОСРТ ⁴	250	30	1 000	2 500	300	н/н	н/н	500
		ОСРБ ⁵	150	15	750	1 350	200	н/н	н/н	250
Почв	ТНПА Беларусь	ГОСТ Р 54651-2011	ПДК _{ОГСВ I} ⁶	130	2	132	220	80	н/н	н/н
		ПДК _{ОГСВ II} ⁷	250	15	750	1 750	200	н/н	н/н	500
	ТНПА России	ГОСТ Р 17.4.3.07-2001	ПДК _{ОГСВ 1} ⁸	250	15	750	1 750	200	н/н	н/н
		ПДК _{ОГСВ 2}	500	30	1 500	3 500	400	н/н	н/н	1 000
	ГОСТ Р 54534-2011	ПДК _{БР} ¹⁰	500	30	750	3 500	400	н/н	н/н	1 000
		ПДК _{TP} ¹¹	1 000	60	1 500	7 000	800	н/н	н/н	2 000
	ПДК _{CSWA} ¹²		840	85	4 300	7 500	420	н/н	н/н	н/н
Почв	ПДК _{ЕС} ¹³		750–1 200	20–40	1 000–1 750	2 500–4 000	300–400	н/н	н/н	н/н
	Субрегиональный фон, пахотные угодья (валовые формы) [20]		5,98	0,18	2,52	12,65	1,80	115,20	–	1,10
	ПДК _{почв} ¹⁴		32,0	0,5	33,0	55,0	20	1 500,0	н/н	100,0

¹ нпо – ниже предела обнаружения.² н/н – не нормируется.³ ПДК для удобрений марки УОСВ-1 и УОСВ-2, применяемых в промышленном цветоводстве, зеленом строительстве, лесных и декоративных питомниках; ПДК для удобрений марок УОСВ-1, УОСВ-2 и УОСВ-3, которые применяют для биологической рекультивации нарушенных земель и полигонов ТКО, РБ (ТУ BY 300003249.001-2009).⁴ ОСРТ – ПДК для ОГСВ, используемых для горнотехнической рекультивации, РБ (ТУ BY 790282162.009-2015).⁵ ОСРБ – ПДК для ОГСВ, используемых для биологической рекультивации, РБ (ТУ BY 790282162.009-2015).⁶ ПДК_{ОГСВ I} – ПДК для удобрений органических на основе ОГСВ группы I, используемых для выращивания технических, кормовых, зерновых и сидеральных культур, в личном подсобном хозяйстве при выращивании рассады овощных и цветочных культур, РФ (ГОСТ Р 54651-2011).⁷ ПДК_{ОГСВ II} – ПДК для удобрений органических на основе ОГСВ группы II, используемых под посадки лесохозяйственных культур вдоль дорог, в питомниках лесных и декоративных культур, цветоводстве, для окультуривания истощенных почв, рекультивации нарушенных земель и откосов автомобильных дорог, рекультивации свалок твердых бытовых отходов, РФ (ГОСТ Р 54651-2011).

⁸ ПДК_{ОГСВ 1} – ПДК для ОГСВ группы I, при использовании их в качестве удобрений под все виды сельскохозяйственных культур, кроме овощных, грибов, зеленых и земляники, РФ (ГОСТ Р 17.4.3.07-2001) [8].

⁹ ПДК_{ОГСВ 2} – ПДК для ОГСВ группы II при использовании их в качестве удобрений под зерновые, зернобобовые, зернофуражные и технические культуры, РФ (ГОСТ Р 17.4.3.07-2001) [8].

¹⁰ ПДК_{БР} – предельно допустимые концентрации для ОГСВ при их использовании для биологической рекультивации нарушенных земель, РФ (ГОСТ Р 54534-2011) [9].

¹¹ ПДК_{ТР} – предельно допустимые концентрации для ОГСВ при их использовании для технической рекультивации нарушенных земель, РФ (ГОСТ Р 54534-2011) [9].

¹² ПДК_{США} – предельно допустимые концентрации для осадков, США [31].

¹³ ПДК_{ЕС} – предельно допустимые концентрации для осадков, ЕС [33].

¹⁴ ПДК_{почв} – предельно допустимые концентрации валовых форм ТМ в почвах Беларусь в соответствии с ТКП 17.03-06-2019 (33140).

При использовании ОГСВ в качестве удобрений в РФ законодательно установлены нормативы для ртути, хрома, свинца, кадмия, никеля, меди, цинка и мышьяка в соответствии с документом [8]. По содержанию данных элементов ОГСВ подразделяются на две группы – к группе I ($\text{ПДК}_{\text{ОГСВ} 1}$) предъявляются более жесткие требования (см. табл. 2) и они могут использоваться под все виды сельскохозяйственных культур, кроме овощных, грибов, зеленых и земляники; ОГСВ группы II ($\text{ПДК}_{\text{ОГСВ} 2}$) могут применяться под зерновые, зернобобовые, зернофуражные и технические культуры. ОГСВ обеих групп можно использовать в промышленном цветоводстве, зеленом строительстве, лесных и декоративных питомниках, для биологической рекультивации нарушенных земель и полигонов ТКО [8].

Важнейшим биогенным элементом, который входит в состав тканей растений и животных, повышает продуктивность фотосинтеза и играет роль в биосинтезе белков растительного организма, является хром. Его содержание в ОГСВ г. Кобрине в среднем в 1,6 раза превышает $\text{ПДК}_{\text{ОГСВ} 1}$ (табл. 3), однако укладывается в нормативы $\text{ПДК}_{\text{ОГСВ} 2}$, $\text{ПДК}_{\text{БР}}$ и $\text{ПДК}_{\text{ТР}}$ (см. табл. 2). Наименьшее среднее содержание хрома выявлено в ОГСВ гг. Малориты (11,2 мг/кг), Ганцевичей (11,4 мг/кг) и Лунинца (11,6 мг/кг).

Цинк является важным микроэлементом, который входит в состав различных ферментов в организмах растений и животных. Среднее содержание цинка в образцах ОГСВ г. Пружаны превышает $\text{ПДК}_{\text{ОГСВ} 1}$ в 5,2 раза, $\text{ПДК}_{\text{ОГСВ} 2}$ и $\text{ПДК}_{\text{БР}}$ в 2,6 раза, а также $\text{ПДК}_{\text{США}}$, $\text{ПДК}_{\text{ТР}}$ и $\text{ПДК}_{\text{ЕС}}$ в среднем в 1,2, 1,3 и 2,3–3,6 раза соответственно (см. табл. 3). Наименьшее среднее содержание цинка отмечено в ОГСВ г. Лунинца (455,7 мг/кг).

Медь является одним из важнейших биогенных элементов, регулирующих ферментативные реакции в организмах растений и животных. Среднее содержание меди в некоторых образцах ОГСВ г. Пружаны в 1,9 раза превышает $\text{ПДК}_{\text{ОГСВ} 1}$ и $\text{ПДК}_{\text{БР}}$, однако ниже $\text{ПДК}_{\text{ОГСВ} 2}$, $\text{ПДК}_{\text{ТР}}$, $\text{ПДК}_{\text{США}}$ и $\text{ПДК}_{\text{ЕС}}$ (см. табл. 3). Наименьшее среднее содержание меди обнаружено в ОГСВ г. Малориты (80,9 мг/кг).

Никель принимает участие в ферментативных реакциях у растений и животных. Среднее содержание никеля в ОГСВ г. Пружаны превышает $\text{ПДК}_{\text{ОГСВ} 1}$ в 1,2 раза (см. табл. 3), однако значительно ниже ПДК по другим рассматриваемым нормативам (см. табл. 2). Наименьшее среднее содержание никеля выявлено в ОГСВ гг. Ивацевичей и Берёзы (8,6 мг/кг).

Таблица 3. Кратность превышения нормативов ПДК [8, 9, 31, 33] в ОГСВ Брестской области в отношении ТМ

Table 3. The multiplicity of exceeding the standards of maximum permissible concentrations [8, 9, 31, 33] in the UWWS of Brest region for heavy metals

ОГСВ, город	ТМ	ПДК, страна	Кратность превышения норматива, раз
Кобрин	Хром	$\text{ПДК}_{\text{ОГСВ} 1}$ (РФ)	1,6
Пружаны	Цинк	$\text{ПДК}_{\text{ОГСВ} 1}$ (РФ)	5,2
		$\text{ПДК}_{\text{ОГСВ} 2}$ (РФ) и $\text{ПДК}_{\text{БР}}$ (РФ)	2,6
		$\text{ПДК}_{\text{ЕС}}$	2,3–3,6
		$\text{ПДК}_{\text{ТР}}$ (РФ)	1,3
		$\text{ПДК}_{\text{США}}$	1,2
	Медь	$\text{ПДК}_{\text{ОГСВ} 1}$ (РФ) и $\text{ПДК}_{\text{БР}}$ (РФ)	1,9
	Никель	$\text{ПДК}_{\text{ОГСВ} 1}$ (РФ)	1,2

Марганец также является важным биогенным элементом. Его содержание не нормируется в РФ, ЕС и США (см. табл. 2); диапазон колебаний его содержания в ОГСВ Брестской области находится в пределах от 93,8 мг/кг (ОГСВ г. Малориты) до 605,8 мг/кг (ОГСВ г. Ганцевичи).

Кобальт выполняет важную роль в жизнедеятельности растений и животных, поскольку принимает участие в ферментативных реакциях. Его количество в ОГСВ не нормируется в РФ, ЕС и США (см. табл. 2). Наибольшее среднее содержание кобальта выявлено в ОГСВ г. Берёзы (7,3 мг/кг) и г. Ганцевичей (5,1 мг/кг). В ОГСВ гг. Малориты, Ивацевичей и Пружан кобальт не обнаружен, а в ОГСВ гг. Лунинца, Каменца и Кобрине он зафиксирован в единичных пробах.

Железо катализирует процессы дыхания в живых организмах и входит в состав ферментативных систем растений. Его содержание законодательно не нормируется в РФ, ЕС и США (см. табл. 2); наибольшее содержание железа выявлено в ОГСВ г. Пружаны (20,0 г/кг), наименьшее – в ОГСВ г. Малориты (7,4 г/кг).

Свинец является токсичным элементом, относится к 1-му классу опасности в соответствии с ГОСТ 17.4.1.02-83 и входит в так называемую большую четверку наиболее токсичных элементов наряду с кадмием, ртутью и мышьяком [28]. Содержание свинца в ОГСВ городов Брестской области на порядок величин ниже ПДК по рассматриваемым нормативам для РФ, ЕС и США (см. табл. 2).

Наименьшим содержанием свинца в среднем характеризуются ОГСВ г. Каменца (15,5 мг/кг), наибольшим – ОГСВ г. Пружаны (57,9 мг/кг).

Кадмий также является токсичным элементом и относится к 1-му классу опасности в соответствии с ГОСТ 17.4.1.02-83. Его содержание в ОГСВ Брестской области не превышает ПДК для ОГСВ, установленные в РФ, ЕС и США (см. табл. 2). Наименьшим содержанием кадмия в среднем характеризуются ОГСВ г. Каменца (0,60 мг/кг), наибольшим – ОГСВ г. Лунинца (1,83 мг/кг).

Таким образом, более высокое содержание ТМ в ОГСВ городов Брестской области по сравнению с местными почвами создает значительный потенциал важных для растений и животных биогенных микроэлементов. В то же время очень высокие концентрации меди, цинка и никеля в ОГСВ г. Пружаны и хрома в ОГСВ г. Кобрине, превышающие некоторые нормативы их содержания в разных странах, свидетельствуют о необходимости тщательных расчетов доз ОГСВ при планировании их внесения в почву для исключения негативного воздействия на живые организмы и избыточного их накопления в сельскохозяйственной продукции.

III. Микробиологическая характеристика ОГСВ

Одним из важнейших критериев пригодности внесения ОГСВ в почву является их соответствие санитарно-гигиеническим нормам. В странах ЕС внесение ОГСВ в почву регламентирует Директива по осадкам сточных вод 86/278/EЭС, которая в настоящее время пересматривается с целью расширения требований к ОГСВ в части патогенных микроорганизмов [30]. В этой связи в странах, являющихся членами ЕС (например, во Франции, Австрии (Федеральные земли Бургенланд и Нижняя Австрия), Польше, Люксембурге, Дании и др.), введены национальные стандарты, ограничивающие в основном содержание сальмонелл и гельминтов (табл. 4). На уровне Европейского совета согласовывается возможность перехода на более ужесточенную систему обращения с ОГСВ [35].

В США ОГСВ по возможности внесения в почву разделяются на два класса: ОГСВ класса А и ОГСВ класса Б (см. табл. 4). ОГСВ класса А после проведения определенной обработки (предлагается шесть вариантов признанных способов обработки) характеризуются высокой степенью патогенной безопасности и могут использоваться для устройства газонов или домашних садов, реализовываться в мешках либо другой таре для внесения в землю [18]. В отличие от ОГСВ класса А, в которых патогенные организмы находятся на уровнях ниже указанных пределов (см. табл. 4), ОГСВ класса Б характеризуются присутствием определенного количества патогенных микроорганизмов, ввиду чего необходимо соблюдать предписанный период ожидания перед началом сельскохозяйственных работ на обработанных почвах, поскольку они направлены на частичное, а не полное снижение количества патогенных агентов в результате обработки (предлагается три варианта признанных способов обработки). К признанным способам обработки относят процессы, приводящие к значительному сокращению количества патогенных организмов в соответствии с документом [31].

Качество ОГСВ в РФ по микробиологическим показателям регулируется документами [8, 9], устанавливающими предельно допустимое содержание бактерий группы кишечной палочки (БГКП), патогенных организмов (в том числе сальмонелл), яиц гельминтов и цист кишечных патогенных простейших. В соответствии с документом [8], ОГСВ подразделяются на две группы: к ОГСВ I группы применяются более жесткие требования, чем к ОГСВ II группы; к ОГСВ, предназначенным для биологической рекультивации, предъявляются более жесткие требования, чем к используемым для технической рекультивации [9] (см. табл. 4).

Результаты микробиологических исследований ОГСВ одного из средних городов Брестской области (см. табл. 4) свидетельствуют о том, что содержание микроорганизмов в ОГСВ во много раз превышают значения для «чистой почвы» в соответствии с Инструкцией 2.1.7.11-12-5-2004 даже после пятилетнего хранения на ИП: содержание БГКП – в 66 раз, энтерококков – в 32, титров *Clostridium perfringens* – в 100 раз (см. табл. 4). Это свидетельствует о высоком уровне загрязнения ОГСВ микроорганизмами и опасности загрязнения почв при их применении при рекультивации нарушенных земель или внесении в почву в качестве почвоулучшителей. Согласно работе [14], значительную эпидемическую опасность ОГСВ представляет за счет содержания в нем патогенных микроорганизмов. Во всех исследованных нами образцах ОГСВ городов Брестской области на всем временном протяжении патогенные бактерии р. *Salmonella* не обнаружены, что соответствует нормативам РФ [8, 9], ЕС [35] и США [31].

Таблица 4. Микробиологические показатели ОГСВ среднего города и нормативы содержания микроорганизмов в ОГСВ в разных странах

Table 4. Microbiological indicators of UWWS of the middle city and microorganism content standards in urban wastewater sludge in different countries

ОГСВ, страна			ОМЧ, млн КОЭ/г	БГКП, КОЭ/г	Энтерококки, КОЭ/г	Титр <i>Clostridium perfringens</i> , г	Энtero- вирусы	Патогенные орга- низмы, в том числе сальмонеллы	Яйца гельминтов и цисты кишечных простейших
ОГСВ	Средний город Брестской области	Срок хранения на ИП 5 лет	1,93	591	292	10 ⁻⁴	–	Не обнаружены	–
		Срок хранения на ИП 3 года	3,99	3 660	1 830	10 ⁻⁶	–	Не обнаружены	–
		Срок хранения на ИП 1 год	5,87	5 730	2 680	10 ⁻⁷	–	Не обнаружены	–
	Малый город Брестской области	Срок хранения на ИП 11–12 месяцев	7,19	6 912	2 970	10 ⁻⁷	–	Не обнаружены	–
	Крупный город Брестской области	После трех месяцев хранения в полевых условиях ¹ [29]	–	233	4 133	–	–	Не обнаружены	–
	Р Б	Значение показателей по ТУ BY 300003249.001-2009	УОСВ-1 УОСВ-2 УОСВ-3	н/н ² н/н н/н	100 100 1000	н/н н/н н/н	н/н н/н н/н	Отсутствуют Отсутствуют Отсутствуют	Отсутствуют Отсутствуют Отсутствуют
		Значения показателей по ТУ BY 790282162.009-2015	ОСРТ ОСРБ	н/н н/н	1 000 100	н/н н/н	н/н н/н	Отсутствуют Отсутствуют	Отсутствуют Отсутствуют
	Значения показателей по ТУ BY 291000450.001-2015		–	н/н	н/н	н/н	н/н	н/н	Отсутствие
	США [31]	A	н/н	Менее 1 000	н/н	н/н	Менее 1 БОЕ/4г	Менее 3 КОЭ/4г	Менее 1 экз/4г
		Б	н/н	Менее 2 000 000	н/н	н/н	Уменьшение в 10 раз	Уменьшение в 10 раз	н/н
	ЕС [35]		н/н	Менее 1 000	н/н	н/н	н/н	0 КОЭ/50г	Отсутствуют
	РФ (ГОСТ Р 54651-2011)		н/н	1–9	1–9	н/н	н/н	Отсутствуют	Отсутствуют
	РФ [8]	I	н/н	100	н/н	н/н	н/н	Отсутствуют	Отсутствуют
		II	н/н	1 000	н/н	н/н	н/н	Отсутствуют	Отсутствуют
	РФ [9]	Биол. р. ³	н/н	100	н/н	н/н	н/н	Отсутствуют	Отсутствуют
		Тех. р. ⁴	н/н	1 000	н/н	н/н	н/н	Отсутствуют	Отсутствуют
Почва	«Чистая» почва ⁵		н/н	1–9 КОЭ/г	1–9	0,01 и выше	н/н	Отсутствуют	Отсутствуют

¹ Сброженный обезвоженный ОГСВ.² н/н – не нормируется.³ Норматив для ОГСВ при их использовании для биологической рекультивации нарушенных земель [9].⁴ Норматив для ОГСВ при их использовании для технической рекультивации нарушенных земель [9].⁵ Значения для «чистой» почвы в соответствии с Инструкцией 2.1.7.11-12-5-2004 «Гигиеническая оценка почвы населенных мест» и МУ 2.1.7.730-99 «Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест».

П р и м е ч а н и е. КОЭ – колониеобразующие единицы; БОЭ – бляшкообразующие единицы.

Свежие осадки, хранящиеся в течение одного года, характеризуются наибольшим значением показателя общего микробного числа (ОМЧ), т. е. количеством мезофильных аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов. К третьему году их количество снижается в 1,5 раза с $5,87 \cdot 10^6$ до $3,99 \cdot 10^6$ КОЕ/г (рис. 6, А), а к пятому – в 3,0 раза по сравнению с первым годом, с $5,87 \cdot 10^6$ до $1,93 \cdot 10^6$ КОЕ/г, что связано со снижением влажности ОГСВ вследствие их подсыхания и уменьшением количества органических веществ, являющихся источником питания микроорганизмов [13, 14].

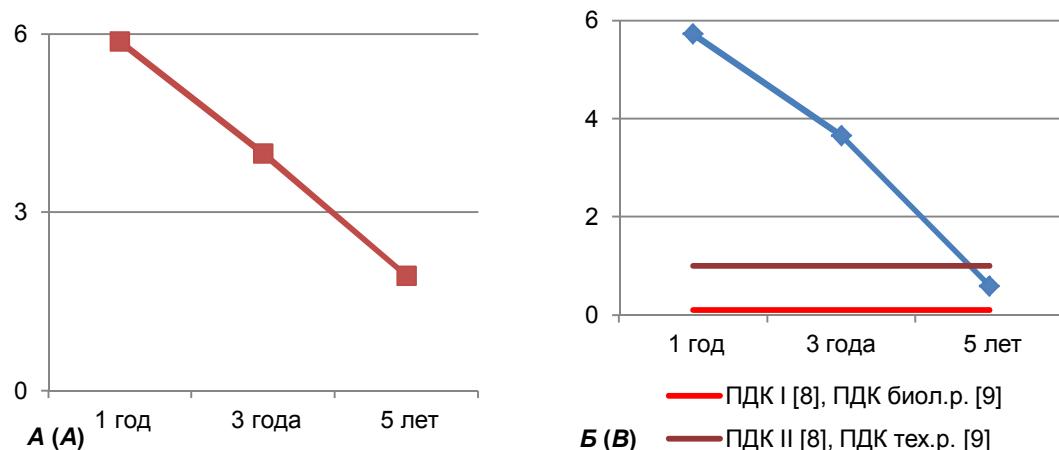


Рис. 6. Динамика микроорганизмов в ОГСВ среднего города с ИП разного срока хранения:
А – ОМЧ, млн КОЕ/г; Б – БГКП, тыс. КОЕ/г

Fig. 6. Dynamics of microorganisms in UWWS of the middle city with urban wastewater sludge landplaces of different shelf life: A – Total microbial count, millions of Colony Forming Units per gram (CFU/g); B – Fecal coliform bacteria, thousands of CFU/g

БГКП являются санитарно-показательными микроорганизмами и их наличие в субстрате свидетельствует о фекальном загрязнении. Полученные данные по микробиологической характеристике малого и среднего городов со сходными способами обработки ОГСВ (аэробное сбраживание, размещение на ИП) влажностью 95,8 и 94,6 % соответственно характеризуются сопоставимым количеством БГКП. ОГСВ крупного города влажностью 80,7 % через три месяца хранения в полевых условиях характеризуются значением ниже на порядок (в 24–30 раз), что, вероятно, связано с другим способом обработки (анаэробное сбраживание, обезвоживание на фильтр-прессах с добавлением флокулянта и хранением в полевых условиях), а также потерями основной части БГКП с отжатой водой. При хранении ОГСВ на ИП ОС среднего города численность БГКП уменьшилась в 10 раз к пятому году хранения (рис. 6, Б) и стала соответствовать нормативам РФ для ОГСВ II группы при использовании ОГСВ в качестве удобрений (РФ) [8].

Энтерококки являются представителями условно-патогенных бактерий, и их наличие также является критерием свежего фекального загрязнения. Сопоставимые между собой данные получены по ОГСВ среднего города после 1 года хранения на ИП, ОГСВ малого города после 11–12 месяцев хранения на ИП, а также крупного города после 3 месяцев хранения в полевых условиях. При этом количество энтерококков в течение пятилетнего периода хранения ОГСВ на ИП среднего города уменьшилось с $2,68 \cdot 10^3$ до $2,92 \cdot 10^2$ КОЕ/г, т. е. в 9,2 раза (рис. 7, А).

Клостридии так же, как и энтерококки относятся к условно-патогенным микроорганизмам. Увеличение титра клостридий в течение пятилетнего периода хранения ОГСВ на ИП с 10^{-7} до 10^{-4} , т. е. в 1 000 раз (см. табл. 3), свидетельствует об улучшении качества ОГСВ (рис. 7, Б).

Таким образом, после пятилетнего хранения на ИП происходит обеззараживание ОГСВ и он становится пригодным для использования в сельском хозяйстве, соответствуя нормативам для ОГСВ II группы (РФ) [8], и для технической рекультивации (РФ) [9]. Для возможности применения ОГСВ под все виды сельскохозяйственных культур, кроме овощных, грибов, зеленных и земляники в соответствии с нормативами для ОГСВ II группы (РФ) [8], а также для биологической рекультивации (РФ) [9] необходимо более продолжительное выдерживание ОГСВ на ИП с целью обеззараживания либо проведение иных работ по обеззараживанию ОГСВ. Однако даже после пятилетнего обеззараживания, как показывает их сопоставление с критериями для «чистых» почв в соответствии с Инструкцией 2.1.7.11-12-5-2004 и МУ 2.1.7.730-99, ОГСВ остаются потенциальным источником микробиологического загрязнения почв.

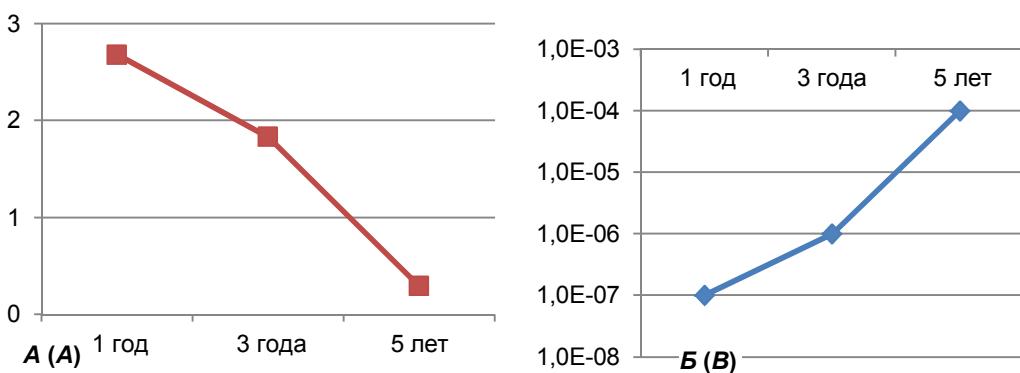


Рис. 7. Микробиологические показатели ОГСВ среднего города с ИП разного срока хранения:
А – энтерококки, тыс. КОЕ/г; Б – титр *Clostridium perfringens*, г

Fig. 7. Microbiological indicators of UWWS of an average city with urban wastewater sludge landplaces of different shelf life: A – Enterococcus, thousands of CFU/g; B – titer of *Clostridium perfringens*, g

Полученные данные подтверждаются информацией, имеющейся в литературных источниках, которая свидетельствует о том, что после определенного количества времени обработки ОГСВ на ИП они по-прежнему являются источниками микробиологического загрязнения почв. Так, в работе [13] говорится о том, что в ОГСВ г. Гродно после 3–4 лет хранения на ИП содержание БГКП составило $2,3 \cdot 10^4$ КОЭ/г, что в 23 раз превышает норматив для ОГСВ II группы при использовании в сельском хозяйстве (РФ) и при использовании ОГСВ для технической рекультивации (РФ), и в 230 раз превышает норматив для ОГСВ I группы при использовании в сельском хозяйстве (РФ) и при использовании ОГСВ для биологической рекультивации (РФ). Содержание БГКП в ОГСВ после 5–8-летнего периода обработки на ИП превышает норматив для ОГСВ I группы при использовании в сельском хозяйстве (РФ) и при использовании ОГСВ для биологической рекультивации (РФ) в 130 раз, а также норматив для ОГСВ II группы при использовании в сельском хозяйстве (РФ) и при использовании ОГСВ для технической рекультивации в 13 раз, и составляет $1,3 \cdot 10^4$ КОЭ/г. Таким образом, даже после 5–8-летнего обеззараживания в соответствии с критериями для «чистых» почв в соответствии с Инструкцией 2.1.7.11-12-5-2004 и МУ 2.1.7.730-99], ОГСВ г. Гродно остаются потенциальным источником микробиологического загрязнения почв.

Данные исследователей [14], выполнивших работы на ИП ОАО «Гродно Азот», также свидетельствуют о высоком содержании БГКП в верхнем слое ОГСВ и при ОГСВ со сроком хранения на ИП в течение 3–5 лет ($6,6 \cdot 10^3$ КОЭ/г), и со сроком хранения на ИП в течение 5–8 лет ($9,1 \cdot 10^3$ КОЭ/г), что подтверждает микробиологическую опасность внутрипочвенного внесения подобного ОГСВ.

Микробиологический анализ отходов водоотведения территории полигона «Северный» в границах Санкт-Петербурга и Ленинградской области (до использования данных территорий под полигон «захоронения» отходов, с 1950-х до середины 1980-х годов, на них располагались иловые карты) в 2010–2017 гг. дает основание считать, что даже длительный процесс стабилизации отходов в естественных условиях не обеспечивает достижения безопасных (нормативных) санитарных требований, предъявляемых к качеству почв [10].

Выходы.

1. В развитых странах преобладают способы обращения с ОГСВ, включающие их применение в качестве удобрений в виде обработанных ОГСВ либо в составе компостов, а также использование методов термической утилизации ОГСВ. Именно использование ОГСВ путем внесения в землю, анаэробное сбраживание с получением органических удобрений и энергии, а также сжигание станут основными методами утилизации ОГСВ в мировой практике в среднесрочной перспективе.

2. Количество образовавшихся ОГСВ в Беларуси ежегодно увеличивается более чем на 2 млн т/год, и на 2019 г. накоплено 12,781 млн т данного вида отходов. Преобладающая их часть для обезвоживания и сушки проходит обработку на ИП, которые при отсутствии альтернативных вариантов обращения с образующимися ОГСВ становятся объектами длительного хранения данного вида отходов, являясь источником негативного воздействия на компоненты природной среды и причиной формирования экологических, экономических и социальных проблем.

3. ОГСВ в Беларуси не являются объектами аналитического контроля, не выделяются как отдельный объект нормативно-правового регулирования, относятся к опасным отходам 3-го (умеренно опасные) и 4-го (малоопасные) классов без учета их состава. При этом они содержат значительное количество органических и минеральных веществ, которые обладают высоким

энергетическим потенциалом и при проведении соответствующей обработки могут использоваться в различных отраслях промышленности, энергетики и в сельском хозяйстве.

4. В Беларуси, в отличие от РФ, отсутствуют требования к агрохимическим характеристикам ОГСВ при рассмотрении дальнейших вариантов обращения с ними. Анализ ОГСВ городов Брестской области свидетельствует о широких пределах колебания его характеристик, высокой питательной ценности (содержание органического вещества составляет более 77,4 %, общих азота – более 2,4, фосфора – более 1,5, калия – более 0,2 %) и потенциальной возможности использования ОГСВ гг. Бреста, Берёзы, Кобринна, Пружан, Малориты, Лунинца, Ивацевичей, Ганцевичей, Каменца в качестве органического удобрения либо его компонента, почвоулучшителя или субстрата для проведения рекультивации. Несоответствия ОГСВ городов Брестской области нормативным документам в отношении влажности и содержания золы могут быть разрешены при разработке технологий применения почвоулучшителей на основе ОГСВ. Таким образом, по агрохимическим характеристикам ОГСВ Брестской области могут применяться в качестве удобрения и при рекультивации земель при условии их соответствия нормативным документам по содержанию загрязняющих веществ и микробиологическим характеристикам.

5. В отличие от РФ, США и стран ЕС в Беларуси отсутствуют требования к содержанию ТМ в ОГСВ при рассмотрении вариантов обращения с ними. Анализ ОГСВ городов Брестской области свидетельствует о значительном их обогащении ТМ по сравнению с местными почвами и широком диапазоне содержаний ТМ, максимальные значения которых превышают ПДК, установленные требованиями к ОГСВ в РФ и других странах.

На основании выполненных аналитических работ установлено, что ОГСВ ОС гг. Бреста, Берёзы, Малориты, Лунинца, Ивацевичей, Ганцевичей и Каменца соответствуют требованиям к ОГСВ I группы (РФ) и могут использоваться в качестве удобрения под все виды сельскохозяйственных культур, кроме овощных, грибов, зеленных и земляники, а также для биологической и технической рекультивации нарушенных земель. ОГСВ ОС г. Кобринна соответствуют требованиям к ОГСВ II группы (РФ) и могут применяться под зерновые, зернобобовые, зернофуражные и технические культуры, а также при проведении технической и биологической рекультивации. ОГСВ ОС г. Пружаны не рекомендуются к применению в чистом виде в сельском хозяйстве и для рекультивации, поскольку не соответствуют нормативам ПДК (РФ, США, ЕС) в отношении ТМ. Таким образом, содержание важных для растений и животных микроэлементов делает ОГСВ ценным их источником, однако необходимо проводить аналитические испытания и тщательно рассчитывать дозы ОГСВ при планировании их применения для исключения негативного воздействия на живые организмы организмы и избыточного их накопления в сельскохозяйственной продукции.

6. После пятилетнего хранения ОГСВ среднего города на ИП происходит его обеззараживание и ОГСВ становится пригодным по микробиологическим показателям для использования в сельском хозяйстве, соответствую нормативам для ОГСВ II группы (РФ) при их использовании в качестве удобрений для зерновых, зернобобовых, зернофуражных и технических культур, а также для проведения биологической и технической рекультивации нарушенных земель. Для применения ОГСВ под все виды сельскохозяйственных культур, кроме овощных, грибов, зеленных и земляники в соответствии с нормативам для ОГСВ I группы (РФ) и для биологической рекультивации необходимо более продолжительное выдерживание ОГСВ на ИП с целью обеззараживания либо проведение дополнительных работ по обеззараживанию ОГСВ. Например, компостирование с различными наполнителями, термическая обработка, аэробная стабилизация с последующим хранением в течение более чем 3 лет, обработка известью (либо другими обеззараживающими реагентами), использование термофильтной аэробной стабилизации, мезофильного либо термофильтного сбраживания.

7. Применение ОГСВ в сельском хозяйстве обусловливается высоким содержанием в них органического вещества, биогенных элементов и микроэлементов. Однако ОГСВ многих городов не соответствуют нормативам по содержанию ТМ и микроорганизмов. Учитывая сложный состав ОГСВ и наличие нормативов для ограниченного перечня загрязняющих веществ, применение ОГСВ в сельском хозяйстве возможно только после разработки нормативно-правовой базы в области обращения с ними, всестороннего изучения ОГСВ по ряду иных загрязняющих веществ (лекарственных препаратов, микропластика, стойких органических загрязнителей и др.) и оценки рисков для окружающей среды.

8. Применение ОГСВ в производственных процессах (в производстве строительной керамики, асфальтобетона, топливных брикетов и др.) позволит решить проблему применения и органической, и минеральной составляющих ОГСВ. Однако ОГСВ должны отвечать определенным требованиям по содержанию влаги, органических веществ, золы, и других показателей, что требует предварительной сушки, стабилизации и иных методов обработки.

9. Наиболее предпочтительным для условий Беларуси при неразработанности нормативно-правового регулирования в области обращения с ОГСВ, в том числе в соответствии с требованиями экологической и санитарной безопасности, в настоящее время и в течение периода его возможного формирования в рамках реализации Национальной стратегии развития водопроводно-канализационного хозяйства Республики Беларусь до 2035 года, наиболее приемлемыми способами обращения с ОГСВ являются применение ОГСВ для рекультивации нарушенных земель, в качестве изолирующего слоя на полигонах ТКО, в городском и лесном хозяйстве (в цветоводстве, а также в парках, скверах, питомниках и т. п.), анаэробное сбраживание с получением органических удобрений и энергии.

Список использованных источников

1. Антонов, К. В. Проблемы и перспективы утилизации осадков сточных вод / К. В. Антонов, О. С. Дубовик // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве : сб. тр. : в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларуси, Институт жилищно-коммунального хозяйства; под. общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. О. Китикова. – Минск : БГТУ, 2020. – Ч. 1. – С. 13–19.
2. Басалай, Е. Н. Влияние городских очистных сооружений на состояние окружающей среды / Е. Н. Басалай // Молодежь в науке – 2020 : тез. докл. XVII Междунар. науч. конф. «Молодежь в науке», Минск, 22–25 сент. 2020 г. / Нац. акад. наук Беларуси, Совет молодых ученых ; редкол.: В. Г. Гусаков (глав. ред.) [и др.]. – Минск : Беларусская наука, 2020. – С. 557–560.
3. Валиев, В. С. Анализ мирового опыта утилизации осадка городских сточных вод / В. С. Валиев, Д. В. Иванов, Р. Р. Шагидуллин // Российский журнал прикладной экологии, 2020. – № 4 (24). – С. 43–51.
4. Войтов, И. В. Проблемы и основные направления совершенствования обращения с осадками очистных сооружений канализации в Республике Беларусь / И. В. Войтов, В. Н. Марцуль // Современные тенденции в развитии водоснабжения и водоотведения : материалы Междунар. конф., посвящ. 145-летию УП «Минскводоканал», Минск, 13–14 февр. 2019 г. : в 2 ч. – Минск : БГТУ, 2019. – Ч. 2. – С. 137–140.
5. Войтов, И. В. Совершенствование обращения с осадками очистных сооружений канализации в Республике Беларусь / И. В. Войтов, В. Н. Марцуль // Природопользование и экологические риски : материалы науч.-практ. конф., Минск, 5 июня 2019 г. – Минск : БГТУ, 2019. – С. 56–60.
6. Вострова, Р. Н. Производство топливных брикетов на основе осадков сточных вод городских очистных сооружений / Р. Н. Вострова // Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика и геоэкология. – 2012. – С. 43–45.
7. Ганеев, И. Г. Детоксикация и утилизация осадков городских сточных вод в общей системе обращения отходов / И. Г. Ганеев, В. Ф. Мадякин // Экологические проблемы промышленных городов : сб. науч. тр. 3-й Всесоюз. науч.-практ. конф. – Саратов, 2007. – С. 49–52.
8. ГОСТ Р 17.4.3.07-2001. Охрана природы. Почвы. Требования к свойствам осадков сточных вод при использовании их в качестве удобрений. – М. : Госстандарт России, 2001. – 5 с.
9. ГОСТ Р 54534-2011. Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель. – М. : Стандартинформ, 2019. – 12 с.
10. Дрегуло, А. М. Трансформация иловых карт в объекты накопленного экологического ущерба: риски, факторы, техногенез / А. М. Дрегуло. – М. : Библио-Глобус, 2019. – 270 с.
11. Зайнуллин, Р. Р. Изготовление топливных брикетов из осадков городских сточных вод / Р. Р. Зайнуллин, А. А. Галяутдинов // Инновационная наука – 2016. – № 6/2016. – С. 85–87.
12. Касатиков, В. А. Влияние вермикомпостирования осадков городских сточных вод на их агроэкологические свойства и агрономическую эффективность / В. А. Касатиков // Вермикомпостирование и вермикультурирование как основа экологического земледелия в 21 веке: проблемы, перспективы, достижения : тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 2007. – Минск, 2007. – С. 56–61.
13. Кизер, А. З. Эколо-биологические особенности осадков сточных вод городских очистных сооружений / А. З. Кизер, Г. Г. Юхневич, С. С. Ануфрик // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 5, Эканоміка. Сацыялогія. Біялогія. – 2016. – Т. 6, № 3. – С. 148–156.
14. Круковская, Е. В. Изменение состава осадков сооружений биологической очистки в процессе хранения на иловых площадках / Е. В. Круковская, А. Г. Юхневич, В. Н. Марцуль, С. С. Ануфрик // Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 5, Эканоміка. Сацыялогія. Біялогія. – 2013. – № 3 (161). – С. 125–130.
15. Курилович, А. Н. Анаэробно-биологическая переработка жидких и твердых коммунальных отходов на примере КПУП «Брестский мусороперерабатывающий завод» / А. Н. Курилович, Д. Н. Хилько // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве : сб. тр. : в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларуси, Институт жилищно-коммунального хозяйства ; под. общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. О. Китикова. – Минск : БГТУ, 2020. – Ч. 1. – С. 313–318.
16. Лапа, В. В. Баланс азота, фосфора и калия и применение удобрений на почвах пахотных земель Беларуси / В. В. Лапа, Н. Н. Ивахненко // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных наукаў. – 2017. – № 2. – С. 48–57.

17. Максимова, С. Л. Технология переработки осадков сточных вод при помощи вермитехнологий / С. Л. Максимова, Ю. В. Мухин // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве : сб. тр. : в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларусь, Институт жилищно-коммунального хозяйства ; под. общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. О. Китикова. – Минск : БГТУ, 2020. – Ч. 2. – С. 21–23.
18. Марцуль, В. Н. Нормативное правовое регулирование обращения с осадками очистных сооружений канализации / В. Н. Марцуль // Современные тенденции в развитии водоснабжения и водоотведения : материалы Междунар. конф., посвящ. 145-летию УП «Минскводоканал», Минск, 13–14 февр. 2019 г. : в 2 ч. – Минск : БГТУ, 2019. – Ч. 2. – С. 195–200.
19. Матвеева, И. В. Утилизация накопленных осадков сточных вод в асфальтобетоне / И. В. Матвеева, Г. Я. Дрозд // Сборник научных трудов Луганского национального аграрного университета. – Луганск, 2003. – С. 55–60.
20. Михальчук, Н. В. Фоновое содержание тяжелых металлов и микроэлементов в почвах и растительности юго-запада Беларуси как основа для сравнительных оценок при производстве органической продукции на основе принципов зеленой экономики / Н. В. Михальчук, А. Н. Милик // Эколого-географические проблемы перехода к зеленой экономике ; редкол.: В. С. Хомич (гл. ред.), В. Ф. Логинов, Е. В. Санец. – Минск : Строй-МедиаПроект, 2019. – С. 266–281.
21. О налогообложении : к Указу Президента Республики Беларусь, 31 дек. 2019 г., № 503 : внесен в реестр 10 января 2020 г. // Нац. реестр правовых актов Респ. Беларусь. – 2020. – 1/18781.
22. Образование и использование осадка городских сточных вод. Евростат [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00030/default/table?lang=en>. – Дата доступа: 15.02.2021.
23. Пехота, А. Н. Исследование теплотехнических свойств брикетов на основе осадков сточных вод городских очистных сооружений / А. Н. Пехота, Р. Н. Вострова, В. Н. Грибанов // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве : сб. тр. : в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларусь, Институт жилищно-коммунального хозяйства ; под. общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. О. Китикова. – Минск : БГТУ, 2020. – Ч. 2. – С. 99–108.
24. Рожко, С. Н. Получение биогаза – альтернативный метод утилизации осадков сточных вод / С. Н. Рожко, И. И. Вага, И. А. Ровбо // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве : сб. тр. : в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларусь, Институт жилищно-коммунального хозяйства ; под. общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. О. Китикова. – Минск : БГТУ, 2020. – Ч. 2. – С. 130–134.
25. Скворцова, А. А. Утилизация осадков городских сточных вод в строительной керамике / А. А. Скворцова // Международный студенческий строительный форум – 2016. – Белгород, 2016. – С. 517–519.
26. Телушкин, В. В. Применение осадка сточных вод в качестве сырья для производства органоминеральных удобрений. Теория и практика / В. В. Телушкин // Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве : сб. тр. : в 2 ч. / Нац. акад. наук Беларусь, Институт жилищно-коммунального хозяйства ; под. общ. ред. д-ра техн. наук, проф. В. О. Китикова. – Минск : БГТУ, 2020. – Ч. 2. – С. 204–208.
27. Тиво, П. Ф. Тяжелые металлы и экология / П. Ф. Тиво, И. Г. Быцко. – Минск : Юнипол, 1996. – 191 с.
28. Цыбина, А. В. Перспективное направление утилизации продуктов термической обработки осадков сточных вод в производстве керамических строительных материалов / А. В. Цыбина, М. С. Дьяков, Я. И. Вайсман // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6–2. – С. 265–270.
29. Чезлова, О. Е. Оценка обеззараживания анаэробно ферментированного осадка сточных вод при полевом хранении в холодный период / О. Е. Чезлова, А. Н. Лицкевич // Аграрные ландшафты, их устойчивость и особенности развития : сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч. экол. конф. / сост. Л. С. Новопольцева ; под ред. И. С. Белюченко. – Краснодар : КубГАУ, 2021 – С. 399–403.
30. Шепелева, Н. И. Обращение с осадками сточных вод для минимизации воздействия на окружающую среду : дис. ... канд. тех. наук : 25.03.13 / Н. И. Шепелева ; Белорусский национальный технический университет ; науч. рук. И. В. Войтов. – Минск, 2018. – 180 с.
31. 40 CFR part 503 – Standards for the use or disposal of sewage sludge [Electronic resource] // Cornell University Law School. – Mode of access: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/part-503/subpart-B>. – Date of access: 03.02.2021.
32. Chen, H. Utilization of urban sewage sludge: Chinese perspectives / H. Chen [et al.] // Environmental science and pollution research international, 2012. – Vol. 19. – P. 1454–1463.
33. Council Directive 86/278/EEC of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture // Official Journal of the European Communities. – 1986. – Vol. 29 (181). – 28 p.
34. Ecological risk assessment of sewage sludge from municipal wastewater treatment plants: a case study / Z. M. Gusiatin [et al.] // Journal of Environmental science and health. Part A: Environmental science and engineering and toxicology. – 2018. – Vol. 53. – P. 1167–1176.
35. Environmental, economic and social impacts of the use of sewage on land : final rep. Part 2. Report on options and impacts. – R. Salado, 2013. – 158 p.
36. Malhotra, M. Performance of non-catalytic thermal hydrolysis and wet oxidation for sewage sludge degradation under moderate operating conditions / M. Malhotra, A. Garg // Journal of environmental management. – 2019. – Vol. 238. – P. 72–83.
37. Targeted National Sewagw sludge Survey : Statistical Analysis Report. EPA-822-R-08-018. U.S. Environmental Protection Agency. – Washington, 2009. – 58 p.

38. Wang, H. Technological options for the management of biosolids / Wang H. [et al.] // Environmental science and pollution research, 2008. – Vol. 15, iss 4. – P. 308–317.
39. Wei, L. Development, current state and future trends of sludge management in China: Based on exploratory data and CO₂-equivalent emissions analysis / Wei L. [et al.] // Environmental international. – 2020. – Vol. 144.
40. Yang, G. Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China / G. Yang, G. Zhang, H. Wang // Water research, 2015. – Vol. 78. – P. 60–73.

References

1. Antonov K. V., Dubovik O. S. *Problemy i perspektivy utilizacii osadkov stochnyh vod* [Problems and prospects of wastewater sludge utilization] Institut zhilishchno-kommunal'nom hozyajstva NAN Belarusi [Institute of Housing and Communal Services of the National Academy of Sciences of Belarus]. Minsk, 2020, vol. 1, pp. 13–19. (in Russian)
2. Basalaj E. N. *Vliyanie gorodskih ochistnyh sooruzhenij na sostoyanie okruzhayushchej sredy* [Impact of urban wastewater treatment plants on the environment]. Molodezh' v nauke – 2020 : tezisy dokladov XVII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Molodezh' v nauke" [Youth in Science-2020: abstracts of the XVII International Scientific Conference "Youth in Science"]. Minsk, 2020, pp. 557–560. (in Russian)
3. Valiev V. S., Ivanov D. V., Shagidullin R. R. *Analiz mirovogo opyta utilizacii osadka gorodskih stochnyh vod* [Analysis of the world experience in the disposal of municipal wastewater sludge]. Rossiskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian Journal of Applied Ecology]. 2020, vol. 4 (24), pp. 43–51. (in Russian)
4. Vojtov I. V., Marcul' V. N. *Problemy i osnovnye napravleniya sovershenstvovaniya obrashcheniya s osadkami ochistnyh sooruzhenij kanalizacii v Respublike Belarus'* [Problems and main directions of improvement of sludge management in sewage treatment plants in the Republic of Belarus]. Sovremennye tendencii v razvitiu vodosnabzheniya i vodoootvedeniya : materialy Mezhdunarodnoj konferencii, posvyashchennoj 145-letiyu UP "Minskvodokanal" [Modern trends in the development of water supply and sanitation : materials of the International Conference dedicated to the 145th anniversary of the unitary enterprise "Minskvodokanal"]. Minsk, 2019, vol. 2, pp. 137–140. (in Russian)
5. Vojtov I. V., Marcul' V. N. *Sovershenstvovanie obrashcheniya s osadkami ochistnyh sooruzhenij kanalizacii v Respublike Belarus'* [Improvement of sludge management in sewage treatment plants in the Republic of Belarus]. Prirodopol'zovanie i ekologicheskie riski : materialy nauchno-prakticheskoy konferencii [Nature management and environmental risks: materials of the scientific and practical conference]. Minsk, 2019, pp. 56–60. (in Russian)
6. Vostrova R. N. *Proizvodstvo toplivnyh briketov na osnove osadkov stochnyh vod gorodskih ochistnyh sooruzhenij* [Production of fuel briquettes based on sewage sludge from urban wastewater treatment plants]. Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Brest State Technical University. Brest, 2012, pp. 43–45. (in Russian)
7. Ganeev I. G., Madyakin V. F. *Detoksikaciya i utilizaciya osadkov gorodskih stochnyh vod v obshchej sisteme obrashcheniya othodov* [Detoxification and disposal of urban wastewater sludge in the general waste management system]. Sbornik nauchnyh trudov 3-ej Vsesoyuznoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Ekologicheskie problemy promyshlennyh gorodov" [Collection of scientific papers of the 3rd All-Union Scientific and Practical Conference "Environmental problems of Industrial cities"]. Saratov, 2007, pp. 49–52. (in Russian)
8. GOST R 17.4.3.07-2001. *Ohrana prirody. Pochvy. Trebovaniya k svoystvam osadkov stochnyh vod pri ispol'zovanii ih v kachestve udobrenij* [State Standard. Nature protection. Soils. Requirements for the properties of sewage sludge when used as fertilizers]. Moscow, 2001, 5 p. (in Russian)
9. GOST R 54534-2011 *Resursosberezhenie. Osadki stochnyh vod. Trebovaniya pri ispol'zovanii dlya rekul'tivacii narushennyh zemel'* [State Standard. Resource saving. Sewage sludge. Requirements for use for reclamation of disturbed land]. Moscow, 2019, 12 p. (in Russian)
10. Dregulo A. M. *Transformaciya ilovyh kart v ob'ekty nakopленного экологического ущерба: риски, факторы, техногенез* [Transformation of silt maps into objects of accumulated environmental damage: risks, factors, technogenesis]. Moscow, Publishing house "Biblio-Globus", 2019, 270 p. (in Russian)
11. Zajnullin R. R., Galyautdinov A. A. *Izgotovlenie toplivnyh briketov iz osadkov gorodskih stochnyh vod* [Production of fuel briquettes from municipal wastewater sludge]. Innovacionnaya nauka = Innovative science, 2016, vol. 6/2016, pp. 85–87. (in Russian)
12. Kasatikov V. A. *Vliyanie vermicompostirovaniya osadkov gorodskih stochnyh vod na ih agroekologicheskie svojstva i agronomicheskuyu effektivnost'* [Influence of vermicomposting of urban wastewater sediments on their agroecological properties and agronomic efficiency]. Vermicompostirovanie i vermicul'tirovanie kak osnova ekologicheskogo zemledeliya v 21 veke: problemy, perspektivy, dostizheniya : Tezisy dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii [Vermicomposting and vermicultivation as the basis of ecological agriculture in the 21st century: problems, prospects, achievements: Abstracts of the International Scientific and Practical Conference]. Minsk, 2007, pp. 56–61. (in Russian)
13. Kizer A. Z., YUhnovich G. G., Anufrik S. S. *Ekologo-biologicheskie osobennosti osadkov stochnyh vod gorodskih ochistnyh sooruzhenij* [Ecological and biological features of sewage sludge from urban wastewater treatment plants]. Vesnik Grodzenskogo dzyarzhynsaga yuniversiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 5: Ekonomika. Sotsiologiya. Biyalogiya = Bulletin of the Yanka Kupala Grodno State University. Series 5: Economics. Sociology. Biology, part 6, vol. 3, 2016, pp.148–156. (in Russian)
14. Kruskovskaya E. V., YUhnovich A. G., Marcul' V. N., Anufrik S. S. *Izmenenie sostava osadkov sooruzhenij biologicheskoi ochistki v processe hraneniya na ilovyh ploshchadkah* [Changes in the composition of sediments of biological wastewater treatment plants during storage on silty areas]. Vestnik Grodzenskogo dzyarzhynsaga yuniversiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 5: Ekonomika. Sotsiologiya. Biyalogiya = Bulletin of the Yanka Kupala Grodno State University. Series 5: Economics. Sociology. Biology, part 6, vol. 3, 2016, pp.148–156. (in Russian)

- ical treatment facilities during storage on silt sites]. *Vestnik Grodzenskaga dzyarzhaynaga universiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 5: Ekonomika. Sacyyalogiya. Biyalogiya = Bulletin of the Yanka Kupala Grodno State University. Series 5: Economics. Sociology. Biology*, 2013, vol. 3 (161), pp. 125–130. (in Russian)
15. Kurilovich A. N., Hil'ko D. N. *Anaerobno-biologicheskaya pererabotka zhidkih i tverdyh kommunal'nyh othodov na primere Kommunal'nogo proizvodstvennogo unitarnogo predpriyatiya "Brestskij musororeperabatyvayushchij zavod"* [Anaerobic-biological processing of liquid and solid municipal waste on the example of the Municipal Production Unitary Enterprise "Brest Waste Recycling Plant"]. *Nauchno-tehnicheskij progress v zhilishchno-kommunal'nom hozyajstve : sbornik trudov* [Scientific and technical progress in housing and communal services: collection of works]. Minsk, 2020, vol. 1, pp. 313–318. (in Russian)
 16. Lapa V. V., Ivakhnenko N. N. *Balans azota, fosfora i kaliya i primenie udobrenij na pochvah pahotnyh zemel' Belarusi* [Balance of nitrogen, phosphorus and potassium and application of fertilizers on the soils of arable lands of Belarus]. *Vesci Nacyyanal'naj akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnyh navuk = Vesti of the National Academy of Sciences of Belarus. Series of agricultural Sciences*. Minsk, 2017, vol. 2, pp. 48–57. (in Russian)
 17. Maksimova S. L., Muhin Yu. V. *Tekhnologiya pererabotki osadkov stochnyh vod pri pomoshchi vermitehnologij* [Technology for processing sewage sludge using vermitechnologies]. *Nauchno-tehnicheskij progress v zhilishchno-kommunal'nom hozyajstve : sbornik trudov* [Scientific and technical progress in housing and communal services: collection of works]. Minsk, 2020, vol. 2, pp. 21–23. (in Russian)
 18. Marcul' V. N. *Normativnoe pravovoe regulirovanie obrashcheniya s osadkami ochistnyh sooruzhenij kanalizacij* [Regulatory legal regulation of sludge handling in sewage treatment plants]. *Sovremennye tendencii v razvitiu vodosnabzheniya i vodoootvedeniya : materialy Mezhdunarodnoj konferencii, posvyashchennoj 145-letiyu unitarnogo predpriyatiya "Minskvodokanal"* [Proc. of the Int. conf. dedicated to the 145th anniversary of the unitary enterprise "Minskvodokanal" "Modern trends in the development of water supply and sanitation"]. Minsk, 2019, vol. 2, pp. 195–200. (in Russian)
 19. Matveeva I. V., Drozd G. YA. *Utilizaciya nakoplennyh osadkov stochnyh vod v asfal'tobetone* [Disposal of accumulated sewage sludge in asphalt concrete]. *Sbornik nauchnyh trudov Luganskogo nacionarnogo universiteta* [Collection of scientific papers of Luhansk National Agrarian University]. Luhansk, 2003, pp. 55–60. (in Russian)
 20. Mihal'chuk N. V., Myalik A. N. *Fonovoe soderzhanie tyazhelyh metallov i mikroelementov v pochvah i rastitel'nosty ugo-zapada Belarusi kak osnova dlya sravnitel'nyh ocenok pri proizvodstve organicheskoy produkci na osnove principov zelenoj ekonomiki* [Background content of heavy metals and trace elements in soils and vegetation of the South-West of Belarus as a basis for comparative assessments in the production of organic products based on the principles of green economy]. *Ekologo-geograficheskie problem perekhoda k zelenoj ekonomike = Ecological and geographical problems of transition to a green economy*. Minsk, 2019, pp. 266–281. (in Russian)
 21. *O nalogooblozhenii : k Ukazu Prezidenta Respubliki Belarus'*, 31 dekabrya 2019 g., № 503: vnesen v reestr 10 yanvarya 2020 g. [On taxation: to the Decree of the President of the Republic of Belarus, December 31, 2019, no. 503: entered into the register on January 10, 2020]. National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus, 2020, 1/18781. (in Russian)
 22. *Obrazovanie i ispol'zovanie osadka gorodskih stochnyh vod. Evростат* [Formation and use of urban wastewater sludge. Eurostat]. Available at: <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ten00030/default/table?lang=en> (accessed 15 February 2021). (in Russian)
 23. Pekhota A. N., Vostrova R. N., Gribanov V. N. *Issledovanie teplotekhnicheskikh svojstv briketov na osnove osadkov stochnyh vod gorodskih ochistnyh sooruzhenij* [Investigation of thermal properties of briquettes based on sewage sludge from urban wastewater treatment plants]. *Nauchno-tehnicheskij progress v zhilishchno-kommunal'nom hozyajstve : sbornik trudov* [Scientific and technical progress in housing and communal services: collection of works]. Minsk, 2020, vol. 2, pp. 99–108. (in Russian)
 24. Rozhko S. N., Vaga I. I., Rovbo I. A. *Poluchenie biogaza – al'ternativnyj metod utilizacii osadkov stochnyh vod* [Biogas production an alternative method of waste water sludge disposal]. *Nauchno-tehnicheskij progress v zhilishchno-kommunal'nom hozyajstve : sbornik trudov* [Scientific and technical progress in housing and communal services: collection of works]. Minsk, 2020, vol. 2, pp. 130–134. (in Russian)
 25. Skvorcova A. A. *Utilizaciya osadkov gorodskih stochnyh vod v stroitel'noj keramike* [Utilization of urban wastewater sediments in construction ceramics]. *Mezhdunarodnyj studencheskij stroitel'nyj forum – 2016* [International Student Construction Forum–2016]. Belgorod, 2016, pp. 517–519. (in Russian)
 26. Telushkin V. V. *Primenenie osadka stochnyh vod v kachestve syr'ya dlya proizvodstva organomineral'nyh udobrenij. Teoriya i praktika* [The use of sewage sludge as a raw material for the production of organic fertilizers. Theory and practice]. *Nauchno-tehnicheskij progress v zhilishchno-kommunal'nom hozyajstve : sbornik trudov* [Scientific and technical progress in housing and communal services: collection of works]. Minsk, 2020, vol. 2, pp. 204–208. (in Russian)
 27. Tivo P. F., Bycko I. G. *Tyazhelye metally i ekologiya* [Heavy metals and ecology]. Minsk, Unipol, 1996, 191 p. (in Russian)
 28. Cybina A. V., D'yakov M. S., Vajsman Ya. I. *Perspektivnoe napravlenie utilizacii produktov termicheskoy obrabotki osadkov stochnyh vod v proizvodstve keramicheskikh stroitel'nyh materialov* [A promising direction of utilization of waste water sludge heat treatment products in the production of ceramic building materials]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Basic research]. 2014, vol. 6–2, pp. 265–270. (in Russian)
 29. Chezlova O. E., Lickevich A. N. *Ocenka obezzarazhivanija anaerobno fermentirovannogo osadka stochnyh vod pri polevom hranenii v holodnyj period* [Evaluation of disinfection anaerobically fermented sewage sludge in field of storage in cold period]. *Agrarnye landshafty, ih ustojchivost' i osobennosti razvitiya : sbornik nauchnyh trudov*

- [Agricultural landscapes, their sustainability and development features : collection of scientific papers]. Krasnodar, 2021, pp. 399–403. (in Russian)
30. Shepeleva N. I. *Obrashchenie s osadkami stochnyh vod dlya minimizacii vozdejstviya na okruzhayushchuyu sredu. Diss. kand. tekhnich. nauk* [Waste water sludge management to minimize environmental impact. Cand. tech. sci. diss.]. Minsk, 2018, 180 p. (in Russian)
31. 40 CFR part 503 – Standards for the use or disposal of sewage sludge. Cornell University Law School. Available at: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/part-503/subpart-B> (accessed February 3, 2021).
32. Chen H., Yan S-H., Ye Z-L., Meng H-J., Zhu Y-G. Utilization of urban sewage sludge: Chinese perspectives. *Environmental science and pollution research international*. 2012, vol. 19, pp. 1454–1463.
33. Council Directive 86/278/EEC of 12 June 1986 on the protection of the environment, and in particular of the soil, when sewage sludge is used in agriculture. *Official Journal of the European Communities*. 1986, vol. 29 (181), 28 p.
34. Gusiatin Z. M., Kulikowska D., Klik B. K., Hajdukiewicz K. Ecological risk assessment of sewage sludge from municipal wastewater treatment plants: a case study. *Journal of Environmental science and health. Part A: Environmental science and engineering and toxicology*. 2018, vol. 53, pp. 1167–1176.
35. Salado R. Environmental, economic and social impacts of the use of sewage on land : final rep. Part 2. Report on options and impacts. 2013, 158 p.
36. Malhotra M., Garg A. Performance of non-catalytic thermal hydrolysis and wet oxidation for sewage sludge degradation under moderate operating conditions. *Journal of environmental management*. 2019, vol. 238, pp. 72–83.
37. Targeted National Sewage sludge Survey : Statistical Analysis Report. EPA-822-R-08-018. U.S. Environmental Protection Agency. Washington, 2009, 58 p.
38. Wang H., Brown S. L., Magesan G. N., Slade A. H., Quintern M., Clinton P. W., Payn T. W. Technological options for the management of biosolids. *Environmental science and pollution research*. 2008, vol. 15, iss 4, pp. 308–317.
39. Wei L., Zhu F., Li Q., Xue C., Xia X., Yu H., Zhao Q., Jiang J., Bai S. Development, current state and future trends of sludge management in China: Based on exploratory data and CO₂-equivalent emissions analysis. *Environmental international*. 2020, vol. 144.
40. Yang G., Zhang G., Wang H. Current state of sludge production, management, treatment and disposal in China. *Water research*. 2015, vol. 78, pp. 60–73.

Информация об авторе

Басалай Екатерина Николаевна – научный сотрудник, Полесский аграрно-экологический институт НАН Беларуси (ул. Советских Пограничников, 41, 224030, г. Брест, Беларусь). E-mail: basalaiekaterina@yandex.ru

Information about the author

Ekaterina N. Basalai – Researcher, Polesie Agrarian Ecological Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (41, Sovetskikh Pogranichnikov Str., 224030, Brest, Belarus). E-mail: basalaiekaterina@yandex.ru

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОЧВ В ЗОНАХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ЭЛЕКТРОННОГО И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ПЕРЕРАБОТКЕ ОТХОДОВ

В. Д. Чернюк, Т. И. Кухарчик, М. И. Козыренко

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Загрязнение почв в зонах воздействия предприятий по сбору и переработке отходов электронного и электротехнического оборудования (ЭЭО) обусловлено содержащимися в них химическими веществами. В статье приведены результаты изучения содержания тяжелых металлов в почвах и техногенных субстратах, отобранных в зонах влияния предприятий по производству ЭЭО и переработке отходов, расположенных в городе Минске, Беларусь. Всего отобрано и проанализировано 15 проб почвы и 13 техногенных грунтов. Химико-аналитические испытания выполнены методом атомно-абсорбционной спектроскопии (AAS). Приведены статистические параметры содержания тяжелых металлов, выполнено сравнение с опубликованными данными. Показано, что полученные средние концентрации кадмия и свинца в почвах обследованных предприятий в 1,2–1,5, а меди и цинка в 2,7–4,6 раза выше по сравнению с аналогичными показателями для производственных зон г. Минска. Максимальные концентрации тяжелых металлов зафиксированы в пробах техногенных грунтов, содержащих примеси отходов, включая частицы пластика. С привлечением данных по другим странам показана важность изучения такого источника загрязнения почв, как отходы пластика ЭЭО.

Ключевые слова: загрязнение почв; тяжелые металлы; электронное и электротехническое оборудование; переработка отходов.

Для цитирования: Чернюк В. Д., Кухарчик Т. И., Козыренко М. И. Загрязнение почв в зонах воздействия предприятий по производству электронного и электротехнического оборудования и переработке отходов // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 118–126.

SOIL CONTAMINATION IN THE IMPACT ZONES OF ELECTRONIC AND ELECTRICAL EQUIPMENT PRODUCTION AND WASTE RECYCLING

V. D. Chernyuk, T. I. Kukharchyk, M. I. Kazyrenka

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. Soil pollution in the impact zones of enterprises for the collection and processing of electronic and electrical equipment (EEE) wastes is caused by the chemicals they contain. The article presents the results of studying the content of heavy metals in soils and technogenic substrates selected in the impact zones of enterprises for the production of EEE and waste processing, located in the city of Minsk, Belarus. A total of 15 soil samples and 13 samples of technogenic deposits were taken and analyzed. Atomic absorption spectroscopy (AAS) was used in chemical analytical tests. Statistical parameters of the content of heavy metals are presented, their comparison with published data is done. It is shown that the obtained average concentrations of cadmium and lead in the soils of the investigated enterprises are 1.2–1.5 times, and copper and zinc are 2.7–4.6 times higher than those for the industrial zones of Minsk. The maximum concentrations of heavy metals were detected in samples of technogenic deposits containing waste impurities, including plastic particles. On the example of other countries, the importance of EEE plastic waste as a source of soil contamination is shown.

Keywords: soil contamination; heavy metals; electronic and electrical equipment waste recycling.

For citation: Chernyuk V. D., Kukharchyk T. I., Kazyrenka M. I. Soil contamination in the impact zones of electronic and electrical equipment production and waste recycling. *Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 118–126.

Введение. Технический прогресс в последние десятилетия привел к значительному увеличению объемов производства и использования различных электробытовых приборов, вычислительной техники, мобильных телефонов и других изделий, что, с одной стороны, способствовало повышению качества жизни, а с другой – привело к образованию огромных объемов отходов, требующих особого

внимания в связи с содержащимися в них опасными веществами [1, 2]. Изготовленное с использованием различных видов пластика и других материалов, а также широкого спектра химических веществ, электронное и электротехническое оборудование (ЭЭО) и его отходы стали одним из важнейших источников загрязнения окружающей среды. При этом техногенная нагрузка на компоненты природной среды, и прежде всего на почву, увеличивается в связи с быстро растущими объемами переработки отходов ЭЭО. По данным работы [3], если в 2016 г. объемы образования отходов ЭЭО на мировом уровне составляли 44,7 млн т, то к 2021 г. прогнозировались на уровне более 50 млн т.

Поступление загрязняющих веществ в почву возможно на различных этапах обращения с ЭЭО, наиболее важными из которых являются рассеяние химических препаратов и отходов в производственных процессах, а также высвобождение из отходов при демонтаже ЭЭО. К настоящему времени имеется ряд исследований, доказывающих негативное воздействие деятельности по демонтажу и переработке ЭЭО на состояние почв в странах Юго-Восточной Азии, в том числе Китая, Индии, Таиланда, на Филиппинах и др. [4–9]. Огромные объемы переработки отходов ЭЭО в данном регионе (в том числе легальной и нелегальной) обусловили высокие уровни накопления тяжелых металлов и полихлордифениловых эфиров в почве на территории предприятий и в зонах их влияния, а также привели к загрязнению других природных компонентов [10]. В исследовании [8] приведены доказательства увеличения уровней загрязнения почв, прилегающих к промплощадкам территорий сельскохозяйственных угодий тяжелыми металлами, основным источником загрязнения которых являются отходы ЭЭО.

В городах Беларуси, в том числе г. Минске, изучение загрязнения почв в зонах влияния таких производств пока не проводилось. Вместе с тем объемы сбора и переработки отходов ЭЭО, начатые в 2013 г., быстро увеличиваются; в 2019 г. они составили 21,8 тыс. т, что почти в 10 раз больше по сравнению с 2014 г. [11]. Сбор и демонтаж устаревшей бытовой техники и электронного оборудования осуществляется на двух площадках, одна из которых расположена на ул. Славинского, вторая – в районе филиала Белгосуниверситета за кольцевой автодорогой. В городе также представлены предприятия по производству приборов и бытовой техники, электронно-вычислительных машин, что в целом свидетельствует об актуальности исследований.

Цель работы – получить предварительные данные об уровнях накопления тяжелых металлов в почвах в зоне влияния предприятий по производству ЭЭО и переработке отходов ЭЭО.

Объекты и методы. В качестве объектов исследования выбраны четыре предприятия, два из которых связаны с производством приборов, бытовой и вычислительной техники (ОАО «Амкодор-Белвар», ОАО «Минское производственное объединение вычислительной техники (ОАО «МПОВТ»), два других – со сбором и переработкой отходов ЭЭО.

ОАО «МПОВТ», расположенное в центре города, было создано в 1959 г. и функционировало до 2014 г., пока не было перенесено на другую площадку. На бывшей площадке (по состоянию на 2018 г.) велись работы по демонтажу некоторых зданий и перепланировке территории. Деятельность ОАО «Амкодор-Белвар» как приборостроительного завода началась в 1959 г., до этого он был известен как радиозавод. ТERRитория промплощадки частично реконструируется, отдельные площади выделены под парковки.

На предприятиях по сбору и переработке отходов производится демонтаж ЭЭО, разделение отходов с выделением стекла, металла, пластика. В отношении пластика осуществляются сортировка по видам и цвету, прессование или упаковка.

Пробы почвы отбирались на небольших сохранившихся газонах в районе ул. Гикало в непосредственной близости от предприятия, на бывшей промплощадке между пл. Я. Коласа и ул. Кульман, а также на газонах в районе ул. Славинского. Формировались смешанные пробы почвы; глубина отбора – 0–10 см. Отбирались также пробы техногенных грунтов, представляющие собой перемешанные почво-грунты с промплощадок, а также отложения на заасфальтированных участках, образовавшиеся за счет переноса почвенных частиц и мелких фракций отходов с различными потоками.

Химико-аналитические испытания выполнены методом атомно-абсорбционной спектроскопии (AAS) в аккредитованной лаборатории Института природопользования НАН Беларуси. Всего в ходе рекогносцировочных исследований было отобрано и проанализировано 15 проб почвы, 13 проб техногенных грунтов.

Результаты. В табл. 1 представлены результаты химико-аналитических исследований. Полученные данные показали, что почвы, отобранные в зоне влияния предприятий по производству оборудования, характеризовались высоким содержанием кадмия, цинка, свинца и меди. Максимальные концентрации кадмия составили 1,67 мг/кг, свинца – 105,4, цинка – 588,6, меди – 497,2 мг/кг. Установленные нормативы по кадмию превышены для 83 % проб, по цинку – для 75 %, по свинцу и меди – в 67 % проб. Наиболее высокая кратность превышения ОДК зафиксирована в отношении содержания цинка (10,7 раза) и меди (15 раз).

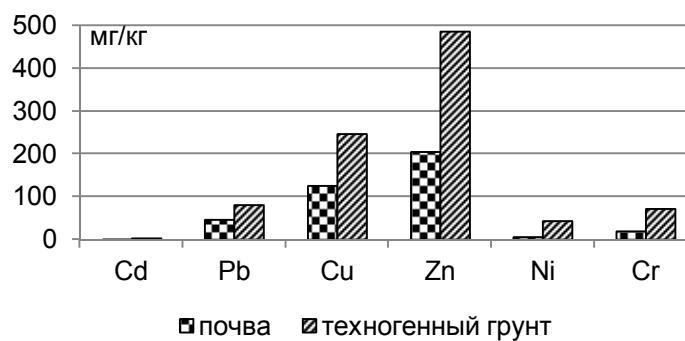
В техногенных грунтах содержание загрязняющих веществ превосходило показатели в почве от 1,7 раза для свинца до 6,8 раза для никеля (рис. 1).

Таблица 1. Содержание тяжелых металлов в пробах субстратов, отобранных в зонах влияния предприятий по производству оборудования, сбору и переработке отходов ЭЭО**Table 1. The content of heavy metals in samples of substrates taken in the impact zones of enterprises for EEE production and recycling of EEE waste**

Показатель	Cd		Pb		Cu		Zn		Ni		Cr		
	1*	2**	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Почва	Минимум, мг/кг	0	0	9,7	18,5	6,8	13,5	19,5	54,6	0,6	1,2	3,8	5,4
	Максимум, мг/кг	1,7	0	105,4	65,1	497,2	23,3	588,6	285,1	24,5	1,3	41,4	7,0
	Медиана, мг/кг	0,7	0	41,3	30,5	69,8	19,0	186	121,3	3,7	1,3	16,0	7,0
	Среднее, мг/кг	0,9	0	46,6	38	125,8	18,6	205,1	153,7	6,4	1,3	19,1	6,4
	Стандартное отклонение	0,5	0	30,3	24,2	149,6	4,9	174,6	118,6	7,2	0,02	12,5	0,9
	Максимальная кратность превышения ПДК/ОДК, раз	3,3	—	3,3	2,0	15,1	—	10,7	5,2	1,2	—	—	—
	Доля проб с превышением ПДК/ОДК, %	83	—	67	33	67	—	75	67	8	—	—	—
Техногенный грунт	Минимум, мг/кг	0	1,4	14,0	44,4	30,4	35,8	51,1	172,3	1	2,2	5,8	2,0
	Максимум, мг/кг	10,9	10,3	188,9	377,5	1178,3	800,0	1657,2	1241,1	225,9	114,0	335,4	178,0
	Медиана, мг/кг	1,8	1,8	60,9	71,2	64,1	40,9	236,2	1139,5	4,8	11,7	14,5	7,5
	Среднее, мг/кг	2,9	4,9	81,4	134,9	246,2	211,0	485,6	927,8	43,9	31,4	72,5	41,6
	Стандартное отклонение	3,8	4,5	61,0	139,2	416,2	332,3	565,2	438,0	83,1	47,2	122,2	76,4
	Максимальная кратность превышения ПДК/ОДК, раз	21,9	20,5	5,9	11,8	35,7	24,2	30,1	22,6	11,3	5,7	3,4	1,8
	Доля проб с превышением ПДК/ОДК, %	75	100	75	100	75	100	75	100	25	40	25	20
Среднее для почв производственных зон г. Минска [12]	0,6		31,5		27,5		57,2		13,5		—		
ПДК/ОДК, мг/кг [23]	0,5		32,0		33,0		55,0		20,0		100,0		

*Производство ЭЭО.

**Переработка отходов ЭЭО.

**Рис. 1. Среднее содержание тяжелых металлов в почвах и техногенных грунтах, отобранных в зоне влияния предприятий по производству бытовой и вычислительной техники, мг/кг****Fig. 1. Average content of heavy metals in soils and technogenic deposits sampled in the impact zones of EEE production, mg/kg**

В техногенных грунтах зафиксирован более широкий спектр тяжелых металлов. При этом максимальные концентрации кадмия достигали 10,9 мг/кг, свинца – 188,9, меди – 1178,3, цинка – 1657,2, никеля – 225,9, хрома – 335,4 мг/кг. Максимальная кратность превышения ПДК/ОДК составила: по кадмию – 22,0 раза, свинцу – 6,0, меди – 36,0, цинку – 30,0, никелю – 11,0, хрому – 3,4 раза.

В пробах почвы, отобранных в непосредственной близости от предприятий по сбору и демонтажу ЭЭО, обнаружены свинец, медь, цинк, никель и хром. Содержание свинца превысило ПДК в одной пробе в 2,0 раза, содержание цинка – в 67 % проб с превышением ОДК в 2,2–5,2 раза. Уровни меди, никеля и хрома находились в пределах установленных нормативов.

В пробах техногенных грунтов (песка с примесью обломков стекла и пластиковых деталей), отобранных в зоне влияния предприятий по сбору и демонтажу ЭЭО, как и в зонах влияния предприятий по производству ЭЭО, зафиксированы высокие концентрации тяжелых металлов. При этом максимальное содержание кадмия составило 10,3 мг/кг, свинца – 377,5, меди – 800,0, цинка – 1241,1,

никеля – 114,0, хрома – 178,0 мг/кг. В 100 % случаев содержание кадмия, свинца, меди и цинка превышает нормативы с максимальным превышением установленных значений в 12,0–24,0 раза. Наиболее высокие уровни содержания никеля и хрома превышают ОДК в 5,7 и 1,8 раза, доля проб с превышением ОДК указанных элементов – 40 и 20 % соответственно.

В среднем, превышение содержания тяжелых металлов в техногенных грунтах по сравнению с концентрациями в почвах составило для свинца – 3,5 раза, меди – 11,3, цинка – 6,0, никеля – 25,0, хрома – 6,5 раза (рис. 2).

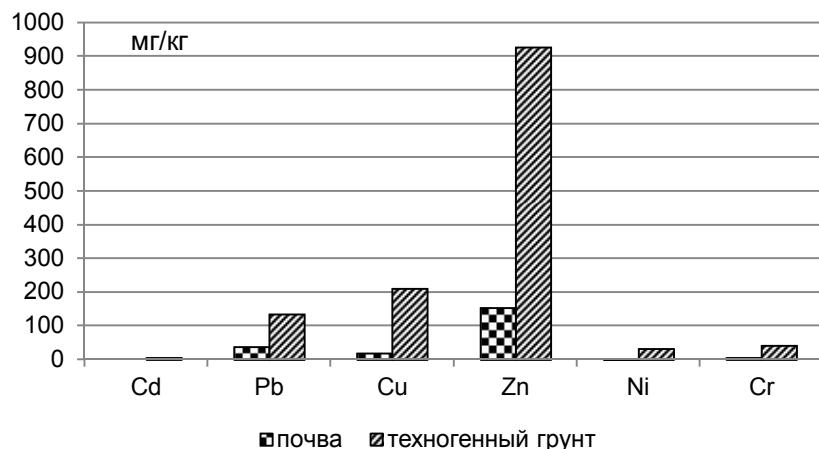


Рис. 2. Среднее содержание тяжелых металлов в почвах и техногенных грунтах, отобранных в зоне влияния предприятий по сбору и демонтажу ЭЭО, мг/кг

Fig. 2. Average content of heavy metals in soils and technogenic deposits collected in the impact zones of enterprises for EEE collection and dismantling, mg/kg

Сравнение полученных данных со средними концентрациями тяжелых металлов в почвах производственных зон г. Минска [12] показало, что для почв, отобранных в зоне воздействия предприятий по производству ЭЭО и переработке его отходов, характерно более высокое содержание практических всех элементов, в особенности меди (до 4,6 раза) и цинка (до 3,6 раза) (рис. 3).

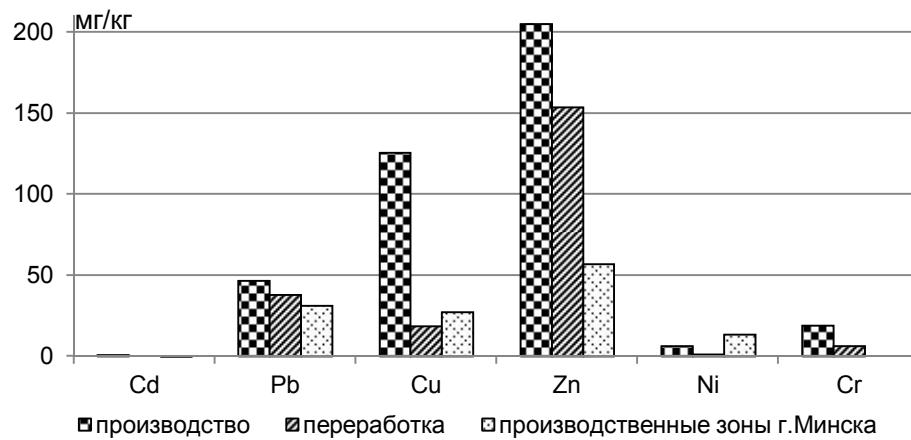


Рис. 3. Сравнение среднего содержания тяжелых металлов в почвах в зонах влияния предприятий по производству ЭЭО, переработке отходов ЭЭО и в целом производственных зон г. Минска, согласно работе [12], мг/кг

Fig. 3. Comparison of average heavy metals content in soil of impact zones of enterprises for EEE production, enterprises for EEE collection and dismantling and industrial zones of Minsk according to [12], mg/kg

Поступление тяжелых металлов в почву при производстве приборов и вычислительной техники возможно от различных источников, включая гальванические процессы. На предприятиях по разбору и переработке ЭЭО неизбежно попадание тяжелых металлов вследствие боя оборудования и разрушения пластика.

Состав техногенных грунтов, для которых отмечаются более высокие концентрации тяжелых металлов, а также значительная вариабельность значений, зависят от количества попадающих в них примесей. В частности, в пробах техногенных грунтов, отобранных в зоне действия предприятий по переработке отходов ЭЭО, нами было зафиксировано наличие пластика, представленного как отдельными небольшими фрагментами полимерных материалов (бой пластика), так и в виде мелкой пластиковой крошки. Количество частиц пластика в техногенных грунтах варьировало от 2 ед./100 г субстрата до 10 ед./100 г субстрата. Установлено, что на долю частиц размером 1–5 мм приходится от 24 до 40 % общей массы частиц пластика.

Как известно, при производстве первичного пластика используются различные добавки, содержащие тяжелые металлы, включая стабилизаторы и пигменты. По данным работы [13], концентрации тяжелых металлов при производстве пластика могут варьировать от 0,05 до 3 % при использовании их в составе стабилизаторов, и от 0,01 до 10 % – в составе пигментов. Содержание тяжелых металлов в пластике отходов ЭЭО также существенно различается; например, диапазон измеренных концентраций свинца составил от менее 5 до 3000 мг/кг, кадмия – от менее 15 до 400 мг/кг [14]. Первые исследования, выполненные в Беларусь с химико-аналитическим определением содержания тяжелых металлов в пробах пластика ЭЭО, показали, что содержание свинца обнаруживается в 40 % проб (максимальное значение – 259 мг/кг пластика), кадмия – в 28 % (22 мг/кг), хрома – 20 % (98 мг/кг) [15]. Установленные Директивой 2011/65/EU (RoHS) и Технологическим регламентом ТР ЕАЭС 037/2016 нормативы для свинца и хрома равняются 0,1 % (1000 мг/кг), кадмия – 0,01 % (100 мг/кг). Вышесказанное означает, что ЭЭО может выступать одним из основных источников поступления тяжелых металлов в почву, а их содержание в почвах в зоне влияния предприятий по производству и переработке ЭЭО может находиться в более высоких пределах, чем полученные результаты данного исследования.

На сходство источников попадания тяжелых металлов в почву и техногенные грунты рассматриваемых предприятий указывают результаты анализа их взаимосвязи. Представленные на рис. 4 и 5 графики указывают на наличие статистически значимой линейной связи между содержанием цинка и свинца (коэффициент корреляции составил порядка $r = 0,95$), меди и хрома ($r = 0,9$) в почвах. Более слабая зависимость наблюдается между содержанием в почве меди и цинка ($r = 0,81$), меди и никеля ($r = 0,83$). Между остальными тяжелыми металлами в почвах явных взаимосвязей выявлено не было (коэффициент корреляции r составлял $<0,6$).

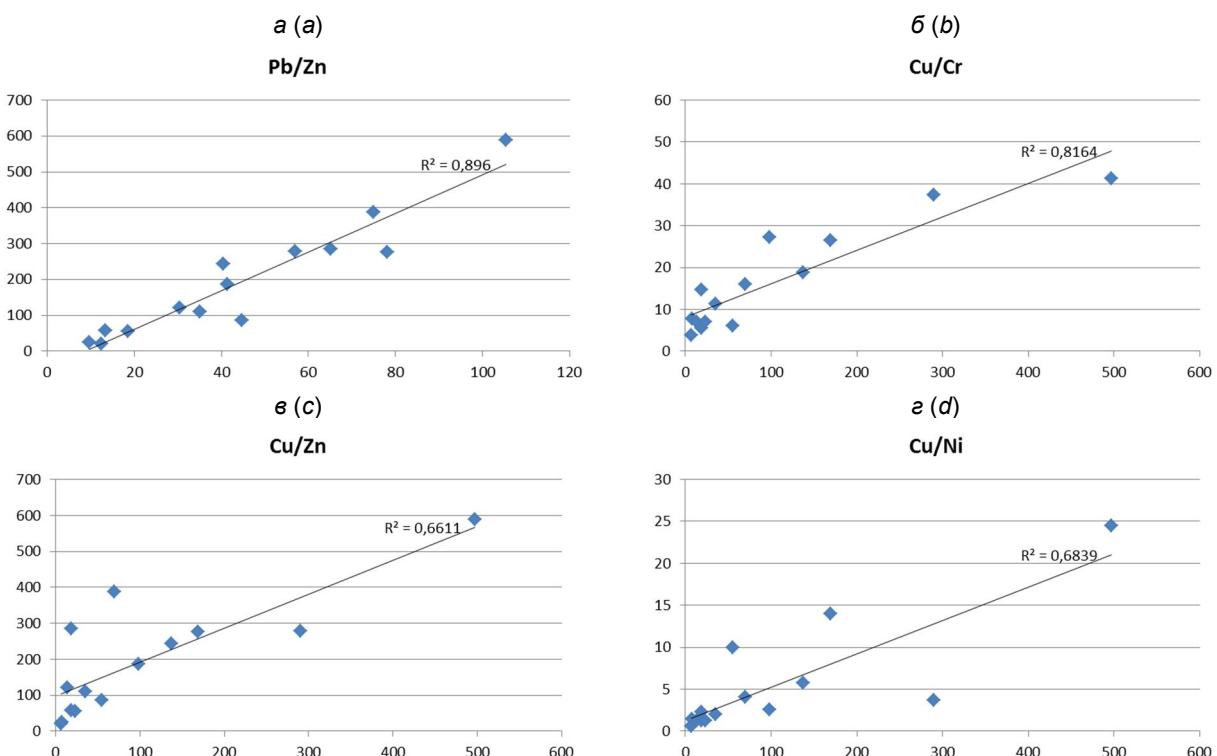


Рис. 4. Зависимость содержания в почвах между Zn и Pb (а), Cu и Cr (б), Cu и Zn (в), Cu и Ni (г)

Fig. 4. Dependence of the content in soils: Zn and Pb (a), Cu and Cr(b), Cu and Zn (c), Cu and Ni (d)

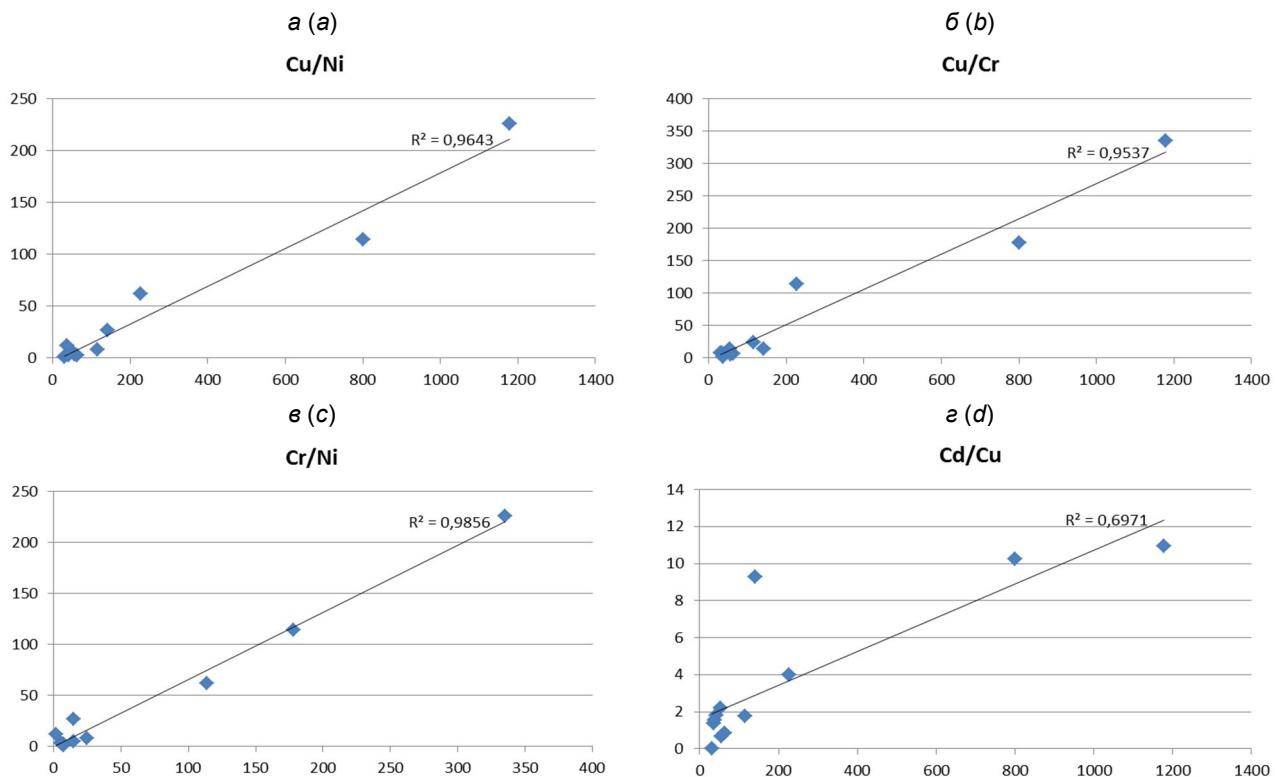


Рис. 5. Зависимость содержания в техногенных грунтах между Cu и Ni (а), Cu и Cr (б), Cd и Ni (в), Cd и Cr (г)

Fig. 5. Dependence of the content in technogenic deposits:
Cu and Ni (a), Cu and Cr (b), Cd and Ni (c), Cd and Cr (d)

В техногенных грунтах, как и в почвах, прослеживается зависимость между медью и хромом ($r = 0,98$), медью и никелем ($r = 0,98$). Помимо того, в техногенных грунтах наблюдается взаимосвязь между содержанием хрома и никеля (коэффициент корреляции $r = 0,99$). Также отмечается более слабая зависимость кадмия и меди ($r = 0,83$). Взаимосвязь между содержанием свинца и цинка ($r = 0,55$), которая отмечалась в почвах, не наблюдается.

Для сравнения полученных результатов выполнен краткий анализ опубликованных данных, касающихся содержания тяжелых металлов в почвах в зонах влияния предприятий по переработке отходов ЭЭО (табл. 2).

Анализ показал, что содержание тяжелых металлов в почвах г. Минска, отобранных в зоне воздействия предприятий по производству и переработке ЭЭО, соизмеримо в ряде случаев с ранее проведенными зарубежными исследованиями. Так, в работах [16, 17, 19] и других приводятся схожие данные о содержании свинца в почвах, концентрации которого колеблются в пределах 40–150 мг/кг. Однако приводится и ряд исследований, в которых содержание свинца значительно выше полученных нами [5, 16, 22]. В исследовании [16] концентрации свинца достигали более 1600 мг/кг. Содержание меди и цинка было соизмеримо с исследованиями, проводимыми в Индии (Бангалор), Вьетнаме, Китае (Гуйюй, Венминг, Тайчжоу) [5, 16, 17, 19, 20]. Содержание меди и цинка в почвах Индии, Нигерии, Ганы, Филиппин, Таиланда и некоторых районах Китая было значительно выше результатов, полученных в данном исследовании [5, 16–18, 21, 22], и достигало для меди – 6734 мг/кг [5], для цинка – 4737 мг/кг. Содержание кадмия было соизмеримо с большинством проводимых ранее исследований и находилось в пределах 0,1–2,5 мг/кг [5, 16, 17, 19, 21]. Лишь в работах [16–18, 20] приводятся данные, согласно которым концентрации кадмия в почвах вблизи перерабатывающих заводов ЭЭО достигали 39,0 мг/кг. Определенные уровни содержания хрома в почвах и техногенных грунтах были соизмеримы с зарубежными исследованиями – средние концентрации находились в диапазоне 25–80 мг/кг [5, 17, 19]. Как и в случае с хромом, аналогичная ситуация прослеживается с никелем (средние концентрации составляли 30–80 мг/кг). Согласно работе [5], в почвах Мандхоли (Индия), отобранных на площадке по переработке ЭЭО, было зафиксировано наличие никеля, концентрация которого составила 1465 мг/кг.

Таблица 2. Содержание тяжелых металлов в почве в зоне влияния предприятий по переработке отходов ЭЭО в различных странах**Table 2. The content of heavy metals in the soil sampled in the impact zones of enterprises for the processing of EEE waste in different countries**

Расположение объекта	Описание объекта	Содержание тяжелых металлов, мг/кг						Источник
		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	
Лангтанг (Китай)	Мастерские по разборке отходов ЭЭО	39,3	—	6371,5	—	1635,4	3039,6	[22]
Цинюань (Китай)	Участок переработки электронных отходов	6,3	—	2159,3	78,1	—	1366,0	[19, 31]
Гуйюй (Китай)	Участок переработки электронных отходов	0,1	58,1	50,0	57,0	77,5	102,0	[19, 20]
Тайчжоу (Китай)	Зона переработки электронных отходов	6,4	26,8	256,4	—	46,8	209,8	[29]
Мандхоли (Индия)	Площадка по переработке электронных отходов	1,1	83,6	6734,9	1465,0	2134,0	416,3	[5]
Манила (Филиппины)	Площадки по переработке электронных отходов	2,5	—	680,0	47,0	800,0	900,0	[32]
Бангкок (Таиланд)	Бытовые мастерские, в которых демонтируются электронные отходы	—	—	4827,7	74,4	1058,6	1847,3	[27]

Заключение. Полученные результаты исследований согласуются с ранее полученными данными для почв производственных зон г. Минска [12] и дополняют их в части изучения территорий предприятий по производству ЭЭО и переработке отходов. Показано, что полученные средние концентрации кадмия и свинца в почвах обследованных предприятий в 1,2–1,5, а меди и цинка в 2,7–4,6 раза выше по сравнению с аналогичными показателями для производственных зон г. Минска. Максимальные концентрации тяжелых металлов зафиксированы в пробах техногенных грунтов, содержащих примеси отходов, включая частицы пластика.

Показано, что одним из основных источников поступления тяжелых металлов в почву в зонах влияния предприятий по переработке отходов ЭЭО является пластик, в который они добавляются при производстве в составе стабилизаторов, пигментов и других добавок. Даже при условии соблюдения регламентов, установленных в отношении тяжелых металлов для пластика, уровни их содержания существенно выше по сравнению с почвой.

Полученные данные для почв г. Минска, а также анализ зарубежных источников свидетельствуют о высоких уровнях загрязнения почв в зонах воздействия предприятий по переработке отходов ЭЭО, в особенности кадмием, свинцом, медью и цинком.

Приведено сравнение полученных данных с зарубежными данными, которые подтверждают высокие уровни загрязнения почв в зонах воздействия предприятий по переработке ЭЭО. Показана необходимость более детальных исследований в зонах воздействия предприятий по производству и переработке отходов ЭЭО в Беларуси.

Список использованных источников

1. The Generation, Composition, Collection, Treatment and Disposal System, and Impact of E-Waste / D. Mmereki [et al.] // E-Waste in Transition – From Pollution to Resource. – 2016. – P. 65–93. – doi:<http://dx.doi.org/10.5772/61332>
2. Lucier, C. A. Electronic Waste Recycling and Disposal: An Overview. Assessment and Management of Radioactive and Electronic Wastes / C. A. Lucier, B. J. Gareau // Hazardous Wastes. – 2019. – P. 1–12. – doi:<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.85983>
3. The Global E-waste Monitor – 2017. Quantities, Flows, and Resources / C. Baldé [et al.] // United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna. 2017. – 116 c.
4. Risk assessment of polychlorinated biphenyls and heavy metals in soils of an abandoned e-waste site in China / Quan Zhang [et al.] // Environmental Pollution. – 2014. – Vol. 185. – P. 258–265.
5. Pradhan, J. K. Informal e-waste recycling: Environmental risk assessment of heavy metal contamination in Mandholi industrial area, Delhi, India / J. K. Pradhan, S. Kumar // Environmental Science and Pollution Research. – 2014. – Vol. 21. – P. 7913–7928.
6. Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: Implications for dissemination of heavy metals / Qihang Wu [et al.] // Science of The Total Environment. – 2015. – Vol. 506–507. – P. 217–225.
7. Heavy metals in soil contaminated through e-waste processing activities in a recycling area: Implications for risk management / Yu Han [et al.] // Process Safety and Environmental Protection. – 2019. – Vol. 125. – P. 189–196.

8. Shi, A. Long-term effect of E-waste dismantling activities on the heavy metal's pollution in paddy soils of southeastern China / An Shi // *Science of The Total Environment*. – 2020. – Vol. 705. – P. 135971.
9. Pollution of plastic debris and halogenated flame retardants (HFRs) in soil from an abandoned e-waste recycling site: Do plastics contribute to (HFRs) in soil? / Jiecong Zhang [et al.] // *Journal of Hazardous Materials*. – 2020. – Vol. 410. – P. 1246–1249.
10. WEEE Treatment in Developing Countries: Environmental Pollution and Health Consequences / Mentore Vaccari [et al.] // *Int. J. Environ. Res. Public Health*. – 2019. – Vol. 16. – P. 1595. – doi:10.3390/ijerph16091595
11. Дополнение в отчет Оператора за 2019 год – Объемы использования вторичных материальных ресурсов в Республике Беларусь в 2019 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://vtoroperator.by/content/dopolnenie-v-otchet-operatora-za-2019-god>. – Дата доступа: 18.02.2021.
12. Городская среда: геоэкологические аспекты / В. С. Хомич [и др.]. – Минск : Беларуская наука, 2013. – 301 с.
13. Hansen, E. Hazardous substances in plastics. Survey of chemical substances in consumer products / E. Hansen, N. Nilsson, K. S. R. Vium. – The Danish Environmental Protection Agency, Denmark, 2014. – №. 132. – 182 p.
14. Polybrominated diphenylethers listed as Stockholm Convention POPs, other brominated flame retardants and heavy metals in e-waste polymers in Nigeria / O. Sindiku [et al.] // *Environ Sci Pollut Res Int.* – 2014. – Vol. 22 (19). – P. 14489–501. – doi:10.1007/s11356-014-3266-0
15. Кухарчик, Т. И. Содержание загрязняющих веществ в отходах пластика электротехнических изделий в Беларусь / Т. И. Кухарчик, В. Д. Чернюк, В. П. Кулакович // Доклады Национальной академии наук Беларусь. – 20121. – Т. 65, № 2. – С. 224–233.
16. Song, Q. Environmental effects of heavy metals derived from the e-waste recycling activities in China: A systematic review / Q. Song, J. Li // *Waste Manag.* – 2014. – Vol. 34. – P. 2587–2594.
17. Environmental pollution and human body burden from improper recycling of e-waste in China: A short-review / A. K. Awasthi [et al.] // *Environ. Pollut.* – 2018. – Vol. 243. – P. 1310–1316.
18. Distribution of metals and brominated flame retardants (BFRs) in sediments, soils and plants from an informal e-waste dismantling site, SouthChina / J. Wang [et al.] // *Environ. Sci. Pollut. Res.* – 2015. – Vol. 22. – P. 1020–1033.
19. Levels and ecological risk assessment of metals in soils from a typical e-waste recycling region in southeast China / W. Zhao [et al.] // *Ecotoxicology*. – 2015. – Vol. 24. – P. 1947–1960.
20. Jun-hui, Z. Eco-toxicity and metal contamination of paddy soil in an e-wastes recycling area / Z. Jun-hui, M. Hang // *J. Hazard. Mater.* – 2009. – Vol. 165. – P. 744–750.
21. Impact of metals in surface matrices from formal and informal electronic-waste recycling around Metro Manila, the Philippines, and intra-Asian comparison / T. Fujimori [et al.] // *J. Hazard. Mater.* – 2012. – Vol. 221–222. – P. 139–146. – doi:10.1016/j.jhazmat.2012.04.019
22. Damrongsi, S. Heavy metal contamination characteristic of soil in WEEE (waste electrical and electronic equipment) dismantling community: A case study of Bangkok, Thailand / S. Damrongsi, S. Vassanadumrongdee, P. Tanwattana // *Environ. Sci. Pollut. Res.* – 2016. – Vol. 23. – P. 17026–17034. – doi:10.1007/s11356-016-6897-5
23. Перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве. Гигиенические нормы : ГН 2.1.7.12-1-2004. – Утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь от 25 февр. 2004 г. № 28.

References

1. Mmereki D., Li B., Baldwin A., Hong L. The Generation, Composition, Collection, Treatment and Disposal System, and Impact of E-Waste. *E-Waste in Transition – From Pollution to Resource*, 2016, pp. 65–93. doi:<http://dx.doi.org/10.5772/61332>
2. Lucier C. A., Gareau B. J. Electronic Waste Recycling and Disposal: An Overview. *Assessment and Management of Radioactive and Electronic Wastes. Hazardous Wastes*, 2019, pp. 1–12. doi:<http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.85983>
3. Baldé C., Forti V., Gray V., Kuehr R., Stegmann P. The Global E-waste Monitor 2017. United Nations University (UNU): Bonn, Germany; International Telecommunication Union (ITU): Geneva, Switzerland; International SolidWaste Association (ISWA): Vienna, Austria, 2017. Available at: http://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/Global-E-waste_Monitor_2017_electronic_single_pages_.pdf (accessed 10 January 2019).
4. Quan Zhang, Jingjia Ye, Jinyuan Chen, Hangjie Xu, Cui Wang, Meirong Zhao. Risk assessment of polychlorinated biphenyls and heavy metals in soils of an abandoned e-waste site in China. *Environmental Pollution*, 2014, no. 185, pp. 258–265.
5. Pradhan J. K., Kumar S. Informal e-waste recycling: Environmental risk assessment of heavy metal contamination in Mandoli industrial area, Delhi, India. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2014, no. 21, pp. 7913–7928. doi: 10.1007/s11356-014-2713-2
6. Qihang Wu., Jonathan Y. S. Leung, Xinhua Geng, Shejun Chen, Xuexia Huang, Haiyan Li, Zhuying Huang, Libin Zhu, Jiahao Chen, Yayin Lu. Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: Implications for dissemination of heavy metals. *Science of The Total Environment*, 2015, no. 506–507, pp. 217–225.
7. Yu Han, Zhenwu Tang, Jiazheng Sun, Xiang Yang Xing. Heavy metals in soil contaminated through e-waste processing activities in a recycling area: Implications for risk management. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, no. 125, pp. 189–196.
8. Shi A. Long-term effect of E-waste dismantling activities on the heavy metals pollution in paddy soils of southeastern China. *Science of The Total Environment*, 2020, no. 705, p. 135971.
9. Jiecong Zhang, Xiaodan Wu, Huiying Guo, Xiaobo Zheng, Bixian Mai. Pollution of plastic debris and halogenated flame retardants (HFRs) in soil from an abandoned e-waste recycling site: Do plastics contribute to (HFRs) in soil? *Journal of Hazardous Materials*, 2020, no. 410, pp. 1246–1249.

10. Mentore Vaccari , Giovanni Vinti, Alessandra Cesaro, Vincenzo Belgiorno, Stefan Salhofer, Maria Isabel Dias, Aleksander Jandric. WEEE Treatment in Developing Countries: Environmental Pollution and Health Consequences. *Int. J. Environ. Res. Public Health.*, 2019, no. 16, pp. 1595. doi:10.3390/ijerph16091595
11. *Dopolneniye v otchet Operatora za 2019 god – Ob'yemy ispol'zovaniya vtorichnykh material'nykh resursov v Belarusi v 2019 godu* [Supplement to the Operator's report for 2019 – Volumes of use of secondary material resources in Belarus in 2019]. Available at: <https://vtoroperator.by/content/dopolnenie-v-otchet-operatora-za-2019-god> (accessed 18 February 2021). (in Russian)
12. Khomich V. S., Kakareka S. V., Kukharchik T. I., Kravchuk L. A., Struk M. I., Kadatskaya O. V., Bykova N. K., Gorodetskiy D. Yu., Zhivnach S. G., Kozyrenko M. I., Komarovskiy M. Ye., Kruckovskaya O. Yu., Kurman P. V., Ovcharova Ye. P., Ryzhikov V. A., Savchenko S. V., Sanets Ye. V. *Gorodskaya sreda: geoekologicheskiye aspekty* [Urban environment: geoecological aspects]. Minsk, 2013, 301 p. (in Russian)
13. Hansen E., Nillson N., Vium K. S. R. Hazardous substances in plastics. Survey of chemical substances in consumer products. *The Danish Environmental Protection Agency, Denmark*, 2014, no. 132, 182 p.
14. Omotayo Sindiku, Joshua Babayemi, Oladele Osibanjo, Martin Schlummer, Mathias Schluep, Alan Watson, Roland Weber. Polybrominated diphenylethers listed as Stockholm Convention POPs, other brominated flame retardants and heavy metals in e-waste polymers in Nigeria. *Environ Sci Pollut Res Int.*, 2014, no. 22(19), pp. 14489–501, doi:10.1007/s11356-014-3266-0
15. Kukharchik T. I., Chernyuk V. D., Kulakovych V. P. *Soderzhaniye zagryaznyayushchikh veshchestv v otkhodakh plastika elektrotehnicheskikh izdeliy v Belarusi* [Content of pollutants in plastic waste of electrical equipment in Belarus]. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 2, pp. 224–233. (in Russian)
16. Song Q., Li J. Environmental effects of heavy metals derived from the e-waste recycling activities in China: A systematic review. *Waste Manag.*, 2014, no. 34, pp. 2587–2594.
17. Awasthi A. K., Wang M., Awasthi M. K., Wang Z., Li J. Environmental pollution and human body burden from improper recycling of e-waste in China: A short-review. *Environ. Pollut.*, 2018, no. 243, pp. 1310–1316.
18. Wang J., Liu L., Wang J., Pan B., Fu X., Zhang G., Zhang L., Lin K. Distribution of metals and brominated flame retardants (BFRs) in sediments, soils and plants from an informal e-waste dismantling site, South China. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2015, no. 22, pp. 1020–1033.
19. Zhao W., Ding L., Gu X., Luo J., Liu Y., Guo L., Shi Y., Huang T., Cheng S. Levels and ecological risk assessment of metals in soils from a typical e-waste recycling region in southeast China. *Ecotoxicology*, 2015, no. 24, pp. 1947–1960.
20. Jun-hui Z., Hang M. Eco-toxicity and metal contamination of paddy soil in an e-wastes recycling area. *J. Hazard. Mater.*, 2009, no. 165, pp. 744–750.
21. Fujimori T., Takigami H., Agusa T., Eguchi A., Bekki K., Yoshida A., Terazono A., Ballesteros F.C. Impact of metals in surface matrices from formal and informal electronic-waste recycling around Metro Manila, the Philippines, and intra-Asian comparison. *J. Hazard. Mater.*, 2012, no. 221–222, pp. 139–146. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.04.019
22. Damrongsiri S., Vassanadumrongdee S., Tanwattana P. Heavy metal contamination characteristic of soil in WEEE (waste electrical and electronic equipment) dismantling community: A case study of Bangkok, Thailand. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2016, no. 23, pp. 17026–17034. doi:10.1007/s11356-016-6897-5
23. ГН 2.1.7.12-1-2004. *Perechen' predel'no dopustimykh kontsentratsiy (PDK) i oriyentirovchno dopustimykh kontsentratsiy (ODK) khimicheskikh veshchestv v pochve* [Hygiene standards 2.1.7.12-1-2004. The list of maximum permissible concentrations (MPC) and roughly permissible concentrations (RPC) of chemical substances in the soil]. Approved by the Resolution of the Chief State Sanitary Doctor of the Republic of Belarus dated February 25, 2004, no. 28. (in Russian)

Информация об авторах

Чернюк Владимир Дмитриевич – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: chernyuk.vladimir.m@mail.ru

Кухарчик Тамара Иосифовна – доктор географических наук, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tkukharchyk@gmail.com

Козыренко Маргарита Ивановна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: margarita_kozyrenko@tut.by

Information about the authors

Vladimir D. Chernyuk – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: chernyuk.vladimir.m@mail.ru

Tamara I. Kukharchyk – D. Sc. (Geography), Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tkukharchyk@gmail.com

Marharyta I. Kazyrenka – Ph. D. (Geography), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: margarita_kozyrenko@tut.by

СРЕДОФОРМИРУЮЩИЕ ФУНКЦИИ ЗЕЛЕНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДА ВИТЕБСКА

Л. А. Кравчук, Н. М. Баженова, А. Н. Гайшун

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. Для оценки средоформирующих функций озелененных территорий («зеленой инфраструктуры») г. Витебска с использованием сведений о функциональных типах градостроительных структур выделялись различные климатопы. В г. Витебске идентифицировано 17 типов и 47 видов климатопов. С использованием данных дистанционного зондирования Земли осуществлена дифференцированная оценка температуры подстилающей поверхности (LST) и нормализованного вегетационного индекса (NDVI) для различных видов городских климатопов. Полученные результаты демонстрируют сравнительно низкие средние показатели LST в водных, лесных, некоторых парковых климатопах и растительности в поймах рек. В застроенной части города LST имеет наиболее высокие значения в производственных, коммунально-складских, дорожных климатопах и в центральной исторической части города. Коэффициенты корреляции между LST и степенью озелененности, между LST и NDVI в различных видах климатопов г. Витебска оцениваются в -0,78 и -0,77 соответственно, что подтверждает высокую средоформирующую роль городской растительности в летний период.

Ключевые слова: город; зеленая инфраструктура; климатоп; дистанционное зондирование; NDVI; LST.

Для цитирования. Кравчук Л. А., Баженова Н. М., Гайшун А. Н. Средоформирующие функции зеленой инфраструктуры города Витебска // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 127–137.

ENVIRONMENT-FORMING FUNCTIONS OF GREEN INFRASTRUCTURE OF VITEBSK

L. A. Kravchuk, N. M. Bazhenova, A. N. Gaishun

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. To assess the environment-forming functions of green areas ("green infrastructure") in Vitebsk using data on the functional types of urban planning structures, various climatopes were identified. In Vitebsk, 17 types and 47 species of climatopes have been identified. Using Earth remote sensing data, a differentiated assessment of the Land Surface Temperature (LST) and the Normalized Vegetation Index (NDVI) was carried out for various types of urban climatopes. The data obtained demonstrate comparatively low average LST values in aquatic, forest, some park climatopes and vegetation in floodplains. In the built-up part of the city LST has the highest values in production, communal, road climatopes and in the central historical part of the city. The correlation coefficient between LST and the degree of greenery, between LST and NDVI in different types of climatopes of Vitebsk is estimated at -0,78 and -0,77, respectively, which confirms the high environmental-forming role of urban vegetation in summer.

Keywords: city; green infrastructure; climatopes; remote sensing; NDVI; LST.

For citation. Kravchuk L. A., Bazhenova N. M., Haishun A. N. Environment-forming function of green infrastructure of Vitebsk. *Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 127–137.

Введение. Исследования структуры и эффективности функционирования растительного покрова («зеленой инфраструктуры») в урбанизированных условиях актуальны в связи с необходимостью оптимизации градостроительных процессов для целей устойчивого развития городов. Выявление связи между изменением микроклиматических параметров городских пространств и озелененностью урбанизированных территорий позволит совершенствовать приемы создания благоприятной окружающей среды.

Инструментальные исследования микроклиматических особенностей функционирования растительного покрова в урбанизированных условиях проводились в различных направлениях, в том числе и в Беларуси [1].

Диапазон исследований и возможности познания особенностей взаимодействия природной составляющей и техногенной инфраструктуры городских территорий расширился в связи с развитием ГИС-технологий и дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [2].

Дифференциация урбанизированной территории на участки со сходными типами функционального использования и параметрами застройки является одним из приемов познания закономерностей функционирования различных градостроительных структур и элементов их организации. Для данных целей в качестве единицы анализа и картографирования на территории города выделяются участки, обладающие сходными параметрами застроенности и функционального использования территории. Совместное использование ГИС и данных ДЗЗ дает возможность оценить влияние различных структурных элементов городских территорий на поддержание благоприятных условий окружающей среды в городах, в том числе микроклимата.

В процессе исследований рядом авторов [3, 4] были установлены зависимости ряда микроклиматических параметров городской среды от структуры застройки, которые идентифицировались как различные климатопы, или локальные климатические зоны (LCZ). На основании исследований обозначены характерные микроклиматические особенности основных типов климатопов, встречающихся в городах [3]:

- водный, характеризующийся в летний период более прохладным воздухом в дневное время, и более теплым – ночью, высокими значениями влажности воздуха и скорости ветра;
- луговой, а также сельскохозяйственный, имеющие большую суточную и сезонную амплитуду температуры и влажности воздуха, практически не влияющие на воздушные потоки;
- лесной, лесопарковый, парковый, отличающиеся сглаженными суточными и годовыми ходами температуры и влажности воздуха, пониженной температурой и повышенной влажностью воздуха в летний период, по сравнению с открытыми пространствами;
- низкоплотная малоэтажная застройка с высокой степенью озелененности, имеющая параметры основных климатических характеристик, сравнимые с луговыми климатопами, но менее заметное снижение температуры воздуха в ночные часы и более заметное снижение средней скорости ветра;
- историческая малоэтажная плотная застройка с низкой степенью озелененности, высокой долей искусственных покрытий, имеющая слабый воздухообмен с окружающим пространством, заметное повышение дневных температур и слабо выраженное смягчение ночных минимумов в приземном слое атмосферы;
- жилая многоэтажная застройка, где ночное выхолаживание выражено слабо, воздухообмен с прилегающей территорией затруднен, скорость ветра по сравнению с открытыми пространствами снижена;
- высокоплотная застройка с высотными зданиями и низкой долей насаждений, которая характеризуется резким дневным перегревом воздуха и его слабым остыванием в ночные часы, снижением скорости ветра при формировании локальных участков струйных воздушных потоков вдоль улиц и проездов, а также участков с контрастными скоростями ветра при обтекании воздухом отдельных высотных зданий;
- производственные и коммунально-складские территории, плотно застроенные зданиями, с большой долей искусственных покрытий и низкой степенью озелененности. В суточном и годовом ходе метеовеличин здесь прослеживаются повышенный температурный фон и низкая влажность воздуха. Воздухообмен затруднен, скорость ветра всегда ниже средних по городу. Имеют большую тепловую инерцию и выделяют в атмосферу большое количество тепла техногенного происхождения;
- транспортные магистрали, характеризуются интенсивным перегревом днем и быстрым ночным охлаждением. При определенных условиях создают эффект ветрового «каньона».

В каждом конкретном городе типология и соотношение климатопов могут изменяться в зависимости от особенностей природных условий и планировочной организации городской территории в конкретной ландшафтно-экологической обстановке.

Материалы и результаты исследований. Для исследований средообразующих функций озелененных территорий в основных градостроительных структурах был выбран город Витебск, который является крупным административным, культурным и промышленным центром Беларуси. В городе проживает около 360 тыс. человек, здесь действуют предприятия металообработки, производства строительных материалов, тканей, ковровых изделий, обуви, телевизионной техники и другие, которые, наряду с автотранспортом, являются источниками выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

Местоположение г. Витебска в Белорусском Поозерье, приуроченность его западной части к Подвинью (район Шумилинской равнины), восточной – к Витебскому Поозерью (район Витебской возвышенности) [5] детерминирует особенности структуры и функционирования природных и природно-антропогенных геосистем. В рельефе города выделяются долины р. Западной Двины и её притоков (Витьба, Лучоса), а также система оврагов и балок. Левобережье, где расположен административный и культурный центр, отличается крупнохолмистым рельефом с оврагами, глубина которых иногда достигает 10–12 м. Правобережная часть более ровная, с одиночными возвышеностями («Юрьева Горка»). Максимальные колебания высот в черте города близки к 80 м, наиболее характерны перепады до 20 м. Абсолютная высота варьирует от 125 м над уровнем моря (урез Западной Двины в месте слияния с Лучосой) до 204 м (на восточной окраине города) [6].

Существующая система озелененных территорий г. Витебска («зеленая инфраструктура») обусловлена как природными условиями его местоположения, так историческими и социально-экономическими особенностями городского развития, а также целенаправленными мероприятиями по градостроительному планированию и озеленению городской территории. Она выявлялась в процессе выполнения ряда исследовательских работ, в том числе по заданию 1.5.1 ГНТП «Природные ресурсы и окружающая среда» в период с 2014 по 2015 г. Данные о структуре и функциональном использовании городской территории получены при обработке картографических материалов, с учетом сведений геопортала земельной информационной системы РУП «Проектный институт Белгипротезм» (gismap.by), а также натурных исследований.

Как выявлено, в составе озелененных территорий г. Витебска достаточно высоко участие лесов, а также массивов древесно-кустарниковой растительности (ДКР), в том числе произрастающей на незастроенных участках долин рек Западной Двины, Витьбы и Лучосы.

Городские леса приурочены к северо-западной, северо-восточной и южной окраинам, занимают площадь 364 га и относятся к подзоне дубово-темнохвойных лесов, Западно-Двинскому округу, Суражско-Лучосскому лесорастительному району. Однако в пределах города по разнообразию типов они не богаты и отличаются от структуры лесов лесорастительного района более высоким участием сосняков (мшистой, орляковой и черничной серий), сороольшаников, осинников и топольников, отсутствием ельников [7, 8].

Наиболее благоприятные условия для отдыха горожан формируются в парках, где, помимо насаждений, в той или иной степени развита рекреационная инфраструктура. В г. Витебске на момент исследований функционировало восемь парков, общая площадь которых 117 га: им. Советской Армии (Мазурино), расположенный на берегу Западной Двины на северо-западной окраине города, им. М. Фрунзе, Победителей – в центральной части, а также парки жилых районов – им. 30-летия ВЛКСМ, Железнодорожников, 40-летия ВЛКСМ, 30-летия ВЛКСМ и 1000-летия Витебска.

Леса, парки, реки и озелененные территории вблизи Западной Двины, а также насаждения оврагов, балок и отдельно расположенных возвышенностей («Юрьева Горка») составляют основу природно-экологического каркаса города. Долины рек Западной Двины, Витьбы и Лучосы разделяют город на планировочные районы и являются коридорами, связывающими город с природными комплексами пригородной зоны. К долинам этих рек приурочены коридоры национальной экологической сети: международный СЕ4 («Западная Двина»), соединяющий город с ядром европейского значения Е14 («Суражское») и пригородными зонами отдыха, и региональный CR4 («Лучоса»), соединяющий город с ядром национального значения N1 («Бабиновичское»), согласно данным, приведенным на сайте <https://minpriroda.gov.by/uploads/images/maps/Ekoset-RB-02.2018-utensh-311.jpg>.

В застроенной части города озелененные территории (ОТ) представлены как многочисленными скверами, бульварами, так и насаждениями общественных центров, жилой многоквартирной и усадебной застройки, на производственных территориях, вдоль улиц и дорог, в защитных зонах предприятий и др.

В г. Витебске функционируют 31 сквер, 2 бульвара, а также ОТ общественных центров, суммарная площадь которых составляет около 52 га. Расположены они как в центральной исторической части города, так и в жилых районах (скверы на площадях В. И. Ленина, Победы, 1000-летия Витебска, Героям войны 1812 года, у Смоленского рынка, на привокзальной площади, по улицам Баумана, Космонавтов, Буденного, Глинки, Герцена, Горького, Пролетарской, Толстого, им. В. В. Маяковского и др.).

Для оценки значения озелененных территорий в формировании микроклиматических особенностей различных градостроительных образований выделялись различные типы и виды городских климатопов с учетом классификации, использованной в г. Минске [9]. Однако в г. Витебске, помимо климатопов, идентифицированных на территории г. Минска, существенную часть города (около 8 %) занимают дачные климатопы (садово-огородные участки и дачные кооперативы), расположенные на окраине, а также климатопы оврагов и балок, отнесенные к резервным озелененным территориям (РОТ).

Соотношение различных типов климатопов на территории г. Витебска приведено на рис. 1.

Для выявления особенностей функционирования и роли озелененных территорий в создании благоприятных микроклиматических условий в различных типах градостроительных образований г. Витебска по данным дистанционного зондирования Земли из космоса (ДЗЗ) были определены показатели нормализованного вегетационного индекса (NDVI), характеризующего функционирование растительного покрова, и температуры подстилающей поверхности (Land Surface Temperature – LST). В исследованиях некоторых авторов [2, 4] отмечено, что LST коррелирует с температурой атмосферного воздуха и почвы, а также зависит от растительного покрова территории.

Для определения значений NDVI использовался снимок от 26 июля 2015 г. со спутника серии Sentinel-2 уровня обработки 1C с пространственным разрешением 10 м. Снимок для территории г. Витебска подобран с помощью веб-интерфейса (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Главным критерием выбора даты снимка, помимо времени проведения наземных исследований структуры озелененных территорий, являлась минимальная облачность в период наиболее активной вегетации растений. Обработка снимка в разрезе выделов картографирования проведена при помощи растрового калькулятора QGIS 3.14.

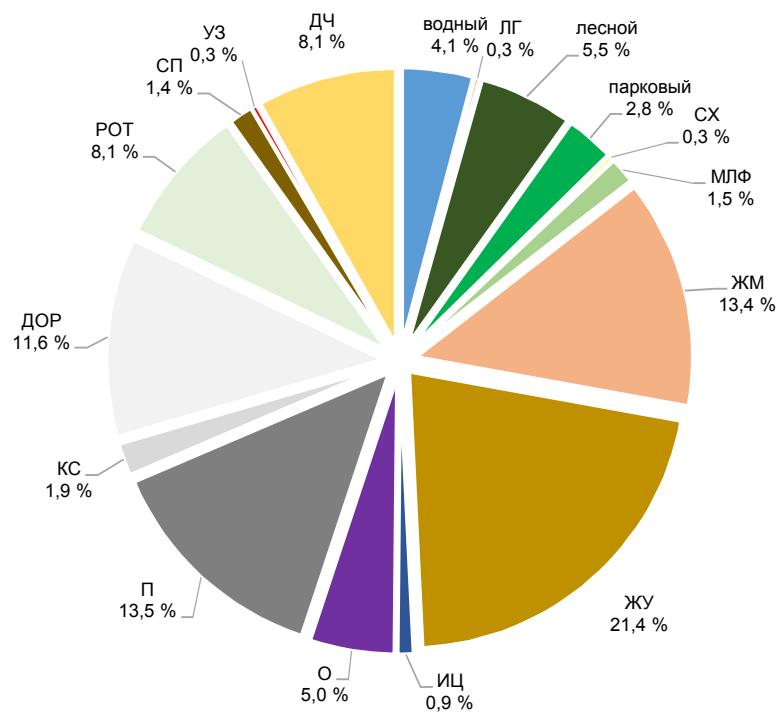


Рис. 1. Соотношение различных типов климатопов в г. Витебске.

Условные обозначения типов климатопов: МЛФ – малые ландшафтные формы (скверы, бульвары и др.), РОТ – резервные озелененные территории, СХ – сельскохозяйственный; климатопы застройки: ДОР – дорожной, ДЧ – дачной, ЖМ – жилой много квартирной, ЖУ – жилой усадебной, ИЦ – исторического центра, КС – коммунально-складской, О – общественной, П – производственной, СП – специальной, УЗ – участки текущей застройки

Fig 1. The ratio of different types of climatopes in Vitebsk. Symbols types climatopes:
 МЛФ – small landscape forms (squares, boulevards, etc.), РОТ – reserve green areas, СХ – agricultural;
 building climatopes: ДОР – road, ДЧ – summer housing, ЖМ – residential multi-apartment,
 ЖУ – residential estate, ИЦ – historical center, КС – communal warehouse, О – public,
 П – production, СП – special, УЗ – areas of current development

На рис. 2 помещена схема распределения NDVI на территории г. Витебска, на рис. 3 приведены средние значения NDVI в различных климатопах городской территории, на диаграмме, представленной на рис. 4, – статистические характеристики NDVI в основных видах городских климатопов.

Как видно из рис. 3 и 4, наиболее высокие средние значения NDVI отмечаются преимущественно в лесных (ЛС), лесоболотных (ЛСБ), лесопарковых (ЛСП) климатопах города ($NDVI_{avg} = 0,65-0,69$; $NDVI_{max} = 0,83$), а также в пределах резервных озелененных территорий с древесно-кустарниковой растительностью, достигая максимальных значений 0,81 в долинах рек Западной Двины, Витьбы и Лучосы, где в составе древостояев в основном преобладают бересклеты и ивы, встречаются тополя, клены, липы.

В парковых климатопах г. Витебска, в отличие от лесных и лесопарковых, высока доля рекреационной инфраструктуры (дорожек, площадок). В большинстве парков города растительный покров включает разнородные, разновозрастные группы и массивы твердолиственных пород (липы, клена, ясения, конского каштана и др.), реже встречаются мягколиственные, доля участия хвойных пород незначительна, газоны в парках систематически выкашиваются. Анализ данных и картосхем распределения средних значений NDVI (рис. 2–4) демонстрирует более высокие средние значения NDVI (0,6) в старых парках (им. Советской Армии, им. М. Фрунзе), нежели в новых (Победителей, им. 1000-летия Витебска). В последних средние значения NDVI сравнительно ниже (0,5) и близки к таковым для озелененных территорий в жилой много квартирной застройке. Это может быть обусловлено, с одной стороны, высокой долей дорожек, площадок, газонов (парк Победителей с набережной), с другой – разреженными молодыми древостоями, деградированными газонами (парк им. 1000-летия Витебска).

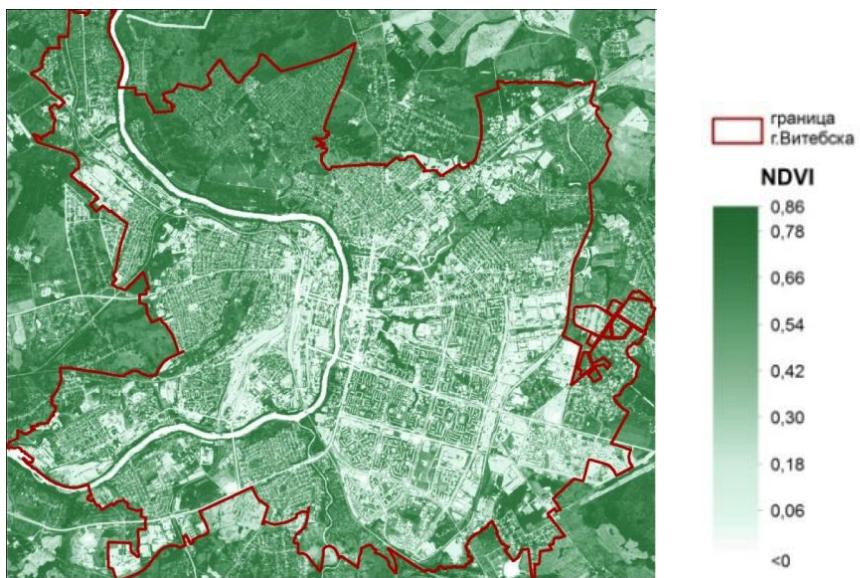


Рис. 2. Распределение NDVI на территории г. Витебска (по данным Sentinel-2; дата съемки 26.07.2015)

Fig 2. Distribution of NDVI on the territory of Vitebsk (according to Sentinel-2; date of shooting 07/26/2015)

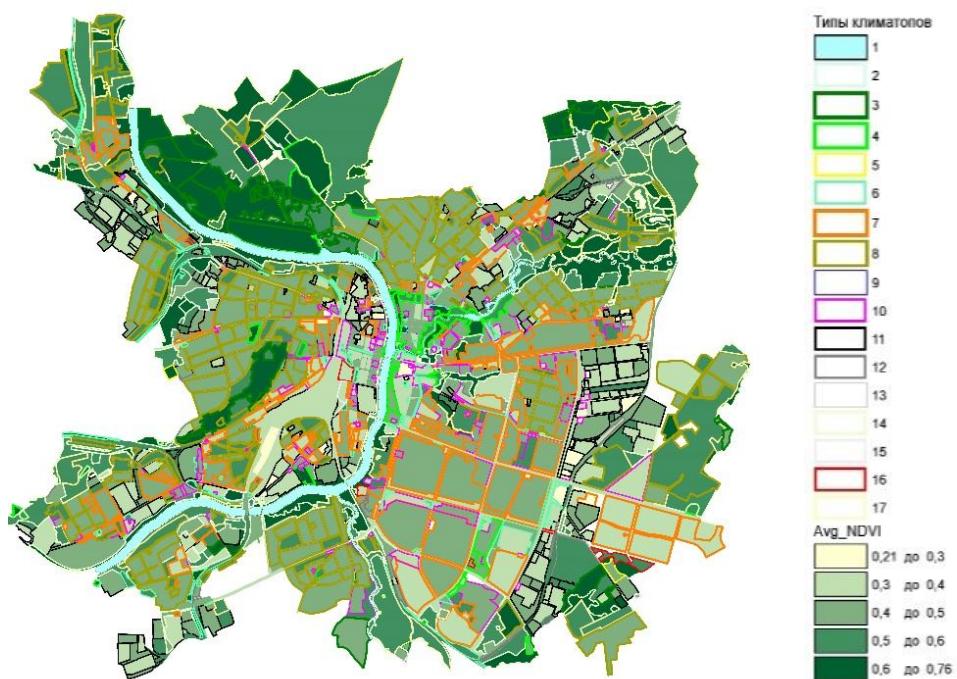


Рис. 3. Средние значения NDVI в различных климатопах на территории г. Витебска.
Условные обозначения типов климатопов: в незастроенной части города:

1 – водные, 2 – лугопарковые, 3 – лесные, 4 – парковые, 5 – сельскохозяйственные,
6 – малые ландшафтные формы, 14 – резервные озелененные территории;
застройка: 7 – жилая много квартирная, 8 – жилая усадебная, 9 – исторического центра,
10 – общественная, 11 – производственная, 12 – коммунально-складская, 13 – дороги;
15 – специальная, 17 – дачная; 16 – участки текущей застройки

Fig 3. Average NDVI in different climatopes of Vitebsk.
Legend for the types of climatopes: in the undeveloped part of the city: 1 – water, 2 – meadow-park,
3 – forest, 4 – park, 5 – agricultural, 6 – small landscape forms, 14 – reserve green areas;
building: 7 – residential multi-apartment, 8 – residential estate, 9 – historical center, 10 – public,
11 – industrial, 12 – communal warehouse, 13 – roads; 15 – special, 17 – summer housing;
16 – areas of current development

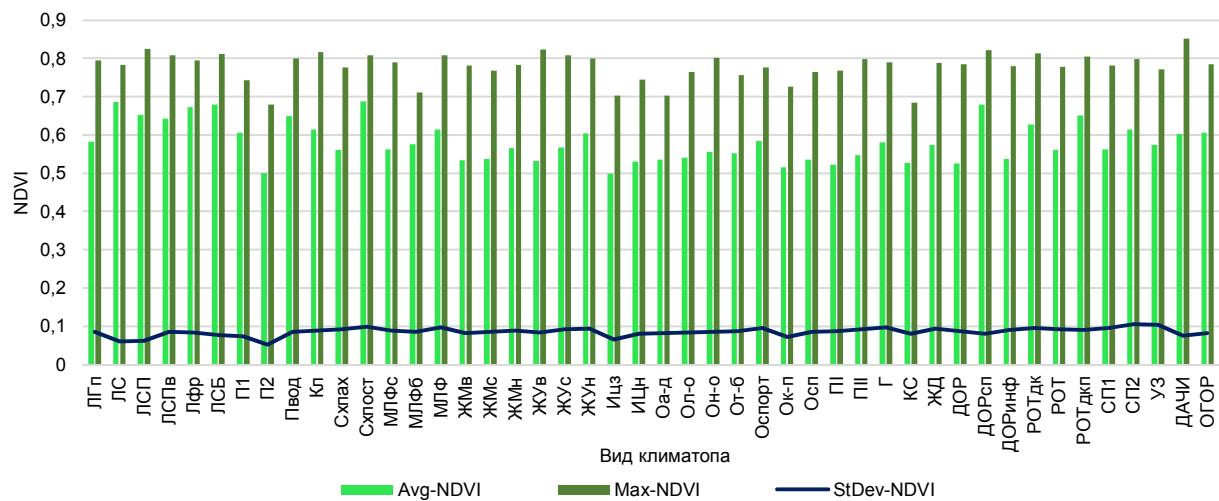


Рис. 4. Значения NDVI для озелененных территорий в различных видах климатопов г. Витебска

Fig 4. Values of NDVI for green areas in different types of climatopes in Vitebsk

Малые ландшафтные формы (МЛФ) – скверы, бульвары, ОТ общественных центров имеют сравнительно небольшие размеры, обычно расположены между массивами застройки в окружении дорог, имеют развитую систему дорожек и площадок. В составе насаждений здесь высоко участие твердолистенных пород деревьев, произрастают кустарники, в том числе и хвойных пород. Как показывает анализ (см. рис. 3, 4), насаждения МЛФ в г. Витебске, особенно скверов, характеризуются пониженными средними значениями NDVI (0,56–0,62), по сравнению с лесами, лесопарками и резервными озелененными территориями с ДКР.

В застроенной части г. Витебска показатели NDVI анализировались для озелененных территорий в выделах, имеющих различный тип функционального использования и плотность застройки.

В климатопах жилой многоквартирной застройки высокой (ЖМВ), средней (ЖМС) и низкой (ЖМН) плотности растительный покров сформирован полосами, разреженными группами деревьев и кустарников, с участием кустарников и разновозрастных деревьев преимущественно лиственных пород (клены, липы, ясени, березы, каштаны, фруктовые деревья), изредка встречаются хвойные породы. Газоны фрагментированы площадками, дорожками, тропами. Средние значения NDVI варьируют в пределах 0,53–0,57, максимальные достигают 0,78. Отмечается увеличение NDVI при снижении плотности застройки. Анализ картосхемы распределения средних значений NDVI на городской территории (см. рис. 3) демонстрирует пониженные значения вегетационного индекса в новых кварталах высокоплотной многоквартирной застройки на окраине города (Билево, Юг-7, Медцентр и др.), где газоны высоко фрагментированы, подвергаются систематической косьбе, древостой представлены молодыми саженцами, высока доля территорий с твердым покрытием (проездов, дорожек, игровых и спортивных площадок), а также участков незавершенного строительства.

Растительный покров жилой усадебной высокоплотной (ЖУВ), среднеплотной (ЖУС), низкоплотной (ЖУН) застройки и застройки в дачных массивах представлен в основном плодовыми деревьями и кустарниками, а также огородными культурами. Характеризуется средними значениями NDVI, ненамного выше, чем в жилой многоквартирной застройке, увеличиваясь при снижении плотности усадебной застройки и в дачных массивах (см. рис. 4).

В общественной застройке, как и на участках исторического центра г. Витебска, растительный покров представлен небольшими группами или солитерами деревьев и кустарников, газонами и цветниками. Здесь NDVI_{avg} варьирует от 0,52 до 0,58, достигая максимальных значений 0,8 в климатопах общественной научно-образовательной застройки (Он-о).

В климатопах производственной и коммунальной застройки, а также на спектраториях различных видов NDVI_{avg} варьируют в пределах 0,52–0,55, при зарегистрированных максимальных значениях 0,8. Высокие максимальные показатели NDVI в данных климатопах возможно объяснить участием в составе насаждений промышленных и коммунальных территорий и их защитных зон быстрорастущих пород деревьев – тополя, ивы, березы, клена ясенелистного и др.

Относительно высокие значения NDVI регистрируются в дорожных климатопах г. Витебска, что обусловлено достаточной развитой системой защитных насаждений на участках вдоль железной

дороги, магистралей и улиц, особенно вблизи промзон и микрорайонов жилой многоквартирной застройки.

При расчете соотношения числа пикселей с NDVI, соответствующих растительности ($>0,4$), к общему числу пикселей, зарегистрированных в выделах анализа и картографирования, была построена дифференцированная схема степени озелененности различных участков городской территории г. Витебска (рис. 5). Она демонстрирует низкие показатели в климатопах производственных территорий, дорожных (в том числе железнодорожного узла), в общественных зонах и в историческом центре города. Низкой степенью озелененности характеризуется также высокоплотная многоквартирная жилая застройка на юго-восточной окраине города в новом микрорайоне Билево, где высока доля территорий под зданиями, проездами, стоянками, площадками и участками незавершенного (на момент съемки) строительства.

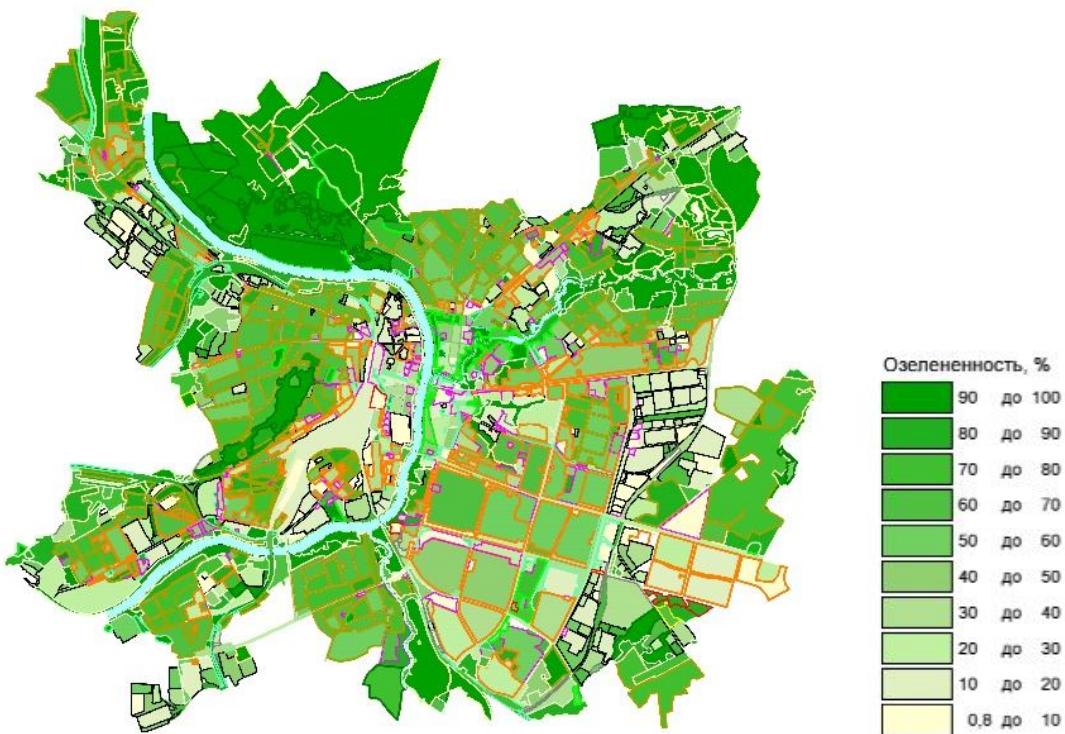


Рис. 5. Схема озелененности г. Витебска (в разрезе климатопов).
Условные обозначения типов климатопов те же, что и на рис. 3

Fig 5. Greening scheme of Vitebsk (in the context of climatopes).
The symbols for the types of climatopes according to fig. 3

При исследовании особенностей функционирования различных градостроительных структур г. Витебска для оценки их роли в формировании городского острова тепла были выполнены расчеты значений LST в различных городских климатопах. Для этого использовались данные дистанционного зондирования Земли из космоса со спутника Landsat 8 с пространственным разрешением 100 м. Для территории г. Витебска использовался снимок от 25 июля 2015 г., подобранный в Earthexplorer.usgs.gov. Обработка снимка в разрезе выделов картографирования проведена при помощи растрового калькулятора QGIS 3.14. Значения LST и средние показатели для климатопов г. Витебска приведены на рис. 6–8.

В г. Витебске в классе климатопов незастроенных территорий, как видно из рис. 7 и 8, в лесных, лугопарковых и парковых климатопах отмечается варьирование LST, которое детерминировано структурой растительного покрова (соотношением элементов озеленения – деревьев, кустарников, травянистой растительности, видовым составом насаждений), его фрагментацией дорожками, площадками. Низкими LST (20,3°...20,8°) характеризуются крупные массивы лесов (ЛС), лесопарки у воды (ЛСПв), парки вблизи рек (Пвод), а также речные климатопы (Р). Для небольших массивов леса, расположенных фрагментами на северо-восточной и южной окраинах города, средние значения LST несколько выше, чем в крупных лесных массивах северо-западной окраины.

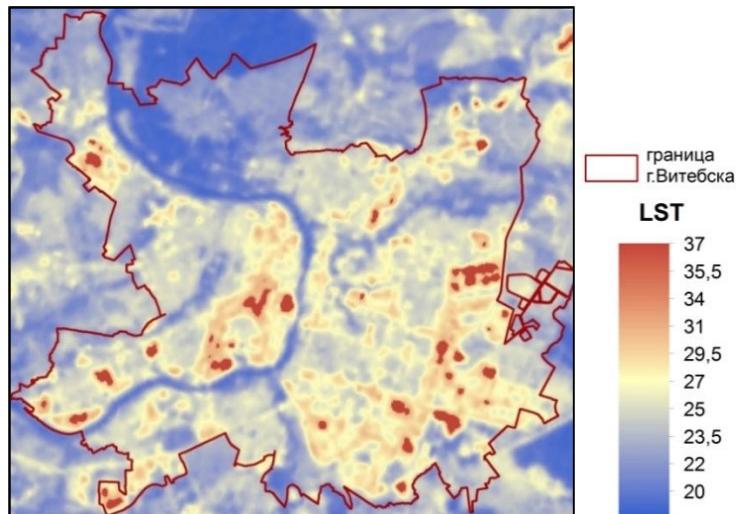


Рис. 6. Распределения температуры подстилающей поверхности (LST) на территории г. Витебска (по данным Landsat-8, дата съемки 25.07.2015, $T_{\text{возд}}$ +23...24 °C, скорость ветра – 2 м/с)

Fig 6. Distribution of the Land Surface Temperature (LST) on the territory of Vitebsk (according to Landsat-8, date of shooting 25/07/2015, T_{air} +23...24 °C, wind speed – 2 m/s)



Рис. 7. Средние значения температуры подстилающей поверхности (Avr_LST) в различных климатопах на территории г. Витебска. Условные обозначения типов климатопов те же, что и на рис. 3

Fig 7. Average values of the Land Surface Temperature (Avr_LST) in different climatopes on the territory of Vitebsk. The symbols for the types of climatopes according to fig. 3

В прогулочных парках г. Витебска (П2), имеющих высокую долю территорий с твердым покрытием (например, парк им. Победителей с широкой набережной), средние значения LST (28°) наиболее высокие в классе климатопов незастроенных территорий.

Повышенными значениями LST характеризуются МЛФ (скверы, бульвары и др.). Для небольших скверов и бульваров значения LST практически не отличаются от окружающей жилой и общественной застройки и варьируют от $25,5^{\circ}$ до $28,0^{\circ}$, с минимальными показателями от $21,7^{\circ}$ до $27,0^{\circ}$, а максимальными от $27,8^{\circ}$ до $31,9^{\circ}$.

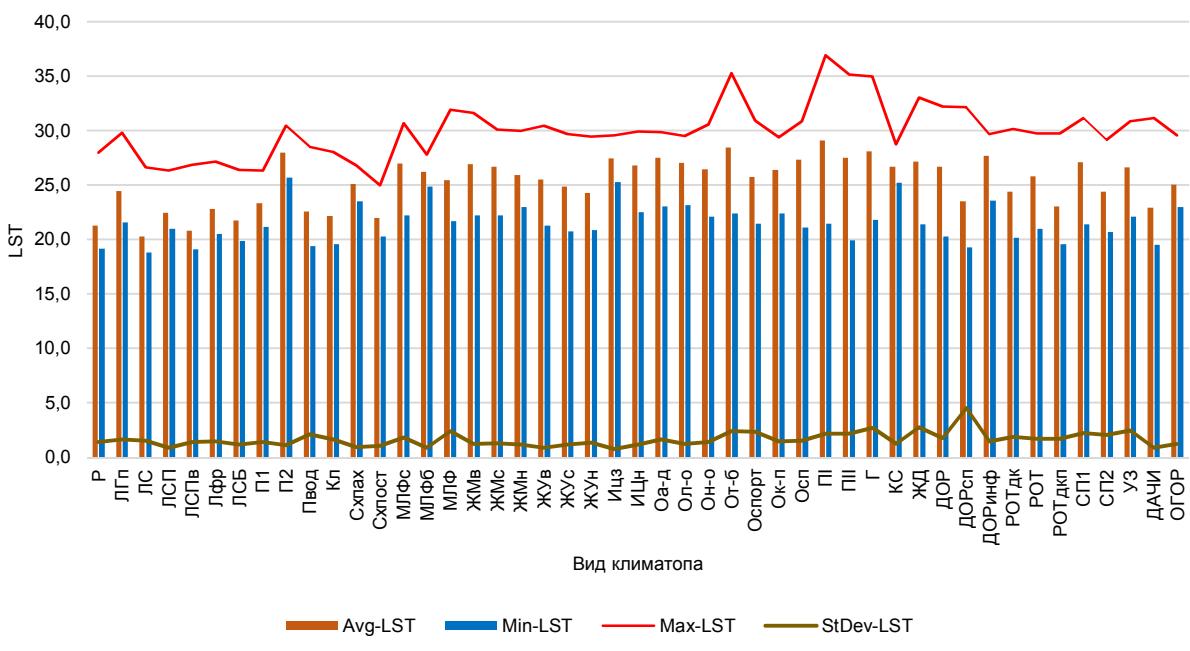


Рис. 8. Значения LST в видах климатопов г. Витебска

Fig 8. LST values in various climatopes of Vitebsk

Климатопы резервных озелененных территорий с древесно-кустарниковой растительностью (РОТдк), в том числе и в поймах рек (РОТдкп), характеризуются средними LST в пределах 23,0°...25,8°.

Для климатопов сельскохозяйственных паштотных угодий (СХпах) в г. Витебске LST_{avg} – 22° ...25°, что сравнимо с таковыми для лугопарков, а для садов (СХпост) – с усадебной застройкой.

В классе застроенных территорий наиболее высокие средние значения LST при существенном диапазоне их варьирования отмечаются в климатопах производственных низко озелененных территорий (П1) и коммунально-складских (Г – гаражи), общественной торгово-бытовой (От-б) (преимущественно гипермаркеты), административно-деловой застройки (Оа-д), в историческом центре города (ИЦз, ИЧн) (см. рис. 8).

В климатопах жилой многоквартирной и усадебной застройки средние значения LST (24,3°...26,9°) несколько ниже, чем в производственных, коммунально-складских и торгово-бытовых, а также историческом центре города. Отмечается их снижение при уменьшении плотности как многоквартирной, так и усадебной застройки. Наиболее низкими LST_{avg} в классе застроенных территорий характеризуются климатопы дачных массивов (23°).

Интересно отметить, что на участке расположения метеостанции в г. Витебске (вблизи усадебной застройки на восточной окраине города) среднее значение LST по данным ДЗЗ оценивается в 26,9° (при диапазоне варьирования от 25,4° до 30,5°), а согласно архиву погоды (<https://meteo.by/vitebsk/retro/2015-7-25>), дневная температура атмосферного воздуха днем на момент исследования здесь оценивалась в 23,0°...24,0°.

Заключение. Совместное использование ГИС с геопривязанными данными о местоположении, функциональных типах застройки и ландшафтно-рекреационных территориях в г. Витебске позволило выделить 17 типов и 47 видов климатопов и провести дифференцированную оценку показателей нормализованного вегетационного индекса (NDVI) и температуры подстилающей поверхности (LST) в разрезе различных видов городских климатопов, выявить особенности их распределения на городской территории. Это дало возможность (на основании данных об LST) ранжировать городские климатопы по эффективности выполнения средоформирующих (климаторегулирующих) функций. Среди городских климатопов г. Витебска максимально эффективно данные функции в летний период выполняют леса, реки, древесно-кустарниковая растительность в поймах, сады. Несколько ниже средообразующие функции городских парков г. Витебска (за исключением парка им. Советской Армии на окраине города на берегу Западной Двины), скверов и бульваров. В ряду климатопов застроенной части города показатели LST увеличиваются в порядке: дачная, жилая усадебная, жилая многоквартирная, общественная застройка и исторический центр, коммунально-складская и производственная застройка. В ряду видов климатопов застроенной части наиболее высокими средними значениями LST характеризуется дорожная

инфраструктура, гаражная, общественная торгово-бытовая (гипермаркеты) и производственная застройка.

Коэффициент парной линейной корреляции между температурой подстилающей поверхности (LST) и степенью озелененности, а также между LST и вегетационным индексом NDVI в различных видах климатопов г. Витебска оцениваются в -0,78 и -0,77 соответственно. Это подтверждает высокую роль растительности в формировании микроклимата городских территорий, особенно в летний период.

Список использованных источников

1. Экологический мониторинг лесных ландшафтов Белоруссии / Е. А. Сидорович [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1988. – 206 с.
2. Remote sensing of urban and suburban areas / eds. T. Rashed, C. Jürgens. – Springer Netherlands, 2010. – 352 p. – doi:<https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4385-7>
3. Город, архитектура, человек и климат / М. С. Мягков [и др.]. – М. : Архитектура-С, 2007 – 344 с.
4. Stewart, I. D. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies [Electronic resource] / I. D. Stewart, T. R. Oke. – 2012. – Mode of access: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>. – Date of access: 21.03.2019.
5. Национальны Атлас Беларусі // Камітэт па зямельных рэсурсах, геадэзіі і картаграфіі пры Савеце Міністраў Рэспублікі Беларусь. – Мінск, 2002. – 292 с.
6. Климат Витебска / под ред. И. А. Савиковского. – Л., 1981. – 143 с.
7. Кравчук, Л. А. Структурно-функциональная организация ландшафтно-рекреационного комплекса в городах Беларуси / Л. А. Кравчук. – Минск : Беларуская наука, 2011. – 171 с.
8. Структура природно-растительных комплексов в городах Беларуси / Л. А. Кравчук [и др.] // Природопользование. – 2012. – № 21. – С. 145–154.
9. Оценка средоформирующих функций природно-экологического каркаса городской территории (на примере г. Минска) / Л. А. Кравчук [и др.] // Природопользование. – 2020. – № 1. – С. 76–85.

References

1. Sidorovich E. A., Alekhno A. I., Bus'ko E. G., et al. *Ekologicheskiy monitoring lesnyh landshaftov Belorussii* [Ecological monitoring of forest landscapes of Belarus]. Minsk, 1988, 206 p. (in Russian)
2. Remote sensing of urban and suburban areas. Eds. T. Rashed, C. Jürgens, Springer, Dordrecht, 2010, 352 p. doi:<https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4385-7>
3. Myagkov M. S., Gubernskij Y. D., Konova L. I., Lichevich V. K. *Gorod, arhitektura, chelovek i klimat* [City, architecture, people and climate]. Moscow, 2007, 344 p. (in Russian)
4. Stewart I. D., Oke T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. 2012. Available at: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1> (accessed 21 March 2019).
5. *Nacyyanal'ny Atlas Belarusi* [National Atlas of Belarus]. *Kamitet pa zyamel'nyh resursah, geadezii i kartografii pry Savece Minictrau Respubliky Belarus'* [Committee on Land Resources, Geodesy and Cartography under the Council of Ministers of the Republic of Belarus]. Minsk, 2002, 292 p. (in Belarusian)
6. *Klimat Vitebska* [Climate of Vitebsk, ed. by I. A. Savikovskogo]. Leningrad, 1981, 344 p. (in Russian)
7. Kravchuk L. A. *Strukturno-funkcional'naya organizaciya landshaftno-rekreacionnogo kompleksa v gorodah Belarusi* [Structural-functional organization of landscape-recreational complex is in the cities of Belarus]. Minsk, 2011, 171 p. (in Russian)
8. Kravchuk L. A., Sudnik A. V., Bykova N.K., Pats A. Ch. *Struktura prirodno-rastitel'nyh kompleksov v gorodah Belarusi* [The structure of natural plant complexes in the cities of Belarus]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2012, no. 21, pp. 145–154. (in Russian)
9. Kravchuk L. A., Yanovskiy A. A., Bazhenova N. M., Sanets E. V. *Ocenka sredoformiruyushchih funkciy prirodno-ekologicheskogo karkasa gorodskoj territorii (na primere g. Minska)* [Evaluation of environment-forming function of natural-ecological framework of a city (by the example of Minsk)]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2020, no. 1, pp. 76–85. (in Russian)

Информация об авторах

Кравчук Людмила Александровна – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: kravchu-k@yandex.by

Баженова Наталья Михайловна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: nata.bazh@mail.ru

Гайшун Алексей Николаевич – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: gaishun_99@mail.ru

Information about the authors

Lyudmila A. Kravchuk – Ph. D. (Geography), Leader Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: kravchu-k@yandex.by

Natalia M. Bazhenova – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: nata.bazh@mail.ru

Aleksey N. Gaishun – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: gaishun_99@mail.ru

ГЕОЛОГИЯ. ПОЛЕЗНЫЕ ИСКОПАЕМЫЕ
GEOLOGY. MINERALS

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2021-1-138-147>

УДК 551.4.07 (476.2.7)

Поступила в редакцию 31.03.2021

Received 31.03.2021

**ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
БЕЛОРУССКОГО ПОЛЕСЬЯ
В МУРАВИНСКОЕ МЕЖЛЕДНИКОВЬЕ**

А. В. Матвеев

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. На основании анализа разрезов около 850 буровых скважин и опубликованных данных по геологии региона построена палеогеоморфологическая схема территории Белорусского Полесья в муравинское межледникование. Показано, что земная поверхность того времени была более расчлененной, чем ныне, колебание абсолютных высот достигало 150 м (в настоящее время – 120 м). В рельефе четко проявлялась субширотная зональность, выраженная в чередовании полос повышенного и пониженного рельефа.

Среди генетических типов преобладали те же, что и в современном рельефе. Однако существовали и определенные отличия: в межледникование большие площади занимали ледниковые образования, имели распространение почти не встречающиеся сейчас останцы денудационных низин, сложенные меловыми, палеоген-неогеновыми породами, и озерно-ледниковые поверхности. Построенная палеогеоморфологическая схема может быть использована при изучении направленности развития природных процессов в позднеплейстоценовое и голоценовое время.

Ключевые слова: земная поверхность; муравинское межледникование; генетические типы рельефа; палеогеоморфологическая схема.

Для цитирования. Матвеев А. В. Особенности строения земной поверхности Белорусского Полесья в муравинское межледникование // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 138–147.

**FEATURES OF THE EARTH'S SURFACE STRUCTURE
OF THE BELARUSIAN POLESIE AREA
IN THE MURAVIAN INTERGLACIAL**

A. V. Matveyev

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. Based on the analysis of about 850 borehole sections and published data on the geology of the region, a paleogeomorphological scheme of the Belarusian Polesie Area in the Muravian interglacial was made. It shows that the earth's surface at that time was more dissected than now, elevation marks reached 150 m (at the present time – 120 m). Sublatitudinal zoning was clearly manifested in the relief and expressed in the alternation of bands of high and low relief.

The same genetic types as in the modern relief prevailed. However, there were certain differences: in the interglacial period large areas were occupied by glacial formations, the outliers of denudation lowlands, which are composed of Cretaceous, Paleogene-Neogene rocks and almost absent now, were presented, glaciolacustrine surfaces were widespread. The constructed paleogeomorphological scheme can be used for study of the direction of natural processes development in the Late Pleistocene and Holocene.

Keywords: earth's surface; Muravian interglacial; genetic types of relief; paleogeomorphological scheme.

For citation. Matveyev A. V. Features of the earth's surface structure of the Belarusian Polesie Area in the Muravian interglacial. *Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 138–147.

Введение. При проводимых в Беларуси палеогеографических (палеогеоморфологических) реконструкциях для различных этапов четвертичного периода [1–4] рельеф муравинского межледниковоья чаще всего признается близким к современному, так как на большей части региона земная поверхность построена ледниками отложениями среднего плейстоцена. Верхнеплейстоценовые и голоценовые образования, которые могут перекрывать ледниковые комплексы и муравинские межледниковые осадки, относительно широко встречаются только на севере Беларуси и в Белорусском Полесье. Однако и для этих территорий до недавнего времени палеогеоморфологические реконструкции выполнялись в весьма схематичной форме.

И только начиная с 2015 г., когда по территории Белорусского Полесья стали проводить работы по изучению эволюции ландшафтов в муравинское и голоценовое время, были построены относительно детальные схемы палеорельефа по отдельным частям этого региона.

Однако проведенные исследования выполнялись по несколько различающимся методикам, имели отличия в легендах построенных схем, контуры выделенных таксонов на смежных площадях не были увязаны между собой [5, 6]. Поэтому для получения единой картины палеорельефа одного из этапов геологического развития такого уникального региона, как Белорусское Полесье, пришлось по сути дела построить новую схему строения земной поверхности.

Фактический материал и методика. При выполнении исследований использованы результаты завершенных ранее работ, разрезы почти 850 скважин (рис. 1), пробуренных в разные годы организациями РУП «НПЦ по геологии», геоморфологические карты, учитывались также материалы многочисленных публикаций, посвященных изучению особенностей геологического строения территории южной Беларуси, стратиграфии и палеогеографии четвертичного периода, истории формирования рельефа [1, 7–11].

Абсолютные отметки земной поверхности муравинского межледниковоья и образующие ее генетические типы устанавливались по следующим критериям:

- при наличии изученных спорово-пыльцевым методом отложений (известные разрезы Борхов, Великое Село, Дорошевичи, Замошье, Кремно, Лоев, Светлогорск, Хорево, Хорошево и ряд других – всего около 40 разрезов) по кровле и составу этих отложений;

- по кровле ледниковых комплексов припятского оледенения, слагающих современную земную поверхность, с учетом установленных ранее возможных параметров ее денудации в послеприпятское время [12];

- по кровле и составу неизученных палеоботаническими методами, но типичных межледниковых отложений (торф, сапропели, слои с органическими остатками, раковинами моллюсков и др.) с учетом условий их залегания;

- по подошве изученных палеоботаническими методами озерно-аллювиальных и аллювиальных отложений, залегающих на ледниковых или дочетвертичных породах;

- при наличии нерасчлененных муравинских и поозерско-голоценовых озерно-аллювиальных и аллювиальных отложений условно по поверхности их нижней трети общей мощности.

Использование в качестве отметок земной поверхности муравинского межледниковоья высот современного залегания кровли этого горизонта с учетом возможных перестроек земной поверхности под влиянием новейших тектонических движений вызывает определенные вопросы. Однако, имея ввиду относительно короткий в геологическом отношении отрезок времени (около 100 тыс. лет) иunalследованный характер развития по крайней мере ряда типов рельефа – речных долин, краевых ледниковых образований, моренных и флювиогляциальных равнин, можно считать, что в общем виде эти отметки примерно отражают гипсометрические особенности земной поверхности муравинского этапа.

После нанесения на карту разрезов с абсолютными отметками кровли различных типов муравинских отложений, а также высот ледникового рельефа, образующих в настоящее время выходы на земную поверхность или залегающих под позднеозерскими и голоценовыми аккумуляциями, была построена палеогеоморфологическая схема (рис. 2). Ниже приводится описание реконструированной земной поверхности территории Белорусского Полесья в муравинское межледниковоье.

Особенности орографии региона. Исследованная территория в муравинское время представляла собой пониженную и заболоченную низменность с отдельными грядами и возвышенностями, а также заметно выраженным подъемом земной поверхности в направлении к северной и южной границам региона. Преобладающие абсолютные высоты варьировали в центральной части в интервале 120–150 м, в долинах рек были ниже на 10–20 м, а в низовьях р. Припяти¹ и в долине р. Днепр достигали 90–100 м. К северу и югу отметки земной поверхности на равнинных участках возрастили

¹ Для того чтобы конкретизировать положение отдельных геоморфологических объектов, в статье использованы названия существующих в настоящее время населенных пунктов и других географических объектов.

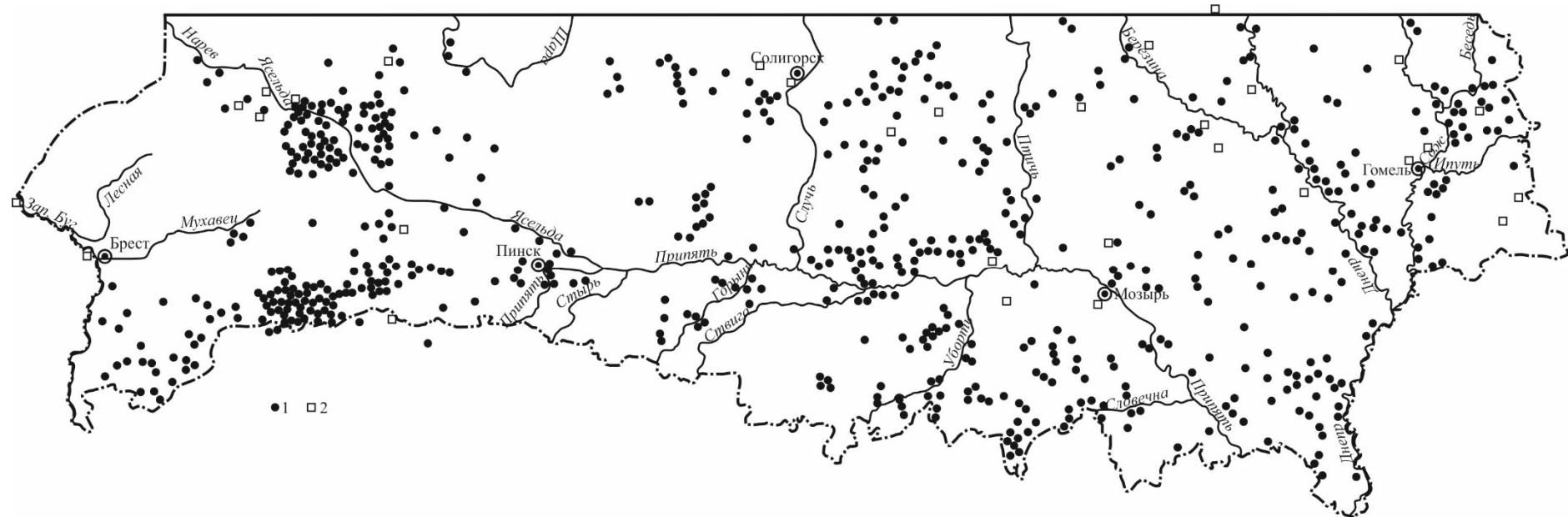


Рис. 1. Схема расположения скважин, разрезы которых использованы для изучения особенностей строения и состава муравинских и верхнепоозерских отложений (1), разрезы муравинских отложений (2), охарактеризованные спорово-пыльцевыми данными

Fig. 1. The layout of the boreholes, which sections were used for study the structural features and composition of the Muravian and Upper Poozerian deposits (1), the sections of the Muravian deposits (2), characterized by spore-pollen data

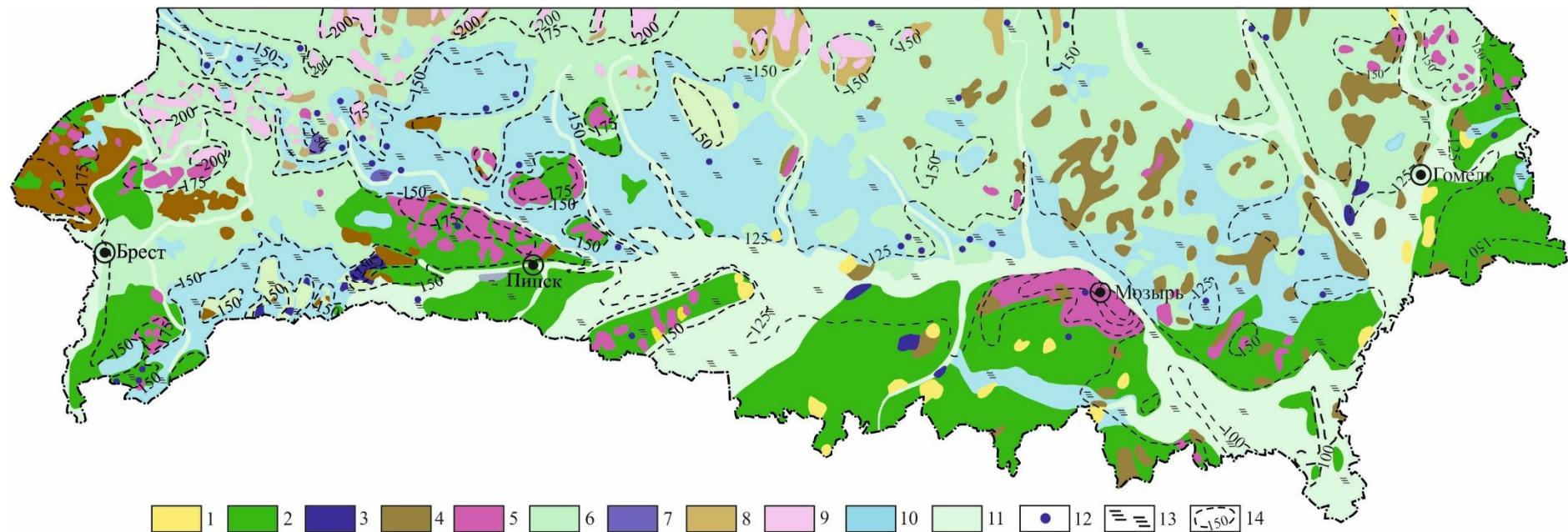


Рис. 2. Палеогеоморфологическая схема территории Белорусского Полесья (муравинское межледниковые).
Условные обозначения: 1 – останцы плоских дочетвертичных денудационных низин (равнин); 2 – пологоволнистая флювиогляциальная низина (равнина) днепровского возраста; 3 – плоская озерно-ледниковая низина днепровского возраста; 4 – пологоволнистая, местами мелкохолмистая и мелкоувалистая моренная равнина днепровского возраста; 5 – грядово-холмисто-увалистые краевые ледниковые образования днепровского возраста; 6 – пологоволнистая, плоская, местами мелкохолмистая флювиогляциальная низина (равнина) сожского (сожско-днепровского) возраста; 7 – плоская озерно-ледниковая низина сожского возраста; 8 – пологоволнистая, местами мелкохолмистая моренная равнина сожского возраста; 9 – грядово-холмистые краевые ледниковые образования сожского возраста; 10 – плоская, местами пологоволнистая озерно-аллювиальная низина муравинского возраста; 11 – речные долины (аллювиальные низины в бассейнах крупных рек); 12 – озерные котловины; 13 – заболоченность территории; 14 – изогипсы

Fig. 2. Paleogeomorphological scheme of the Belarusian Polesye Area (Muravian interglacial).

Legend: 1 – outliers of flat pre-Quaternary denudation lowlands (plains); 2 – gently undulating fluvio-glacial lowland (plain) of the Dnieper age; 3 – flat glaciolacustrine lowland of the Dnieper age; 4 – gently undulating, sometimes hummocky moraine plain of the Dnieper age; 5 – ridged and undulating hilly glacial formations of the Dnieper age; 6 – gently undulating, flat, sometimes hummocky fluvio-glacial lowland (plain) of the Sozh (Sozh-Dnieper) age; 7 – flat glaciolacustrine lowland of the Sozh age; 8 – gently undulating, sometimes hummocky plains of the Sozh age; 9 – ridged and undulating hilly marginal glacial formations of the Sozh age, 10 – flat, sometimes gently undulating lacustrine-alluvial lowland of Muravian age; 11 – river valleys (alluvial lowlands in the basins of large rivers); 12 – lake basins; 13 – waterlogging; 14 – isohyps

до 145–170 м. Максимальные же абсолютные высоты были приурочены к участкам распространения грядово-холмистого рельефа и достигали в северной части 170–220 м, в районе Мозырской возвышенности – до 230–240 м. При этом следует особо подчеркнуть, что формы этого типа рельефа превышали современные значения не менее чем на 10–20 м, так как по выполненным ранее расчетам установлено, что после отступания ледниковых покровов сформировавшиеся в их краевой части формы были заметно понижены за счет проявления делявиальных процессов.

Следовательно, общее колебание высот составляло примерно 150 м, а наибольшие их перепады на локальных площадях тяготели к долинам рек, достигая в районе Мозырской возвышенности 135 м, на участках холмисто-грядового рельефа в северной, северо-восточной частях региона в долинах рр. Птичи, Березины, Ипути – до 30–40 м.

Для сравнения отметим, что амплитуда высот современной земной поверхности составляет 100–103 – 170–221 м, т. е. межледниковая поверхность в целом была более расчлененной. Это выражалось не только в величинах максимальных и минимальных абсолютных отметок, но и во времени рек в коренные берега, в высотах краевого ледникового рельефа, превышавшие современные на 10–20 м.

В распределении высот земной поверхности заметно проявлялась субширотная зональность. Всего выделено восемь полос относительных поднятий и понижений, причем эти полосы не всегда непрерывно прослеживались от западных до восточных границ региона. В самой северной части территории примерно в направлении д. Новый Двор Свислочского района – г. п. Ружаны Пружанского района – у д. Бытень Ивацевичского района, д. Куршевичи Ганцевичского района – севернее г. Солигорска – г. Глуск – д. Добрынь Чечерского района – д. Коновалово Ветковского района четко выражена полоса повышенного холмисто-грядового рельефа с отметками до 220 м в западной части и до 170–190 м – в восточной, а также полого-волнистых, местами мелкохолмистых ледниковых равнин с преобладающими абсолютными высотами до 170 м, которые постепенно понижались в дистальном направлении до 140–150 м.

Эта полоса поднятий к югу сменяется понижением земной поверхности, которое вытянуто примерно от долины р. Нарев в направлении севернее оз. Черное – южнее оз. Выгонощанско – севернее г. Ганцевичи – юго-западнее г. Солигорска – южнее г. Любани – северо-восточнее г. п. Октябрьский Светлогорского района – низовья р. Березины – совместная долина рр. Днепр и Сож – долина р. Ипути. В понижении преобладали абсолютные отметки ниже 140–150 м, в долинах рек до 120–130 м. Наиболее распространенными категориями рельефа являлись низины разного генезиса и долины рек, на отдельных участках встречались фрагменты равнин с отметками до 150–155 м, в крайней восточной части – останцы денудационных низин (высоты 120–140 м), сложенных палеоген-неогеновыми породами.

Далее к югу отмечался новый подъем земной поверхности по линии севернее г. Пружаны – г. Береза – южнее г. Ивацевичи – д. Хотынич Ганцевичского района – д. Большой Рожан Солигорского района – д. Милевичи Житковичского района – г. п. Копаткевичи Петриковского района – г. Василиевичи Калинковичского района – г. п. Тереховка Добрушского района. Абсолютные отметки земной поверхности изменились в зоне грядово-холмистых образований, распространенных преимущественно в западной части, от 170–180 до 200–210 м, на площадях ледниковых равнин – от 150 до 180 м в западной части региона и в интервале 135–165 м на востоке.

Еще южнее выделялось четко выраженное понижение в направлении долина р. Белая – место слияния рр. Левая и Правая Лесная – оз. Споровское – долина р. Ясельды – долина р. Припяти (до г. Мозыря) – севернее г. Хойники – г. Лоев. Основными категориями в этой полосе были низины и речные долины. Абсолютные отметки земной поверхности варьировали от 135–165 м в западной части до 120–130 м и ниже на востоке. В этой зоне понижений встречались фрагменты ледниковых равнин и низин, которые на 5–10 м превышали высоты наиболее распространенных низин, участки грядово-холмистого рельефа с абсолютными отметками до 160–175 м.

К югу местность в очередной раз повышалась, однако это поднятие прослеживалось только в западной части Полесья по линии г. Каменец – севернее г. Кобрин – д. Мотоль Ивановского района – севернее г. Пинска. Здесь были распространены холмисто-грядовые образования, абсолютные высоты которых достигали 175–200 м, а преобладали ледниковые равнины с отметками поверхности 150–175 м, небольшими фрагментами на высотах 150–160 м были представлены равнины, сложенные собственно муравинскими отложениями.

Южнее располагалась новая полоса понижений земной поверхности, также хорошо выраженная в западной части региона по линии оз. Ореховское – оз. Луково – д. Хабовичи Кобринского района – долина р. Пины. На этой территории преобладали поверхности с отметками 130–150 м, встречались также участки равнин с высотами до 155 м.

В крайней южной части региона прерывистой полосой от д. Дивин Кобринского района на д. Радостово Дрогичинского района – д. Мохро Ивановского района – д. Остров Пинского района – д. Лядец Столинского района выделена полоса приподнятого рельефа с отметками 150–155 м. Вдоль левобережья р. Горыни на высотах 150–160 м встречались также фрагменты невысокого грядово-холмистого рельефа и останцы денудационной равнины, сложенной палеоген-неогеновыми породами.

В восточной части Белорусского Полесья можно выделить еще одну полосу возвышенного рельефа, которая располагается южнее долины р. Припяти и прослеживается по линии дд. Дзержинск и Симоновичи Лельчицкого района – г. Мозырь – г. Хойники – южнее г. Лоева. Особенно четкой эта полоса поднятий была между гг. Мозырем и Хойниками, где представлены грандиозные гряды и холмы высотой более 170 м, а в районе г. Мозыря – до 220–240 м. К западу, югу и востоку от грядово-холмистого рельефа поверхность выполаживалась и снижалась до 140–155 м. Здесь преобладали ледниковые равнины (низины) и небольшими участками встречались поверхности муравинских и палеоген-неогеновых отложений.

Южнее по линии г. Лельчицы – д. Валавск Ельского района – низовые р. Словечны – совместная долина рр. Припяти и Днепра местность понижалась до 120–130 м и ниже, а вдоль палеорусел рек Припяти и Днепра – даже ниже 100 м. Самыми распространенными категориями рельефа являлись низины, сложенные муравинскими отложениями.

И наконец, вдоль южной границы современной Беларуси по направлению от дд. Будки-Каменские и Руднище Лельчицкого района на дд. Рудня Ельского района и Александрово Наровлянского района земная поверхность несколько поднималась (до 150 м). Основными типами рельефа здесь были фрагменты ледниковых равнин и низин, останцы поверхностей дочетвертичных пород.

Характеризуя общие особенности орографии Белорусского Полесья, необходимо отметить, что помимо субширотной зональности в пределах региона достаточно четко проявлялась и ярусность. При этом верхний ярус рельефа формировали грядово-холмистые образования, которые почти всегда достигали 150–200 м и более. Ниже этого рельефа и примерно на одном уровне располагались поверхности ледниковых равнин (низин), которые в западной части региона на контакте с формами грядово-холмистого рельефа в основном имели отметки от 150 до 180 м, а в восточной – от 130 до 160 м, изредка понижались до 110–120 м. Еще ниже основные площади занимали низины, сложенные муравинскими отложениями с высотами 140–150 м в западной части и 100–130 м – в восточной. Самый низкий ярус земной поверхности был приурочен к тальвегам водотоков и урезам воды в озерах. К сожалению, подробных данных об этих формах (типах) рельефа очень мало. Можно только по отдельным разрезам предполагать, что реки и озерные котловины были врезаны в земную поверхность в основном не более чем на 10–20 м, при пересечении холмисто-грядового рельефа – до 30–40, и в районе Мозырской возвышенности – до 135 м.

Основные генетические типы рельефа. В соответствии с общими особенностями развития территории Беларуси в четвертичном периоде и по результатам анализа разрезов буровых скважин в пределах изученного региона в муравинское время установлено распространение следующих основных типов рельефа (аккумулятивные, эрозионно-аккумулятивные и денудационные поверхности):

- останцы плоских дочетвертичных денудационных низин (равнин);
- пологоволнистая флювиогляциальная низина (равнина) днепровского возраста;
- плоская озерно-ледниковая низина днепровского возраста;
- пологоволнистая, местами мелкохолмистая и мелкоувалистая моренная равнина днепровского возраста;
- грядово-холмисто-увалистые краевые ледниковые образования днепровского возраста;
- пологоволнистая, плоская, местами мелкохолмистая флювиогляциальная низина (равнина) сожского (сожско-днепровского) возраста;
- плоская озерно-ледниковая низина сожского возраста;
- пологоволнистая, местами мелкохолмистая моренная равнина сожского возраста;
- грядово-холмистые краевые ледниковые образования сожского возраста;
- плоская, местами пологоволнистая озерно-аллювиальная низина муравинского возраста;
- речные долины (аллювиальные низины в бассейнах крупных рек);
- озерные котловины;
- заболоченные поверхности.

При этом необходимо подчеркнуть, что особенности земной поверхности в муравинское время были образованы как унаследовано развивавшимися дочетвертичными поверхностями и ледниково-вымыми комплексами припятского оледенения, так и типами рельефа, которые формировались в межледниковые. К этим последним относятся озерно-аллювиальные низины, а также речные долины, котловины озерных водоемов. Интенсивно протекали процессы заболачивания. Распространение пе-

речисленных типов рельефа показано на рис. 2, а ниже приведена краткая характеристика показанных на схеме таксонов.

Останцы плоских дочетвертичных денудационных низин (равнин) выделены в южной и восточной частях исследованного региона. Нередко они тяготели к склонам речных долин и озерно-аллювиальных низин, залегая на абсолютных высотах от 120 до 155 м. Участки рассматриваемого рельефа редко простирались более чем на 20–30 км. Колебание относительных высот не превышало 1,0–1,5 м. С поверхности на этих низинах были распространены палеоген-неогеновые глины и пески, севернее г. Чечерска – мела мелового возраста, в районе д. Глушковичи Лельчицкого района – породы кристаллического фундамента. На наиболее пониженных участках развивались процессы заболачивания.

Пологоволнистая флювиогляциальная низина (равнина) днепровского возраста выделена примерно южнее линии г. Каменец – д. Мотоль Ивановского района – д. Хотынич Ганцевичского района – д. Лядец Столинского района – долина р. Припяти (до г. Мозыря) – г. Хойники – г. Лоев – г. Гомель – д. Перелевка Ветковского района. Однако необходимо отметить, что в восточной части региона эта граница не совсем точно показывает распространение днепровских флювиогляциальных поверхностей, так как севернее указанной границы также встречались формы рельефа этого возраста, но они образовали относительно небольшие поднятия среди равнины (низины) сожского возраста, оконтурить которые по имеющимся данным бурения довольно затруднительно. Поэтому на палеогеоморфологической схеме здесь выделены нерасчлененные сожско-днепровские поверхности, которые с учетом преобладания среди них сожских флювиогляциальных отложений показаны цветом этого генетического типа.

Поверхность флювиогляциальной равнины (низины) имела главным образом пологоволнистый, на границе с грядово-холмистым рельефом – мелкохолмистый и мелкоувалистый облик. Абсолютные отметки варьировали в интервале 120–160 м (изредка до 180 м), а останцы в пределах долины р. Припяти иногда понижались до 110 м. На значительных участках, особенно ниже 140 м, эта поверхность была заболочена.

В целом площадь флювиогляциальных поверхностей днепровского возраста в муравинское межледниковые была большей, чем в настоящее время, так как их значительные участки (к югу от г. Пинска, в междуречье Припяти и Стыри, к западу от г. Давид-Городка и в широкой полосе, проходящей через дд. Дзержинск и Тонеж Лельчицкого района, г. Петриков) были частично размыты и перекрыты озерно-аллювиальными и аллювиальными отложениями.

Плоская озерно-ледниковая низина днепровского возраста выявлена на небольших участках, прослеживающихся на 5–10 км запад-юго-западнее г. Пинска, западнее и юго-восточнее пгт. Лельчицы, южнее г. Житковичи. Их поверхность с колебаниями относительных высот до 1 м была заболочена и тяготела к абсолютным отметкам 120–130 м. В современном рельефе подобный генетический тип рельефа не встречается.

Пологоволнистая, местами мелкохолмистая и мелкоувалистая моренная равнина днепровского возраста имела довольно широкое распространение в крайней западной части региона – западнее г. Каменца, восточнее равнина этого типа встречалась также достаточно часто, но относительно небольшими по площади фрагментами – севернее г. Кобрин, в районе г. Дрогичина, в междуречье Птичи и Березины, Березины и Припяти, Березины и Сожа. Абсолютные отметки моренной поверхности в западной части составляли 145–180 м, на востоке – 135–170, в районе Мозыря – до 180 м; преобладал пологоволнистый рельеф с колебаниями относительных высот не более 2–3 м. На участках вблизи краевых ледниковых образований поверхность приобретала мелкохолмистый, иногда мелкоувалистый облик. Как правило, моренная равнина возвышалась на 5–10 м (иногда до 20 м) над поверхностью озерно-аллювиальных и аллювиальных низин и на 1–3 м – над флювиогляциальными равнинами (низинами). В целом площадь моренного рельефа в муравинское время была несколько большей, чем в настоящее время, особенно на территории северо-восточнее г. Малорита, северо-западнее г. Лельчицы, южнее г. Житковичи, восточнее г. Гомеля, юго-западнее г. Светлогорска. Перечисленные участки позднее были частично размыты и перекрыты аллювиальными и озерно-аллювиальными отложениями.

Грядово-холмисто-увалистые краевые ледниковые образования днепровского возраста в основном распространены в субширотной полосе, простирающейся от г. Каменца на Загородье и далее до гг. Мозыря и Хойники. Наиболее крупный участок краевого ледникового рельефа – Мозырская гряда – простиралась примерно с запада на восток почти на 65 км при ширине от 10 до 20 км. На остальной территории краевые образования встречались реже и на ограниченных площадях (у гг. Малорита, Столин, Хойники, г. п. Логишин, восточнее Чечерска и др.). Абсолютные отметки поверхности в крайней западной части достигали 190–200 м, в районе г. Мозыря – 240, на крайнем северо-востоке – 170–180, на остальной территории колебались в интервале 150–165 м. Повсеместно колебание отно-

сительных высот варьировало от 5–7 до 10–20 м, в районе Мозыря могло достигать до 30–40 м и более. Превышение над урезами воды составляло от 10–20 до 40 м и более.

С краевыми ледниковыми образованиями нередко связаны гляциодислокации, в которые вовлекались меловые и палеоген-неогеновые породы.

Пологоволнистая, плоская, местами мелкохолмистая флювиогляциальная низина (равнина) сожского (сожско-днепровского) возраста занимала значительные площади примерно севернее линии д. Великорита Малоритского района – оз. Луковское – г. п. Антополь Дрогичинского района – д. Мотоль Ивановского района – г. п. Логишин Пинского района – д. Люсино Ганцевичского района – низовье Лани – долина р. Припяти (до г. Мозыря) – севернее г. Хойники – г. Гомель – долина р. Беседи. При этом в западной части региона дистальная граница сожского флювиогляциального рельефа проводится довольно однозначно, то в восточной части это не всегда возможно сделать, как об этом было сказано выше.

Отметки земной поверхности варьировали от 135 до 150 м, иногда возрастали на границе с краевыми ледниковыми образованиями до 160–170 м и несколько выше и уменьшались ниже 130 м среди озерно-аллювиальных и аллювиальных низин. Поверхность преимущественно пологоволнистая, плоская, на границе с грядово-холмистым рельефом изредка мелкохолмистая, перепады относительных высот, как правило, не превышали 2 м, изредка достигали 3–5 м. На значительных площадях поверхность была заболочена.

Плоская озерно-ледниковая низина сожского возраста встречается отдельными небольшими по площади участками в бассейне верховий р. Ясельды, южнее и юго-западнее г. Дрогичин, восточнее г. Речицы (в левобережье р. Днепр). Поверхность низины плоская, заболоченная. Абсолютные высоты варьировали в основном от 135 до 150 м, хотя иногда снижались до 120 м или повышались до 154 м.

Пологоволнистая, местами мелкохолмистая моренная равнина сожского возраста встречалась на небольших площадях в северной части исследованной территории, в проксимальном направлении от предельной границы распространения сожского ледника, которая на характеризуемой территории прослеживается по линии аг. Каменюки – г. п. Шерешево – аг. Линово – аг. Кабаки – г. Береза – г. Ивацевичи – аг. Доманово – южнее г. Барановичи – д. Кривошин Ляховичского района – г. Ганцевичи и далее на восток. Абсолютные отметки поверхности моренной равнины варьировали от 150 до 180 м, на контакте с краевыми ледниковыми образованиями иногда достигали 190 м и более. Эта поверхность имела пологоволнистый, участками мелкохолмистый характер с колебаниями относительных высот от 1–2 до 5–6 м, с отдельными термокарстовыми понижениями глубиной до 1,5–2,0 м и диаметром до 150–200 м.

Грядово-холмистые краевые ледниковые образования сожского возраста распространены в крайней северной части исследованного региона, а наибольшие их площади сосредоточены в субширотной полосе от д. Ровбицк Пружанского района (вблизи границы с Польшей) на г. Пружаны – г. Береза – севернее г. Ивацевичи – г. Солигорск – г. Любаш. Абсолютные отметки колебались от 165–175 до 200–210 м и более. Преобладал грядово-холмистый рельеф с вариациями относительных высот от 7–9 до 10–18 м (изредка до 20–30 м), реже были распространены платообразные поверхности. Нередко встречались гляциодислокации, особенно между гг. Пружаны и Береза.

Плоская, местами пологоволнистая, озерно-аллювиальная низина муравинского возраста являлась одним из наиболее распространенных типов рельефа на исследованной территории, что скорее всего было предопределено особенностями процессов морфогенеза предшествующего припятского времени и развитием на значительных площадях нисходящих тектонических движений. Отметки плоских, реже пологоволнистых озерно-аллювиальных поверхностей варьировали в основном в западной части региона от 145–150 м на границе с окружающими типами ледникового рельефа до 130–140 м на основной площади распространения, в восточной – от 140 до 115–130 м. Колебание относительных высот не превышало 1–2 м.

Наибольшие контуры низин были сосредоточены в бассейнах рр. Западный Буг, Нарев, Ясельды, в левобережье р. Припяти, в междуречье Припяти и Днепра. Характерной особенностью наиболее крупных участков озерно-аллювиального рельефа являлось довольно частое распространение в его пределах островов флювиогляциальных и моренных низин, которые несколько повышали общую пересеченность рельефа, и колебание относительных высот возрастало до 3–10 м.

Общая площадь распространения озерно-аллювиального рельефа в муравинское межледниковые была заметно меньше, чем в голоценовое время. В частности, на месте современной озерно-аллювиальной низины между г. Ганцевичи – оз. Выгонощанско – д. Вулька Обровская Ивацевичского района в межледниковые существовала зандровая равнина. Этот участок вытянут в субширотном направлении примерно на 80 км, а его ширина изменялась от 5 до 20 км. Близкий по размерам фрагмент современной озерно-аллювиальной низины в правобережье рр. Пины и Припяти в муравинское

время был также занят зандровой низиной, простиравшейся с запада на восток на 70 км и с севера на юг – до 20 км. На остальной территории площади озерно-аллювиального рельефа в муравинское время хотя и были несколько меньше их современного распространения, но отличия не были столь значительными.

Речные долины (аллювиальные низины в бассейнах крупных рек). На территории Белорусского Полесья выявлена довольно густая сеть муравинских речных долин. Наиболее крупными палеоводотоками были рр. Припять, Днепр, Сож, Западный Буг, Ясьельда, Пина, Горынь и др. Реки протекали примерно в пределах их современных долин. Врез наиболье крупных водотоков не превышал 5–10 м в поверхность озерно-аллювиальной низины, 10–15 м – на площади наиболее приподнятых участков ледниковых равнин и низин, 30–40 м и более – в районах развития холмисто-грядового рельефа. Более мелкие реки, как правило, имели глубину долин от 3–5 до 7–10 м.

Ширина долины р. Припяти составляла от 8–10 до 25–30 км, совместной долины с рр. Стырю и Убортью – более 50, с р. Днепр – до 75 км. Совместная долина Днепра и Сожа – до 30 км. Долины других водотоков имели ширину от 1–2 до 3–10 км. Поверхность аллювиальных низин залегала чаще всего на абсолютных отметках ниже 120 м, в крайнем юго-восточном участке региона – ниже 100, а в северо-восточной части – до 130–140, в северной и западной частях – 150 м и более. Колебания относительных высот – преимущественно до 1–2 м, при наличии береговых валов – до 3–5 м. Аллювиальная низина была интенсивно заболочена. На отдельных участках среди аллювия выделялись останцы флювиогляциальных, моренных поверхностей, реже денудационных низин, сложенных до-четвертичными породами. При наличии таких останцов колебания относительных высот возрастили до 5–7 м.

В настоящее время аналогичные по генезису поверхности значительно превышают площадь муравинских поверхностей, что произошло за счет размыва и перекрытия флювиогляциальных и озерно-аллювиальных отложений в позднепоозерско-голоценовое время.

Озерные котловины. На изученной территории по данным буровых скважин выделено довольно много озерных котловин муравинского возраста. Чаще всего они тяготели к озерно-аллювиальным и флювиогляциальным низинам. Параметры существовавших водоемов точно установить затруднительно, так как озерные осадки, как правило, вскрыты единичными скважинами. Однако, учитывая, что озерные отложения содержали прослой тонких супесей, суглинков, глин, можно предположить, что их глубины могли достигать 10–20 м, а ширина превышать 3 км. В районе к западу–северо-западу и к северо-востоку от Петрикова выделены два участка распространения водоемов, отстоявших друг от друга на небольшие расстояния, а кровля озерных отложений имеет близкие абсолютные высоты: 128–130 и 118–121 м. Поэтому, возможно, на этой территории существовало два крупных водоема, имевших в попечнике до 15 км. Абсолютные отметки уреза воды в водоемах менялись в значительных пределах – от 118–120 до 130–145 м. иногда достигали 170 м и более (на площади распространения ледниковых равнин в северной части изученной территории).

Подводя итог приведенной характеристике выделенных на палеогеоморфологической схеме типов рельефа, следует особо подчеркнуть, что несмотря на несколько меньшую детальность контуров рельефа, по сравнению с современной геоморфологической картой, в целом построенная схема является вполне кондиционной основой для реконструкции общего облика земной поверхности, а с учетом результатов палинологических исследований может быть использована для восстановления ландшафтов муравинского межледникового.

Список использованных источников

- Геология Беларуси / под ред. А. С. Махнача [и др.]. – Минск, 2001. – 815 с.
- Матвеев, А. В. История формирования рельефа Белоруссии / А. В. Матвеев. – Минск, 1990. – 144 с.
- Палеогеография кайнозоя Беларуси / под ред. А. В. Матвеева. – Минск, 2002. – 164 с.
- Гречаник, Н. Ф. Рельеф территории Подлясско-Брестской впадины / Н. Ф. Гречаник, А. В. Матвеев, М. А. Богдасаров. – Брест, 2013. – 154 с.
- Матвеев, А. В. Палеогеоморфологическая схема территории западной части Белорусского Полесья (муравинское межледниково) / А. В. Матвеев, В. П. Зерницкая // Літасфера. – 2018. – № 1 (48). – С. 4–11.
- Матвеев, А. В. Рельеф земной поверхности восточной части Белорусского Полесья в муравинское межледниково / А. В. Матвеев // Природопользование. – 2020. – № 1. – С. 115–121.
- Горецкий, Г. И. Аллювиальная летопись великого Пра-Днепра / Г. И. Горецкий. – М., 1970. – 491 с.
- Рельеф Белорусского Полесья / А. В. Матвеев [и др.]. – Минск, 1982. – 131 с.
- Геоморфологическая карта Белорусской ССР. М 1 : 500 000 / гл. ред. Б. Н. Гурский. – М., 1990.
- Крутоус, Э. А. Палеогеография антропогена Белорусского Полесья / Э. А. Крутоус. – Минск, 1990. – 141 с.
- Геамарфалагічна карта. М 1 : 1 250 000 // Нацыянальны атлас Беларусі. – Мінск, 2002. С. 66–67.

12. Матвеев, А. В. Денудационный срез краевых возвышенностей Белоруссии / А. В. Матвеев // Морфогенез на территории Беларуси. – Минск, 1983. – С. 81–87.

References

1. *Geologiya Belarusi* [Geology of Belarus]. Ed. by A. S. Makhnach [et al.]. Minsk, 2001, 815 p. (in Russian)
2. Matveev A. V. *Istoriya formirovaniya rel'yefa Belorussii* [The history of the relief formation of Belarus]. Minsk, 1990, 144 p. (in Russian)
3. *Paleogeografiya kaynozooya Belarusi* [Paleogeography of the Cenozoic of Belarus]. Ed. by A. V. Matveyev. Minsk, 2002, 164 p. (in Russian)
4. Grechanik N. F., Matveev A. V., Bogdasarov M. A. *Rel'yef territorii Podlyassko-Brestskoy vpadiny* [The relief of the territory of the Podlaska-Brest depression]. Brest, 2013, 154 p. (in Russian)
5. Matveev A. V., Zernickaya V. P. *Paleogeomorfologicheskaya skhema territorii zapadnoy chasti Belorusskogo Poles'ya (muravinskoye mezhlednikov'ye)* [Paleogeomorphological scheme of the territory of the western part of the Belarusian Polesye (Muravian interglacial)]. *Litasfera = Lithosphere*, 2018, no. 1 (48), pp. 4–11. (in Russian)
6. Matveev A. V. *Rel'yef zemnoy poverkhnosti vostochnoy chasti Belorusskogo Poles'ya v muravinskoye mezhlednikov'ye* [The relief of the earth's surface in the eastern part of the Byelorussian Polesye Area during the Muravian interglacial]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2020, no. 1, pp. 115–121. (in Russian)
7. Goretskiy G. I. *Allyuvial'naya letopis' velikogo Pra-Dnepra* [Alluvial chronicle of the great Pra-Dnieper]. Moscow, 1970, 491 p. (in Russian)
8. Matveev A. V., Moiseenko V. F., Il'kevich G. I., Krutous E. A. *Rel'yef Belorusskogo Poles'ya* [Relief of the Belarusian Polesie]. Minsk, 1982, 131 p. (in Russian)
9. *Geomorfologicheskaya karta Belorusskoj SSR* [Geomorphological map of the Byelorussian SSR]. M 1 : 500 000 / Gl. red. B. N. Gurskiy. Moscow, 1990. (in Russian)
10. Krutous E. A. *Paleogeografiya antropogena Belorusskogo Poles'ya* [Paleogeography of the Anthropogen of the Belarusian Polesie]. Minsk, 1990, 141 p. (in Russian)
11. *Geamarfalagichnaya karta* [Geomorphological map]. M 1 : 1 250 000. *Natsyyanal'ny atlas Belarusi = National Atlas of Belarus*. Minsk, 2002, pp. 66–67 (in Belarusian)
12. Matveev A. V. *Denudacionnyj srez kraevyh vozvyshennostej Belorussii* [Denudation section of the marginal uplands of Belarus]. *Morfogenez na territorii Belarusi = Morphogenesis on the territory of Belarus*. Minsk, 1983, pp. 81–87. (in Russian)

Информация об авторе

Матвеев Алексей Васильевич – академик, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: matveyev@nature-nas.by

Information about the author

Aleksey V. Matveyev – Academician, D. Sc. (Geological and Mineralogical), Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: matveyev@nature-nas.by

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ПОИСКОВОГО МЕТОДА «ДИКАЯ КОШКА» В ИЗУЧЕНИИ УГЛЕВОДОРОДНОГО ПОТЕНЦИАЛА ПРИПЯТСКОГО ПРОГИБА

Я. Г. Грибик

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. Проанализированы результаты геологоразведочных работ на нефть в пределах Ельского, Шатилковского, Савичского и Петриковско-Шестовичского участков Припятского прогиба. Анализ охватывает почти 70-летний период от бурения первых поисковых скважин, заложенных по методу «дикой кошки» до современного комплексного обоснования. За анализируемый период пробурено от 12 до 23 глубоких скважин с общей проходкой от 42,3 тыс. м до 68,3 тыс. м на каждом участке. Начальный этап работы после первого притока нефти характеризуется более высокой активностью бурения новых поисковых скважин, обоснованных доступными на тот период методами. Отрицательный результат поискового бурения на отдельных участках обусловлен также существенной расчлененностью внутрисолевых перспективных горизонтов и площадной невыдержанностью пластов-коллекторов в подсолевом комплексе. В пределах участков установлены залежи с извлекаемыми запасами нефти не более 450 тыс. т, что можно определять в качестве невысокой экономической эффективности поисковых работ. Однако работы сыграли положительную роль по определению реальных моделей ловушек углеводородов для использования при изучении других участков.

Ключевые слова: нефть; скважина; верхняя соль; приток; запасы; метод «дикой кошки».

Для цитирования. Грибик Я. Г. Геологическая роль поискового метода «дикая кошка» в изучении углеводородного потенциала Припятского прогиба // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 148–168.

THE GEOLOGICAL ROLE OF THE SEARCH METHOD "WILD CAT WELLS" IN THE STUDY OF THE HYDROCARBON POTENTIAL OF THE PRIPYAT TROUGH

Ya. G. Gribik

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The results of geological exploration for oil within the Elsky, Shatilkovsky, Savichsky and Petrikovsko-Shestovichsky sections of the Pripyat trough are analyzed. The analysis covers almost 70 years from the drilling of the first exploratory wells laid by the "wild cat" method to the modern comprehensive justification. During the analyzed period, from 12 to 23 deep wells were drilled with a total penetration of 42.3 thousand meters to 68.3 thousand meters in each section. The initial stage of work after the first oil inflow is characterized by a higher activity of drilling new exploratory wells, justified by the methods available at that time. The negative result of exploratory drilling in certain areas is also due to the significant fragmentation of the intrasalt perspective horizons and the areal unevenness of reservoir layers in the subsalt complex. Within the boundaries of the sites, deposits with recoverable oil reserves of no more than 450 thousand tons are established, which can be determined as a low economic efficiency of prospecting operations. However, the work has played a positive role in determining real models of hydrocarbon traps for use in the study of other sites.

Keywords: oil; well; upper salt; influx; stocks; "wild cat" method.

For citation. Gribik Ya. G. The geological role of the search method "wild cat wells" in the study of the hydrocarbon potential of the Pripyat trough. *Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 148–168.

Введение. Поисковый этап по углеводородному направлению в большинстве мировых нефтегазовых бассейнов проходит по примерно одинаковой схеме. Начальный период, когда существуют только абристные контуры осадочного бассейна, в пределах которого можно выявить залежи углеводородов, выполняются региональные исследования, включающие сеть геофизических профилей

с бурением отдельных опорных либо параметрических скважин для оценки общей характеристики осадочного чехла бассейна и привязки к нему сейсмических отражающих горизонтов.

Следующим этапом, после выявления отдельных положительных критериев по оценке бассейна, является выход на отдельных участках для постановки поискового бурения. Процесс ускоренного выхода с поисковым бурением будет более активен при выявлении в первых параметрических либо опорных скважинах залежей нефти, либо прямых признаков углеводородов. На этой стадии в геологоразведочном процессе в некоторых нефтегазоносных регионах США использовался метод «wildcat wells» – метод «дикой кошки» (ДК) [1]. Он базировался в расчете на удачу с использованием некоторых доступных в этот период положительных факторов нефтеперспективности и с учетом интуиции. В отдельных бассейнах при неглубоком залегании перспективных горизонтов и, следовательно, при небольшой глубине поисковых скважин метод приносил определенный успех. Однако в последние годы, по мнению редакторов информации Леворсена (Н. Б. Вассоевич, М. И. Калинко), большинство скважин бурится в США и других регионах мира на основе анализа всех имеющихся геолого-геофизических данных. Такой метод в последующем стал сегодня историческим «анахронизмом», и применение его в XXI в. ничем не оправдано.

Однако во всех бассейнах исторические этапы геологического изучения и поисков нефти характеризуются периодом, когда был использован поисковый метод ДК. Его применение стимулировалось не только фактом более быстрой оценки выявленного нефтепроявления, но также определением структурно-геологических параметров залежи для последующего использования их в качестве поискового метода. Для Припятского прогиба со степенью разведенности ресурсной базы традиционного углеводородного сырья около 60 % отдельные скважины непрямого углеводородного направления могут приносить новые неожиданные результаты, как по бурению в 2020 г. на Петриковско-Шестовичском участке.

Объекты и методы исследования. С целью оценки степени влияния на поисково-разведочный этап на нефть в условиях Припятского прогиба метода ДК нами проанализированы результаты геологоразведочных работ за период с 1950 г. (т. е. от начального периода геологических исследований) по 2020 г. Учитывалось то, что каждый этап характеризовался своей интенсивностью геологоразведочного процесса, что, естественно, сказывалось на их результатах.

Для оценки результатов работ при использовании метода ДК в условиях Припятского прогиба нами выполнен анализ по четырем полигонам, на которых в разные годы выполнялось заложение скважин (далее – скв.) по методу ДК, либо оказавшихся попутно в этой категории. В эти объекты в хронологической последовательности включены Ельский, Шатилковский, Савичский и Петриковско-Шестовичский участки (рис. 1).

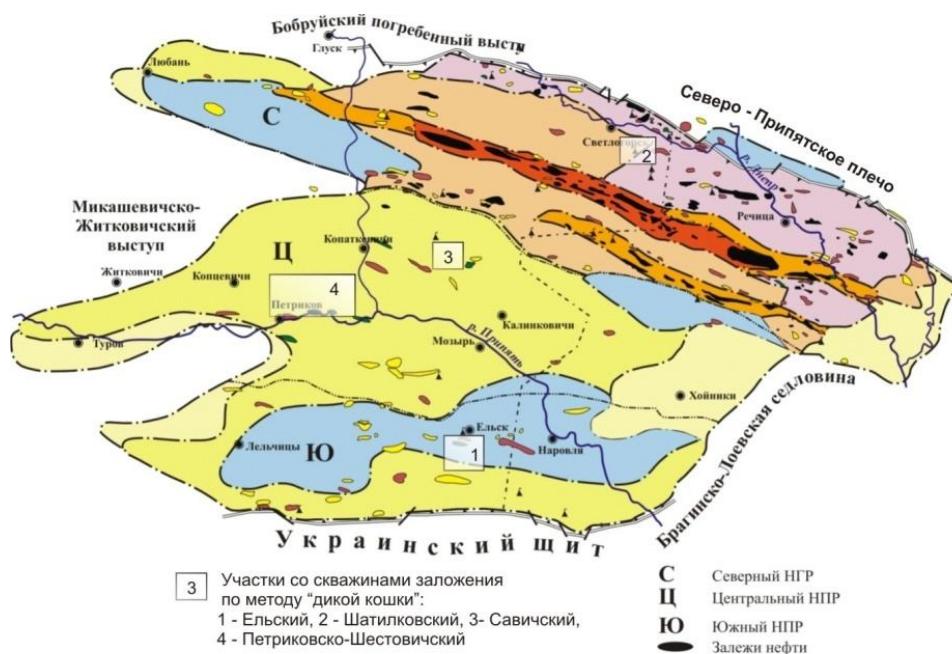


Рис. 1. Припятский прогиб. Участки со скважинами заложения по методу «дикой кошки»

Fig. 1. The Pripyat Trough. Areas with boreholes by "wild cat" method

В пределах Ельского участка в 1953 г. в скв. 2 из верхнесоленосного горизонта получен первый в Беларуси приток нефти, который в значительной мере стимулировал геологоразведочные работы. В последующем в параметрических скважинах, заложенных на региональных геофизических профилях на Шатилковской (1967 г.) и Савичской (1976 г.) площадях, получен приток нефти из отложений верхнесоленосного и подсолевого карбонатного комплексов соответственно. В 2020 г. в технологической скважине на Петриковской площади установлено нефтепроявление в верхнесоленосной толще.

В пределах Ельского участка на сегодня пробурены 23 поисковые и параметрические скважины с общей проходкой, составляющей 68 349 м (табл. 1). Не все скважины, приведенные в табл. 1, были спроектированы на внутрисолевой объект, вскрытый скв. 2 в 1953 г., однако большая часть из них решала эту задачу, особенно в первый период поисковых работ на участке. Часть скважин за-кладывалась с целью изучения и поисков залежей нефти в межсолевом и подсолевом комплексах. Однако реальный приток нефти из межсолевого комплекса получен только в 2010 г. в скважине Ново-Ельская 43.

На Шатилковском участке, в пределах которого в параметрической скв. 1 получен приток нефти из верхнесоленосного горизонта в 1967 г., к настоящему времени пробурено 16 скважин и выполнен общий объем проходки 60 377 м (табл. 1). В пределах этого участка поисковые скважины бурились также на межсолевой и подсолевой комплексы, в пределах которых залежей нефти не выявлено. Внутрисолевая залежь нефти подтверждена скважиной Шатилковская 15 в 2011 г., а также Южно-Шатилковской залежью, установленной скв. 16 в 2014 г.

В районе Савичского участка, в пределах которого в параметрической скв. 1 из подсолевого карбонатного комплекса получен приток нефти в 1976 г., пробурено 12 скважин с общей проходкой, составляющей 42 341 м. Все скважины, пробуренные на Савичском участке, выполняли роль поисковых, направленных на поиски залежей в горизонтах подсолевого карбонатного комплекса, выявленных скв. 1. Существенная разблокированность подсолевых отложений и площадная невыдержанность пластов-коллекторов оказывали отрицательную роль на эффективность поисковых работ. Ни одна из вновь пробуренных скважин не была продуктивной.

Петриковско-Шатилковский участок – это западный район Центральной части Припятского прогиба, примыкающий к Микашевичско-Житковичскому выступу (см. рис. 1). Поисковые и региональные работы в этом районе начаты в 1950-е годы. В анализ включены скважины, пробуренные в пределах Шестовичской (скв. 1, 2, 3, 4), Петриковской (скв. 5, 6), западной части Копаткевичской площади (скв. 4, 7, 8, 11), Северо-Шестовичской (скв. 1, 2) и Западно-Шестовичской (скв. 1, 2) площадей.

В 2020 г. на участке пробурена скважина Петриковская 1 технологическая, располагающаяся в пределах Северо-Шестовичской площади. Скважина пробурена до глубины 2 600 м до кристаллического фундамента для Петриковского ГОКа как технологическая, для утилизации рассолов в подсолевой терригенный комплекс. В процессе проводки скважины выявлено в верхнесоленосной толще три пласта, к которым приурочено нефтепроявление. Всего в пределах участка пробурено 42 670 м поискового бурения (табл. 1).

Результаты исследования по объектам. Ниже приведем геологические результаты, полученные по всем анализируемым участкам за весь период от заложения первых скважин в начальные этапы работ до настоящего времени.

Ельский участок

Ельское поднятие расположено в Ельском районе Гомельской области. Приурочено к однотипному соляному валу Припятского прогиба. Выявлено в 1950 г. комплексом методов (электроразведка, гравиразведка, сейсморазведка) геофизической экспедицией Управления геологии при Совете Министров БССР по поверхности верхнесоленосных елецко-лебедянских отложений. Выражено в виде антиклинали размером 7×2 км, амплитудой 400 м (по изогипсе –1200 м). Осложнено двумя слабо выраженными куполами, разделенными седловиной.

Поисковое бурение на Ельской площади было начато в 1952 г. бурением четырех профилей скважин, располагающихся вкрест простирации соляного вала. Один из профилей включал шесть скважин (скв. 1, 2, 3, 4, 5, 7), второй – три (скв. 12, 13, 14), и на двух профилях планировалось пробурить по две скважины (скв. 9, 10 и 15, 16).

Поисковая скв. Ельская 2 заложена с целью выяснения перспектив нефтеносности южного крыла Ельского валообразного поднятия. Скважина начата бурением Белорусской конторой разведочного бурения Министерства нефтяной промышленности СССР 28 мая 1953 г. с проектной глубиной 2 800 м, проектным горизонтом докембрий.

Таблица 1. Скважины, пробуренные в пределах Ельского, Петриковско-Шестовичского, Шатилковского, Савичского участков**Table 1. Wells drilled within the Yelsky, Petrikov-Shestovichsky, Shatilkovsky, Savichsky areas**

Ельский участок				Петриковско-Шестовичский участок				Шатилковский участок				Савичский участок							
Но- мер скв.	Кате- гория скв.	Год бурения	Фактические		Но- мер скв.	Кате- гория скв.	Год буре- ния	Фактические		Но- мер скв.	Катего- рия скв.	Год буре- ния	Фактические		Номер скв.	Катего- рия скв.	Год буре- ния	Фактические	
			глубина, м	горизонт				глубина, м	горизонт				глубина, м	горизонт				глуби- на, м	горизонт
1	ПР	1952	2894,4	D ₃ lb	1Ш	ПР	1957	3011	D ₂ st	1	ПР	1963	3477	D ₃ lb	1	ПР	1976	3603	D ₃ In
2	П	1953	2444	D ₃ lb	2Ш	ПР	1957	2892	AR + PR ₁	2	П	1968	4216	D ₃ sm	2	П	1976	3772	D ₂ nr
3	П	1953	2316	D ₃ lb	3Ш	П	1957	3200	D ₂ st	3	П	1969	3935	D ₃ ev	3	П	1977	3775	AR + PR ₁
4	П	1953	2301	D ₃ lb	4Ш	П	1962	3409	AR + PR ₁	4	П	1969	4211	D ₃ ev	4	П	1976	3815	D ₂ st
5	П	1954	3331	D ₃ lv	5П	ПР	1958	2249	D ₃ ev	5	П	1970	3751	D ₃ zd-el	5	Р	1978	3615	D ₃ In
6	П	1954	1730	D ₃ lb	6П	П	1958	2229	AR + PR ₁	6	П	1974	4115	D ₃ zd-el	6	П	1979	3629	D ₃ In
7	П	1954	2783	D ₃ lb	4К	П	1961	3309	AR + PR ₁	7	П	1969	4710	D ₃ In	7Юс	П	1983	3541	D ₂ st
8	П	1954	3000	D ₃ zd-el	7К	П	1970	3094	AR + PR ₁	8	П	1974	4037	D ₃ In	8	П	1980	3650	D ₂ st
9	П	1956	3109	D ₃ pl	8К	П	1970	2805	AR + PR ₁	9	П	1986	3862	D ₃ zd-el	9	П	1980	3327	D ₂ st
10	П	1955	3102	D ₃ zd-el	11К	П	1972	2966	D ₂ nr	10	П	1975	3902	D ₃ zd-el	10	Р	1984	3367	D ₃ In
11	П	1955	3000	D ₃ zd-el	1СШ	ПР	1971	2653	AR + PR ₁	11	П	1997	3522	D ₃ lv	11	П	1989	3632	D ₂ st
17	П	1958	3244	D ₃ pl	2СШ	П	1974	2401	AR + PR ₁	12	П	2009	3280	D ₃ lb	12 3-Сав	П	2000	2665	D ₃ lv
18	П	1959	2756	D ₃ zd-el	13-Ш	П	1999	2930	AR + PR ₁	13	П	2010	3309	D ₃ lb	—	—	—	—	—
19	ПР	1959	2748	D ₃ pl	23-Ш	П	2001	2922	AR + PR ₁	14	П	2010	3450	D ₃ lb	—	—	—	—	—
20	Р	1962	3600	D ₃ pl	1T	Т	2020	2600	AR + PR ₁	15	П	2011	3450	D ₃ lb	—	—	—	—	—
21	П	1966	4016	AR + PR ₁	—	—	—	—	—	16	П	2014	2150	D ₃ lb	—	—	—	—	—
22	П	1968	3766	AR + PR ₁	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
23	П	1967	2856	AR + PR ₁	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
24	П	1970	3190	D ₃ In	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
26	П	1974	2698	D ₃ lv	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
41	П	1999	2550	D ₃ lv	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
42	П	2010	4315	AR + PR ₁	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
43	П	2010	2600	D ₃ zd-el	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Проходка, м			68 349	—	—	—	—	42 670	—	—	—	—	60 377	—	—	—	—	42 341	—

П р и м е ч а н и е. Категории скважин: ПР – параметрическая, П – поисковая, Р – разведочная, Т – технологическая; для Петриковско-Шестовичского участка: Ш – Шестовичская, П – Петриковская, К – Копаткевичская, СШ – Северо-Шестовичская, З-Ш – Западно-Шестовичская площади.

В акте от 11 февраля 1953 г. приводится следующее обоснование на заложение скв. № 2:

«1. Скважина № 2, как разведочная, закладывается на Ельской площади, на южном крыле сейсмической структуры в соответствии с планом разведки на 1953 г., утвержденном управляющим трестом «Союзнефтегазразведка» тов. С. Г. Галустовым. Точка дается согласно телеграфных распоряжений № 165/246 от 02.09.1952 г. и № 165/3 от 02.02.1953 г.

2. Задачи и цели разведки, возлагаемые на скв. № 2-Р, заключаются в детальном изучении геологического строения Ельской структуры и выяснении перспектив ее нефтегазоносности».

Приведенная выше информация по обоснованию заложения скважины, а также то, что вынос в натуру проектного положения точки следует выполнить «...без инструментальной съемки с промером шагами» свидетельствует о том, что в тот период в Советском Союзе, также как и в других странах, при отсутствии достоверной геологической информации по объекту использовался вариант обоснования методом ДК.

После получения притока нефти в скв. 2 на Ельской площади в 1953 г. началось сосредоточенное поисковое бурение на этой структуре для выяснения размеров и прослеживания открытой в отложениях нижней части верхней соленосной толщи залежи нефти. С этой целью, а также для поисков нефти в залегающей ниже толще межсолевых отложений к середине 1963 г. было пробурено еще 19 глубоких скважин (59 410 м). Но ни в одной из них на этой структуре притоков нефти получено не было. Залежь, вскрытая скв. 2, оказалась ограниченных размеров и приуроченной к литологически невыдержанному по простирианию прослою песчаника в отложениях верхней соленосной толщи, в известной степени дислоцированному в процессе соляного тектогенеза (рис. 2). Последнее явилось причиной того, что пластовое давление в залежи было намного выше гидростатического, что потребовало принятия соответствующих мер предосторожности против выброса из скважин при их проводке. Получение нефти на Ельской площади способствовало «втягиванию» сил и средств на прослеживание уже открытой и поиски новых залежей нефти на рассматриваемой структуре. Это приобрело устойчивый характер, причем такие факторы, как возможные размеры залежи, объективная оценка целесообразности дальнейшего ее изучения глубоким бурением, ведение нефтепоисковых работ на нижележащие межсолевые и подсолевые комплексы пород оказались недостаточно учтенными. Одновременно преобладал и психологический фактор – получение первой нефти в Припятском прогибе [2].

Аналогичная ситуация сложилась на Наровлянской площади, расположенной в 22 км восточнее Ельской площади, на которой в скв. 1 из брекции кепрока над солью было получено более 10 кг мальты – тяжелой сернистой окисленной нефти, а в скв. 3, 6 встречена брекция кепрока с нефтепроявлениями. К 1960 г. здесь было пробурено 10 глубоких скважин (23 493 м), однако положительных результатов тоже получено не было [3].

О весьма низкой геологической изученности Ельской площади через 5 лет после получения притока нефти в скв. 2 свидетельствуют материалы к заложению скв. 17. Обоснование составлено в ноябре 1957 г., когда на площади уже были пробурены скв. 1, 2, 5–8, 10, 12–14. В Геологической службе господствовало представление о том, что залежь нефти, выявленная скв. 2, приурочена к межсолевому комплексу. С целью решения вопроса о нефтеносности межсолевых отложений Ельской площади обосновывается бурение скв. 17 следующим образом, выполненное геологом Белорусской КРБ В. Н. Михайловым: «Скважина № 17 располагается на южном крыле Ельского сейсмического поднятия в 250 м на запад, северо-запад от Ельской скважины 2/as284% по простирианию межсолевых отложений, определенного графически». Графическое обоснование к заложению скв. 17 представлено на рис. 2.

Из представленных текстовых и графических материалов к заложению скважины на Ельской площади к концу 1950-х годов можно констатировать, что большая часть из них закладывалась по методу ДК.

Скв. 17 пробурена до нижнесоленосного комплекса, до глубины 3600 м. При испытании верхнесоленосного горизонта, аналога продуктивного пласта скв. 2 из интервала 2462–2493 м получен приток пластовой воды минерализацией 339,5 г/л, дебитом до 2,5 м³/сут. Скважина оказалась пробуренной в районе водонефтяного контакта нефтяной залежи, вскрытой скв. 2.

По материалам последних детализационных сейсмических исследований способом общей глубинной точки (СОГТ) на Ново-Ельской и Даниловской площадях, выполненных в 2011–2012 гг. уточнено строение и подготовлена к бурению Старо-Ельская внутрисолевая (лебедянская) ловушка, в пределах которой скв. 2 установлена залежь нефти.

Залежь нефти, вскрытая скв. 2, характеризуется устойчивым фонтанным притоком нефти дебитом 15–18 м³/сут на штуцере диаметром 4 мм. С учетом геолого-промышленной информации по скв. 2 и современного геологического строения внутрисолевого продуктивного горизонта залежь нефти на Познякевичской площади следует оценивать по промышленной категории С₁ в количестве 51,4 тыс. т и предварительно оцененных извлекаемых запасов по категории С₂ в количестве 104,8 тыс. т [4]. В целом по месторождению запасы оцениваются в размере 156,2 тыс. т.

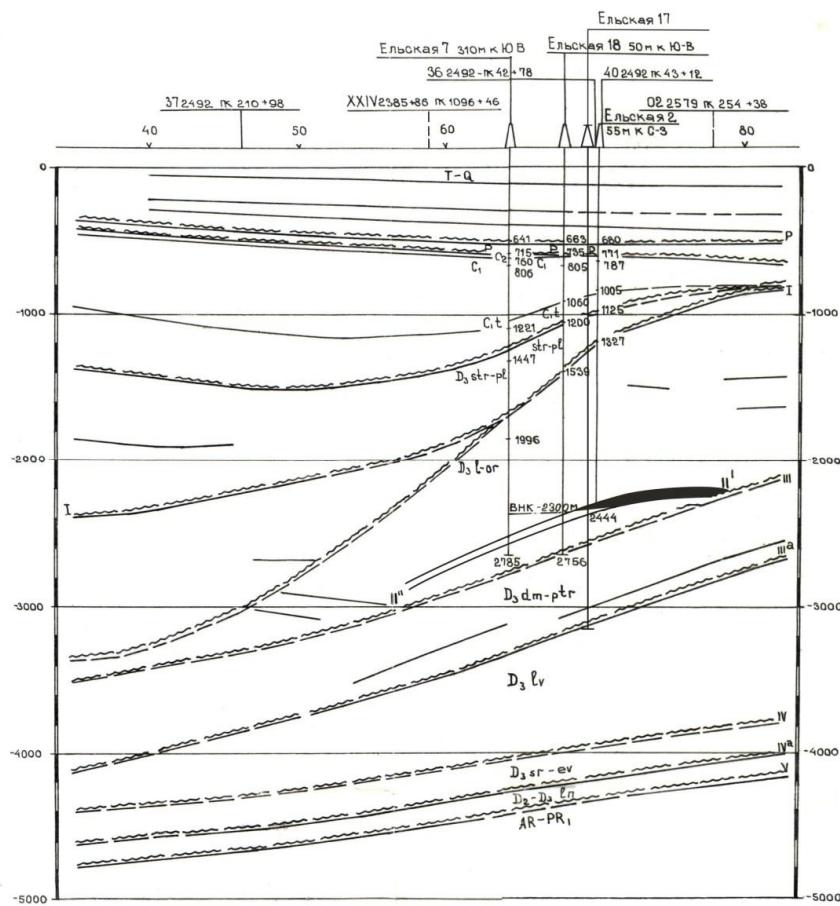
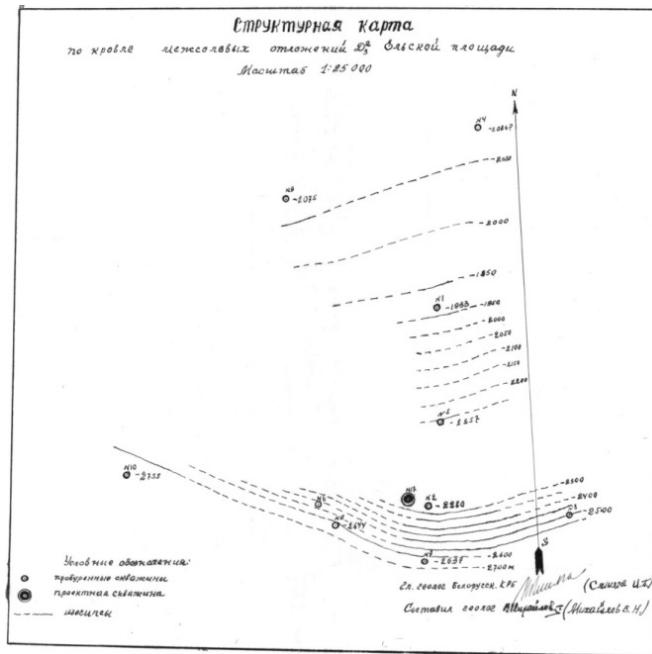


Рис. 2. Ельская площадь. Геологический профиль по линии скв. 7, 18, 17, 2

Fig. 2. Elskaya area. Geological profile along the line of wells 7, 18, 17, 2



Выявление залежи нефти в верхнесоленосном горизонте активизировало нефтепоисковый поиск и в межсолевом комплексе. Среди информативных критериев как признаки нефти в керне существенную роль сыграл такой надежный поисковый признак, как повышенная радиенасыщенность пластовых вод, подтвердившаяся на других месторождениях Припятского прогиба. По аномальному содержанию радия в пластовых водах в скважине Ельская 26 в интервале 2206–2222 м (содержание $n \cdot 10^{-9}$ г/дм³) прогнозировалась залежь нефти на расстоянии не более 100 м к северу от скв. 26 [5, 6].

Все это, несмотря на отрицательные результаты, полученные по ранее пробуренным скважинам на данной территории, стимулировало возобновление сейсморазведочных и буровых работ на Ново-Ельской площади в 2007–2011 гг.

В 2007 г. по результатам переинтерпретации имеющихся геолого-геофизических материалов ГПЦОИ № 12 Центральной геофизической экспедиции (ЦГЭ) РУП «Белгеология» представила новый вариант структурных построений по межсолевым и подсолевым отложениям в масштабе 1 : 25 000 и был составлен паспорт Ново-Ельской структуры, подготовленной к поисковому бурению на нефть и газ по подсолевым и межсолевым отложениям.

По результатам бурения скважин 42 и 43 Ново-Ельские установлена залежь нефти в межсолевом комплексе в дроздовских слоях елецкого горизонта в блоке скв. 26. По результатам испытания в эксплуатационной колонне скв. 43 объектов в дроздовских слоях в интервале 2301–2304 м и 2294–2297 м получен приток нефти дебитом 0,56–0,84 м³/сут соответственно. По результатам выполненных работ в 2019 г. подсчитаны запасы нефти.

Суммарные геологические и извлекаемые запасы и ресурсы нефти по двум объектам подсчета залежи дроздовского горизонта елецкого надгоризонта межсолевых отложений составили:

- категории С₁: геологические – 42 тыс. т, извлекаемые – 8 тыс. т;
- категории С₂: геологические – 604 тыс. т, извлекаемые – 121 тыс. т;
- категории Д₀: геологические – 1266 тыс. т, извлекаемые – 253 тыс. т (рис. 4).

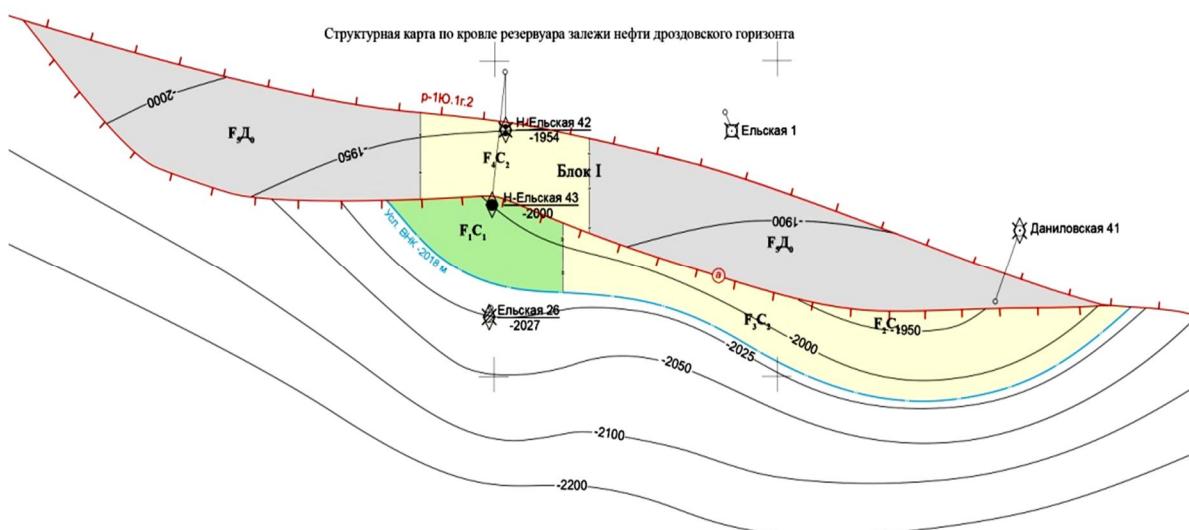


Рис. 4. Ново-Ельское месторождение. Структурная карта и подсчет запасов нефти по елецкому горизонту.
Составители: С. Д. Шереметьева и С. В. Полещук. 2019 г.

Fig. 4. Novo-Yelskoe field. Structural map and calculation of oil reserves for the Yeletsky horizon.
Compiled by S. D. Sheremeteva and S. V. Poleshchuk. 2019

Верхнесоленосный горизонт, вскрытый скв. 2, 7, 17, 18, характеризуется аномально высокими пластовыми давлениями (АВПД). При испытании скв. 7 из интервала 2761,0–2788,4 м получен фонтанный приток минерализованной воды дебитом до 1560 м³/сут на 12 мм штуцере. Состав водорасстворенного газа включает сероводород ($\Sigma CO_2 + H_2S = 83,2\%$), метан – 14,7 %, азот – 1,3 %. Скв. 17 оказалась в районе водонефтяного контакта (ВНК) нефтяной залежи, вскрытой скв. 2 из интервала 2462–2493 м, получен приток пластовой воды минерализацией 359,5 г/дм³ дебитом 2,5 м³/сут. Таким образом, во внутрисолевом горизонте верхнесоленосной толщи установлен также водонапорный горизонт с АВПД и сероводородной средой, что может представлять интерес для последующего бальнеологического использования.

Шатилковский участок

Шатилковская структура расположена в пределах Речицкой ступени на территории Светлогорского района Гомельской области.

В процессе проведения региональных сейсмических работ по профилю ВГ-263 в 1963 г. здесь был установлен антиклинальный перегиб по поверхности верхней соленосной толщи, а по более глубоким внутрисолевым горизонтам – флексурообразный изгиб слоев. Это послужило основанием для заложения в 1963 г. параметрической скв. 1. На момент проектирования к бурению скв. 1 северная часть профиля ВГ была отработана методом отраженных волн (МОВ) и корреляционным методом преломленных волн (КМПВ), а также построена карта по преломляющей границе с $V_r = 4000\text{--}4400$ м/сек (кровля верхней соли) [7].

Скважина проектировалась в районе пикет 131 на участке, где имеется уверенный геофизический материал. Для изучения геологического разреза палеозойских отложений, выявления зоны возможных нефтегазонакоплений, изучения скоростной характеристики пород и, следовательно, стратиграфической привязки имеющихся геофизических данных по профилю ВГ. Проектная глубина скважины определялась по предварительным данными сейсмических исследований для вскрытия второго преломляющего горизонта, связываемого с поверхностью фундамента и проектировалась до глубины 4000 м. Однако в последующем в процессе бурения скв. 1 и привязки отражающих горизонтов на других участках профиля ВГ проектная глубина скв. 1 была скорректирована до глубины 4500 м.

В процессе бурения скважины в августе 1964 г. при забое на глубине 3340 м скважина начала проявлять с выделением нефтяного газа. Промывочная жидкость в скважине облегчилась с плотности 1,4 г/см³ до 1,3 г/см³. В этом случае расчетное пластовое давление составляет 467 кГс/см³ на глубине 3340 м, что соответствует градиенту пластового давления в среднем 1,40 МПа/100 м.

В связи со сложностью вскрытия и испытания нефтепроявление с АВПД скважина Шатилковская 1 в галитовой подтолще перебуривалась вторым стволом, в котором при бурении скважина начала проявлять при забое 3263 м, что соответствует верхнешатилковским слоям. При испытании объекта в эксплуатационной колонне из интервала 3252–3290 м получен фонтанный приток нефти дебитом 7 м³/сут на штуцере 8 мм. Плотность нефти в поверхностных условиях составила 0,846 г/см³. В последующий период скважина некоторое время находилась в пробной эксплуатации.

В последующем, после 1968 г., на Шатилковской площади продолжалось бурение поисковых скв. 2, 3, 4, 7, которые уточнили геологическое строение по верхнесоленосным, межсолевым и частично подсолевым отложениям, однако геологических характеристик залежи выявленной скв. 1 не было установлено.

В 1985 г. тематическими работами Тематической партии (ТП) № 14 была подготовлена к поисковому бурению Шатилковская структура по поверхности «шатилковского горизонта» (отражающий горизонт IIa) (найдовские слои), в пределах которой впоследствии пробурена скважина Шатилковская 9. При ее опробовании испытателем пластов (ИП) притоков флюидов из отложений найдовских слоев не получено. Структура выведена из фонда структур, подготовленных к поисковому бурению.

В 1995 г. тематической партией ТП № 14 ЦГЭ РУП «Белгеология» в результате переинтерпретации геолого-геофизических материалов, в том числе и детальных сейсмических исследований, выполненных опытно-методической сейсмической партией № 9 ЦГЭ в 1994–1995 гг., была выявлена и подготовлена к поисковому бурению Шатилковская внутрисолевая структура. В 1997 г. она была проверена бурением (скважина Шатилковская 11) и в этом же году выведена из фонда перспективных (выявленных).

В 2006–2007 гг. по заданию РУП «БЕЛГЕО» на Шатилковской площади ЦГЭ отработано 8 сейсмических профилей СОГТ общей протяженностью 42,55 пог. км. Выполнена обработка полученных сейсмических материалов по стандартному и усложненному графикам, а также переобработка сейсмических материалов прошлых лет с применением современных методик обработки.

Интерпретация полученных материалов позволила установить в пределах Шатилковской площади положительную структуру по поверхности шатилковского репера (отражающий горизонт IIb) (найдовские слои).

Для характеристики объекта построены структурные карты поверхности галитовой подтолщи верхнесоленосной толщи (отражающий горизонт II), поверхности шатилковского репера (отражающий горизонт IIb) (рис. 5).

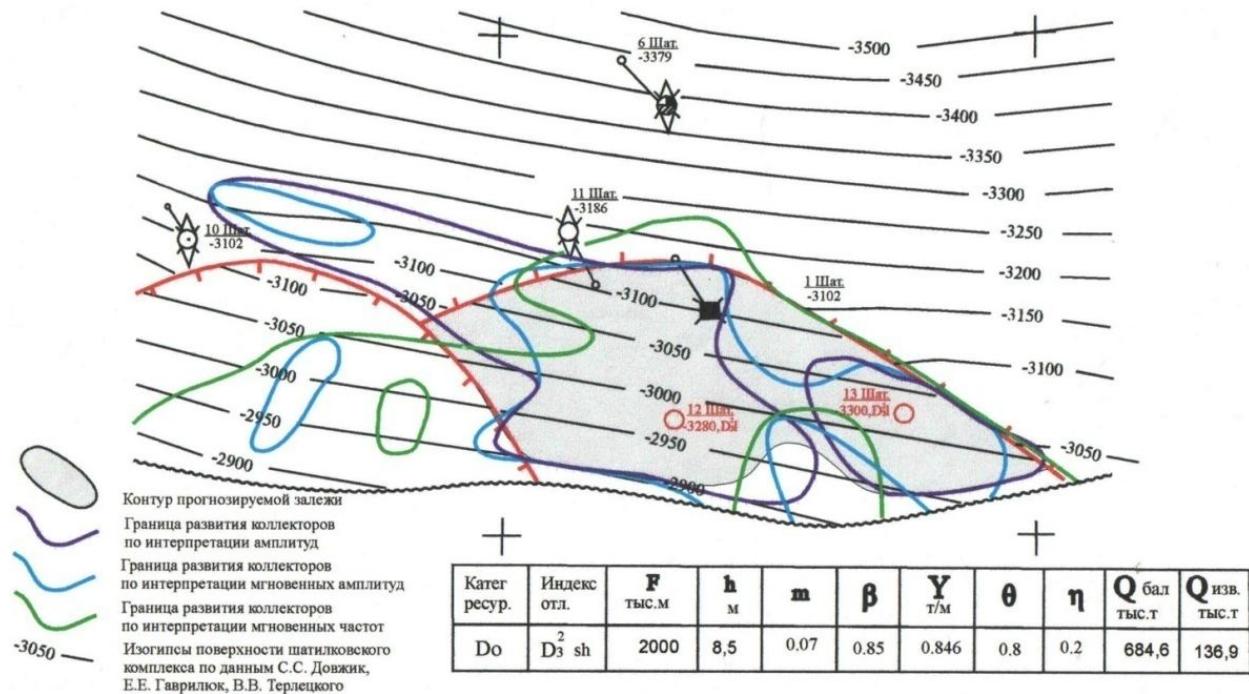


Рис. 5. Шатилковская площадь. Структурная карта по поверхности «шатилковских» слоев (отражающий горизонт IIa) к заложению поисковой скв. 12. Составители: Л. М. Ланкуть и др. 2008 г.

Fig. 5. Shatilkovskaya area. Structural map along the surface of the "Shatilkovo" layers (reflecting horizon IIa) to the placement of prospecting well 12. Compiled by L. M. Lankut et al. 2008

По поверхности шатилковского комплекса D^2 nd(sh₃) подготовленная структура представлялась в виде двух блоков разделенных тектоническим нарушением 50 м изолированных в южной части границей прекращения прослеживания информации по данным сейсморазведки. В блоке скважины Шатилковская 1 поверхность верхнешатилковской пачки уверенно прослеживалась к югу от скв. 1 с положительными характеристиками развития коллекторов (по интерпретации амплитуд, по интерпретации мгновенных амплитуд, по интерпретации мгновенных частот), которые в последующем не подтвердились (рис. 6). На основании полученных построений в головной части блока была пробурена поисковая скв. 12, по результатам бурения которой установлено, что в керне, поднятом из интервалов 3170,4–3175,6 м и 3237,6–3238,2 м, отмечены выпоты газированной нефти и запах углеводородов соответственно. При испытании интервалов 3070–3108 м, 3125–3176 м и 3070–3170 м отмечался приток разгазированного глинистого раствора (максимальный дебит – 0,95 м³/сут). В результате проведенного анализа материалов по скв. 1 и 12 Шатилковским установлено:

- в скв. 1 приток нефти получен из верхнего пласта, а в скв. 12 этот пласт по данным геофизических исследований скважин (ГИС) и газового каротажа характеризуется как непродуктивный;
- по данным замеров пластовое давление в скв. 1 соответствует градиенту 1,3–1,4, а в скв. 12 – 1,18–1,19, что свидетельствует об их разобщенности;
- после пересмотра сейсмических данных отражающий горизонт Па между скв. 1 и 12 прослеживается с перерывом, что подтверждало их разблокированность.

В связи с вышеизложенным принято решение скв. 12 закончить бурением и пробурить скв. 13 Шатилковскую с устья скв. 12.

По результатам бурения скв. 13 в 190 м к север-северо-западу от скв. 12 по результатам испытания притока пластового флюида не получено из-за низких емкостных свойств коллектора. С целью дальнейшего выяснения модели внутрисолевой залежи нефти принято решение о бурении скважины Шатилковская 14 из устья скв. 12. Скв. 14 пробурена в 290 м к северу от устья скв. 12 и 160 м от скв. 13 и оказалась в отдельном блоке. По результатам испытания в процессе бурения скв. 14 из пяти объектов получены слабые притоки фильтрата бурового раствора. Скважина оказалась в самостоятельном блоке, изолированном разрывными нарушениями от блоков скв. 13 и 1. Преследуя цель все же определиться с залежью нефти было принято решение о бурении скв. 15 с устья скв. 12 в блок скв. 1. По результатам бурения скв. 15 вскрыт внутрисолевой нефтеносный пласт на 14 м выше скв. 1 и при испытании в эксплуатационной колонне получен приток нефти дебитом 50 м³/сут на штуцере

3 мм. Этим притоком было установлено открытие Шатилковского месторождения в 2011 г. с залежью нефти в оресских слоях лебедянского горизонта с утверждением извлекаемых запасов нефти по промышленной категории С₁ в количестве 87 тыс. т и по категории С₂ – 82 тыс. т (см. рис. 6).

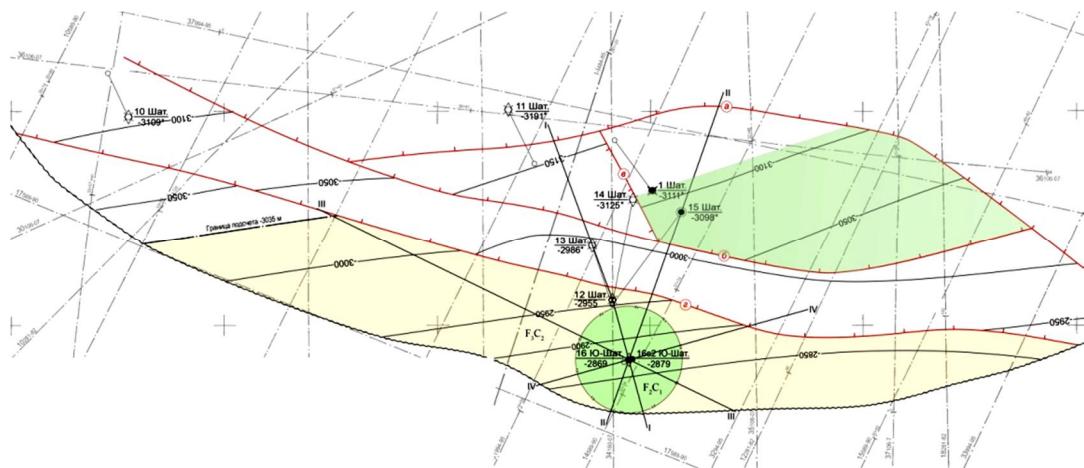
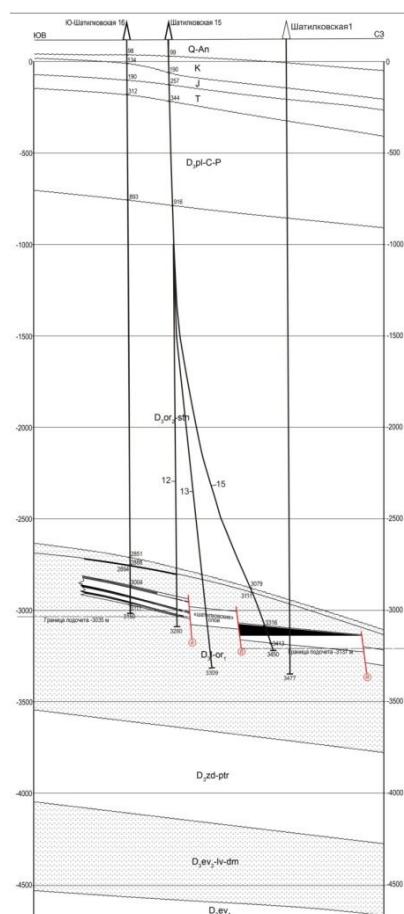


Рис. 6. Шатилковское и Южно-Шатилковское месторождения. Структурная карта и подсчет запасов нефти по «шатилковским» слоям лебедянского горизонта. Составители: С. Д. Шереметьева и С. В. Полещук. 2016 г.

Fig. 6. Shatilkovskoye and Yuzhno-Shatilkovskoye fields. Structural map and calculation of oil reserves on the "Shatilkovo" layers of the Lebedyanskiy horizon. Compiled by S. D. Sheremeteva and S. V. Poleshchuk. 2016



В последующем в 2014 г. в блоке скв. 12 заложена поисковая скважина Южно-Шатилковская 16, в которой при испытании в эксплуатационной колонне получены притоки нефти, позволившие утвердить в 2016 г. извлекаемые запасы промышленной категории С₁ в количестве 22 тыс. т и 243 тыс. т по категории С₂.

На примере внутрисолевого горизонта Шатилковской площади можно констатировать:

– подготовка объекта под заложение глубокой скважины на поиски нефти по результатам сейсморазведочных работ 2D не всегда является достоверной. Прослеживаемые сейсмические горизонты в непрерывном залегании по результатам бурения представляются расчлененными на отдельные блоки разломами амплитудой 20–25 м (рис. 7);

– параметрическая скважина Шатилковская 1, заложенная на региональном сейсмическом профиле ВГ и сыгравшая роль попутной ДК, вскрывшая внутрисолевую залежь на протяжении 45-летнего периода, привлекала геологический нефтепоисковый интерес со значительными затратами по бурению поисковых скважин.

Савичский участок

Савичское поднятие расположено в Калинковичском районе Гомельской области в пределах восточной части Заречинской зоны поднятий Припятского прогиба. По поверхности верхнефаменской соленосной толщи выявлено в 1964 г. в результате переинтерпретации материалов электроразведки вначале под названием Бобровичской, а позже Северо-Бобровичской [8].

По результатам сейсморазведочных работ в 1975 г. подготовлена Савичская структура по отражающему горизонту IV (кровля подсолевых карбонатных отложений масштаба 1 : 50 000). Структура представлялась в виде моноклинального блока субширотного простирания, ограниченного на юге малоамплитудным структурообразующим разрывным нарушением амплитудой до 50 м. Двумя амплитудными нарушениями структура разбита на три блока. В западном блоке заложена параметрическая скв. 1 с целью изучения геологического строения Савичской площади, выяснения перспектив нефтносности межсолевых и подсолевых отложений. Скважина пробурена до глубины 3603 м до вскрытия ланского горизонта. При испытании испытателем пластов в процессе бурения семилукских и воронежских отложений в интервале 3428–3489 м получен приток нефти дебитом 8,4 м³/сут. Замеренное пластовое давление составило 40,4 МПа на глубине 3429 м, что соответствует градиенту пластового давления 1,18 МПа/100 м. При испытании межсолевых отложений в четырех интервалах притоков пластовых флюидов не получено, хотя нефтепроявления по керну установлены.

Нефтепроявления в виде выпотов темно-коричневой нефти по плоскостям наслложения отмечены в интервалах 2631,8–2639 м, 2645–2652,8 м и в светло-сером известняке, а также обильные выпоты темно-коричневой нефти в интервале 3447–3489 м и по порам и кавернам в сером доломите.

Газовым каротажем зафиксированы повышенные газопоказания: при глубинах 2411 м – сумма УВ – 0,325 %, 2444 м – 0,334, 2455 м – 0,35, 2493 м – 1,255, 2498 м – 0,735 %; в интервале 3458–3487 м сумма УВ – от 0,0223 до 0,9 %, с соотношением С₁ / С₂ = от 1 до 7.

В последующем при испытании в эксплуатационной колонне отложений семилукского горизонта в интервале 3470–3489 м получен фонтанный приток нефти дебитом 5 м³/сут на штуцере 10 мм. Нефть характеризуется как плотная – 0,9144 г/см³ с содержанием парафина 2,19 %, смолистая – с содержанием смол силикагелевых 13,0 %. Значительное время скважина находилась в консервации в связи с отсутствием нефтесборных коммуникаций (письмо НГДУ «Речицанефть» от мая 1980 г.). В последующем в соответствии с решением рабочей комиссии по рассмотрению фонда законсервированных скважин треста «Белнефтегазразведка» от 4 сентября 1981 г. скважина подлежала ликвидации. Основанием для ликвидации послужил приказ Министерства геологии СССР о ликвидации законсервированных продуктивных скважин с дебитом нефти менее 10 т/сут. К счастью, этот приказ по скважине Савичская 1 не был реализован, хотя было положительное заключение Госгортехнадзора БССР (от 3 ноября 1982 г. № 1176) и приказ по тресту «Белнефтегазразведка» от 22 ноября 1982 г. № 330.

В последующем поисковые работы на Савичской площади продолжались. В 1983–1985 гг. был отработан региональный сейсмический профиль VIII–VIII_{2383–85}, проходивший через скважину Савичская 1, которая послужила ориентиром для стратиграфической привязки отражающих сейсмических горизонтов [7].

В 2002 г. в скважине № 1 Савичской вновь возобновлены работы. Проведено разбуривание ликвидационных цементных пластов и проведены испытания семилукско-саргаевских и воронежских отложений в интервалах 3470–3489 м, 3494–3497 м совместно и 3452–3458 м соответственно. В семилукско-саргаевских отложениях получен приток нефти дебитом 3,0–6,0 м³/сут на 4 мм штуцере, в воронежских отложениях – фонтанный приток нефти дебитом 1,1 м³/сут на 4 мм штуцере.

По поверхности резервуара воронежских отложений Савицкая структура представляет собой приподнятую часть моноклинали на склоне Заречинско-Великоборской ступени, ограниченную с юга субширотным структурообразующим разломом амплитудой 200–220 м и осложненной серией субмеридиональных разломов амплитудой порядка 20 м (рис. 8).

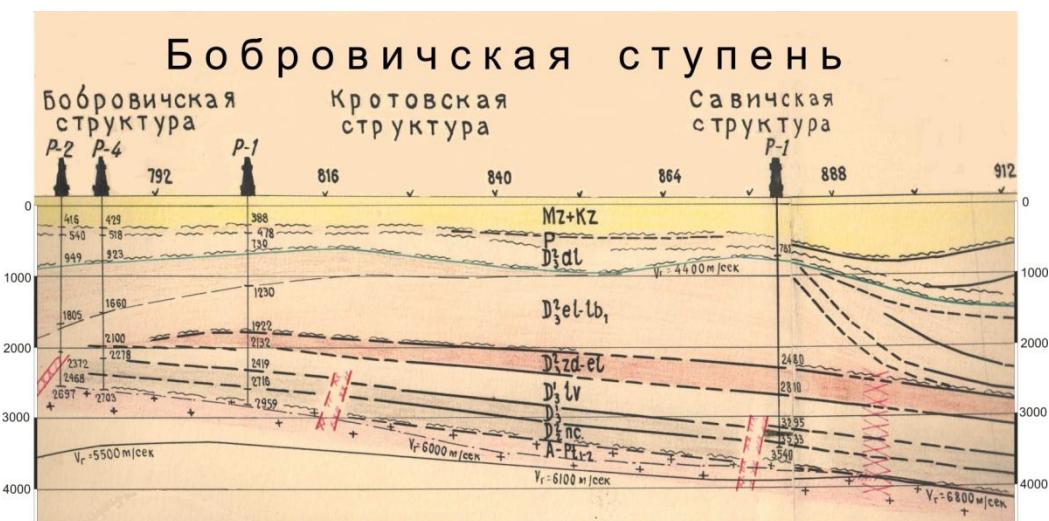


Рис. 8. Савицкая площадь. Региональный профиль VIII–VIII

Fig. 8. Savichskaya area. Regional profile VIII–VIII

Нефтеносность связана с западным, основным блоком. Поверхность резервуара воронежского горизонта в пределах западного блока вздымается в южном направлении от отметок более –3450 м до отметок –3250 м и выше. Размеры залежи воронежского горизонта составляют $3,8 \times 0,45\text{--}0,7$ км, высота залежи – 51 м.

ВНК воронежской залежи установлен на абсолютной отметке –3352 м.

Геологическое строение залежей нефти семилукского и саргаевского горизонтов аналогично строению залежи нефти воронежского горизонтов. Отличие состоит в том, что северная граница залежей проходит по линии зоны отсутствия коллекторов. Поверхность резервуара залежи нефти семилукского горизонта в пределах западного блока воздымается в южном направлении от отметок – 3400 м до –3300 м и выше, залежей нефти саргаевского горизонта – от отметок –3400 м до –3300 м.

Размеры залежей таковы: залежь семилукского горизонта – $3,25 \times 0,2\text{--}0,6$ км, высота – 62 м; залежь саргаевского горизонта – $3,15 \times 0,5\text{--}0,38$ км, высота – 56 м.

ВНК для залежей семилукского и саргаевского горизонтов не установлен и принят условно на абсолютной отметке –3348 м (семилукский горизонт) и –3356 м (саргаевский горизонт).

По условиям залегания залежь нефти воронежского горизонта пластовая, тектонически экранированная; залежи нефти саргаевского и семилукского горизонтов пластовые, тектонически и литологически экранированные.

Все 11 поисковых скважин, пробуренные в последующем в пределах Савицкой площади и ближайшего окружения, оказались непродуктивными. Это свидетельствовало о весьма сложных геологических условиях подготовки ловушек углеводородов в Центральной части Припятского прогиба, изучение которых применявшимся методом сейсморазведки оказалось низко эффективным.

Петриковско-Шестовичский участок

Петриковско-Шестовичский участок располагается в западной части Центральной зоны Припятского прогиба в пределах Приосевого грабена и Шестовичско-Гостовской тектонической ступени [9]. Участок весьма обширный и включает Петриковскую, Шестовичскую, Копаткевичскую, Западно-Шестовичскую, Северо-Шестовичскую площади (рис. 9). Общность включения в перечисленный состав площадей продиктована структурным их расположением и исторической последовательностью геологического изучения.

Первые структурные схемы составлены на основании сейсморазведочных работ, проведенных в 1954 г. Сейсмические исследования с целью дозреведки поднятия были выполнены затем в течение 1955 и 1956 г. По результатам сейсмических исследований заложены глубокие скв. 1 и 3 и проведено колонковое бурение. Бурением установлено, что геофизические данные оказались неточными.

Пересмотр и переинтерпретация сейсмических материалов и последующие работы методом регулируемого направленного приема (1960 г.), при камеральной обработке которых были учтены данные бурения двух скважин, не внесли достаточной ясности в особенности тектонического строения площади, а пробуренная в 1961 и 1962 г. по результатам этих работ скв. 4 показала значительные расхождения в глубинах залегания отдельных горизонтов, определяемых геофизическими исследованиями, с их действительным положением.

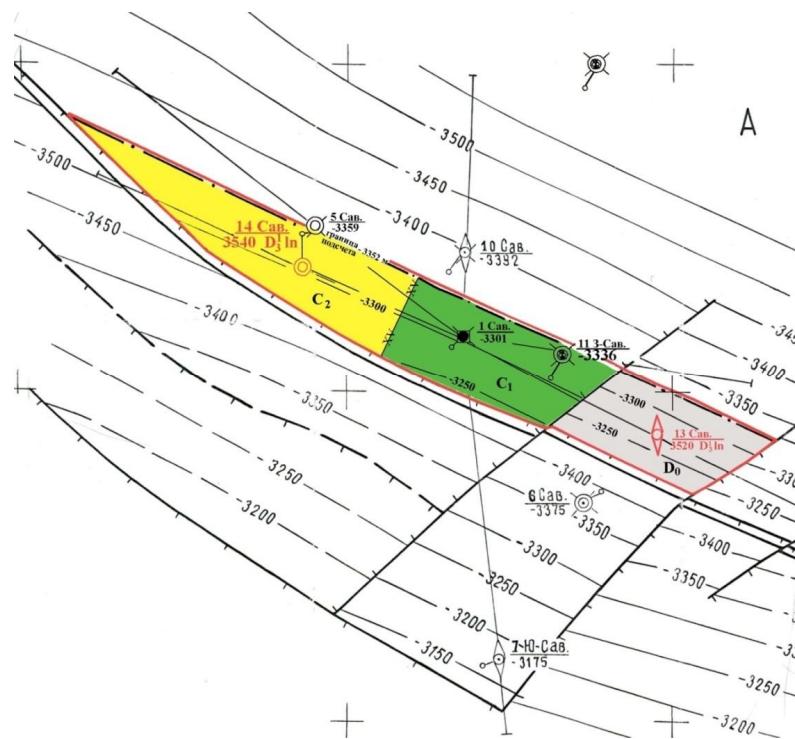


Рис. 9. Савичское месторождение нефти. Структурная карта по поверхности воронежского горизонта. Составители: С. Д. Шереметьева и др. 2003 г.

**Fig. 9. Savichskoye oil field. Structural map on the surface of the Voronezh horizon.
Compiled by S. D. Sheremeteva et al. 2003**

Шестовичская структура расположена в Петриковском районе Гомельской области.

Достоверной оказалась лишь структурная схема по кровле верхней соленосной толщи. Всего на площади пробурено четыре глубоких скважины, две из них вскрыли породы фундамента (см. табл. 1).

Прямые признаки нефтеносной наблюдались при бурении скв. 1 и 3. В процессе бурения скв. 3 глинистый раствор выносил на поверхность большое количество асфальта и асфальбитов в виде хлопьев. По окончании бурения скважины у ее устья на поверхности глинистого раствора скопился слой нефти плотностью 0,964 г/см³. Повышенные газопоказания и битуминозность пород отмечены по всему разрезу, начиная со среднего девона и заканчивая надсолевыми верхнедевонскими осадками, в которых имеются признаки асфальта [7].

Ни одна из скважин на Шестовичской площади не была опробована. В разрезе выделен ряд горизонтов с хорошими коллекторскими свойствами, но все они по промыслово-геофизическим данным определены как водоносные.

Прямые признаки нефтеносности, благоприятные структурные условия, наличие непроницаемых покрышек указывают на перспективность Шестовичской площади в нефтегазоносном отношении.

Петриковская структура находится в Петриковском районе Гомельской области.

Неглубокое залегание кровли верхнесоленосных отложений впервые было отмечено при выполнении рекогносцировочных работ КМПВ в 1950 г. Рекогносцировочно-площадные работы МОВ и КМПВ, проведенные в 1955 г., дали возможность оконтурить антиклинальное поднятие по верхнесолевым отложениям. Был отмечен также перегиб слоев по условному горизонту, отождествляемому с межсолевыми отложениями. Электроразведочные работы (1958 г.) подтвердили наличие соляного поднятия. В пределах сводовой части складки пробурены две скважины, одна из которых вскрыла кристаллический фундамент. На основе всех этих данных составлены структурные схемы по услов-

ным сейсмическим горизонтом в надсолевом девоне, кровле: верхней соленосной толщи и подсолевым отложениям. Ограниченные объемы бурения и геофизических исследований оставляют много неясностей в геологическом строении площади [7].

Скв. 5 и 6 пробурены в сводовой части антиклинали по поверхности верхнесолевых отложений, но подсолевые и межсолевые горизонты здесь имеют моноклинальное строение с общим воздыманием на северо-северо-запад. Изолированных ловушек для залежей нефти не выявлено. Наличие последних, при данных структурных построениях более вероятно ожидать за сбросом, располагающимся в 1,5 км к юго-западу от скв. 5, где вырисовывается наиболее приподнятая часть моноклинали, экранированная с севера нарушением. В том же блоке (скв. 5 и 6) более благоприятными структурными условиями характеризуется участок, расположенный к северо-западу от скв. 6. Здесь отмечается воздымание межсолевых и подсолевых отложений девона и намечается тектонический экран (рис. 10).

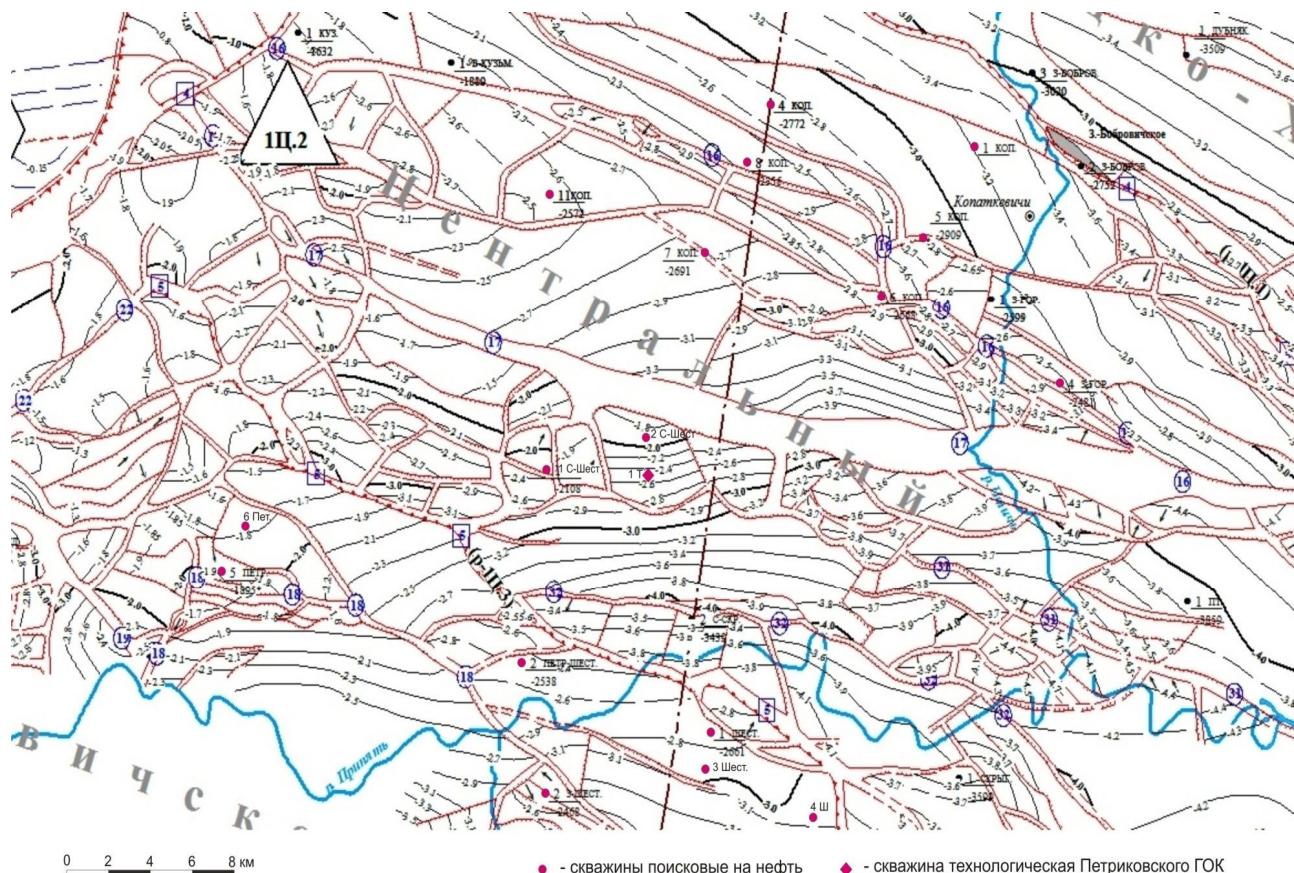


Рис. 10. Петриковско-Шестовичский участок. Структурная карта по поверхности подсолевых отложений [9]

Fig. 10. Petrikovsky-Shestovich section. Structural map on the surface of saline deposits [9]

Признаки нефтеносности при бурении скважин зафиксированы повышенными газопоказаниями, битуминозностью пород, высоким содержанием в подземных водах йода и брома. Воды хлоркальциевого типа, минерализация их достигает порядка 250–350 г/л.

В разрезе установлены гранулярные и трещиноватые коллекторы, непроницаемые покрышки. Глубокие горизонты девона характеризуются гидрогеологической закрытостью, поэтому Петриковская площадь является перспективной на нефть и газ.

Копаткевичское поднятие расположено в Петриковском районе Гомельской области в пределах восточной части Копаткевичской зоны поднятий Припятского прогиба. Выявлено в 1950–1952 гг. сейсморазведкой КМПВ [7] по кровле верхнефаменской соленосной толщи. Изучено всеми видами геофизических съемок. Пробурены две глубокие скважины, которыми подсолевой разрез не пройден. Выделяется по поверхности фундамента, подсолевым, верхнесоленосным девонским и надсолевым отложениям. По поверхности фундамента и подсолевым отложениям К. п. – полуан-

тиклиналь субширотного простирания, ограниченная с юга Копаткевичским разломом, а с запада оперяющим его разрывом. Размеры: 12×4 км. Амплитуда – 200 м. По межсолевым отложениям не выделяется, поскольку не прослеживаются ограничивающие его разрывы. Следует отметить, что размеры структуры обширные и поисковые скважины в ее пределах разбросаны по всей территории и в контуры Петриковско-Шестовичского участка вошла западная часть, в пределах которой пробурены скв. 4–8, 11 Копаткевичские. Учитывая качество и характер распространения межсолевого комплекса перспективы нефтеносности на Копаткевичской площади связывали в основном с подсолевым комплексом. Одна по тектоническому строению площади по подсолевому комплексу и фундаменту характерна обширная разблокированность до условий, когда новая пробуренная скважина располагается в отдельном блоке.

Нефтегазопроявления отмечены при бурении скважин во всех горизонтах девона, начиная с подсолевых пярнуско-наровских и заканчивая надсолевыми данково-лебедянскими отложениями.

Пленка нефти на глинистом растворе наблюдалась в процессе бурения скв. 3, а во время перерыва в бурении у устья скопилось около 20 л нефти. Капли нефти были видны на поверхности расколов карбонатных пород девона; вытяжки в хлороформе соломенного цвета, цвета чая и темно-коричневого дают песчаники, алевролиты, известняки; иногда породы обладают запахом нефти; в отдельных прослоях отмечается повышенная битуминозность; значительные газопоказания установлены газовым каротажем. Наиболее часто и наибольшей интенсивности нефтепроявления отмечались в скв. 4 и 3, которые расположены ближе к своду структуры, чем скв. 1 и 2. Для подсолевых отложений девона характерны в основном средний и легкий битумы; в межсолевых образованиях, наряду со средним, имеются маслянисто-смолистые и асфальтеново-смолистые битумы. Для верхней соленосной толщи и надсолевого девона характерны смолисто-маслянистые, маслянистые и смолисто-асфальтеновые типы битумов. Элементарный состав битума, извлеченного из известняков, залегающих в кровле задонско-елецкого горизонта скв. 4, %: C – 78,8; H – 10,0; S – 8,7; O + N + S – 11,2. Органического углерода содержится 3,46 % [10].

Нефть из скв. 3 густая, маслообразная, цвет ее почти черный, обладает резким запахом сернистых соединений. Плотность нефти – 0,920 г/см³; содержание серы – порядка 9 %; вязкость по Энглеру – 5,0–7,0 спз; температура вспышки – 56 °C; температура воспламенения – 90 °C. В скв. 5 в карбонатных породах задонско-елецкого горизонта содержатся по плоскости наслоения включения черно-буровой окисленной нефти; в этих же отложениях отмечены повышенные газопоказания с суммой углеводородных газов до 8,22 %.

В скв. 6 один из внутрисолевых прослоев в фаменской соленосной толще пропитан вязкой окисленной нефтью с сильным запахом серы, а сумма углеводородных газов доходит до 2,963 %.

В южной части Петриковско-Шестовичского участка расположена Западно-Шестовичская площадь, в пределах которой пробурены скв. 1 и 2 до вскрытия всего разреза осадочного чехла и пород кристаллического фундамента. Скв. 2 пробурена в 2001 г. до глубины 2922 м и в разрезе ланского горизонта в песчаниках в интервале 2672,9–2681,3 м и 2681,3–2682,7 м установлено нефтепроявление в виде нефти коричневого цвета, газированная, подвижная, быстроиспоряжающаяся. По результатам испытания в процессе бурения из подсолевых терригенных и карбонатных пластов получены притоки пластовых вод. По данным промыслового-геофизических исследований разрез обводнен (см. рис. 10).

Весьма интересной в пределах Петриковско-Шестовичского участка представляется Северо-Шестовичская площадь со скважиной Петриковская 1 технологическая для Горнообогатительного комбината.

Параметрическая скважина Северо-Шестовичская 1 пробурена в 1971 г. до глубины 2653 м до кристаллического фундамента. В разрезе межсолевых отложений пластины-коллекторы отсутствуют. Хорошими коллекторскими свойствами характеризуются горизонты подсолевого комплекса, причем как карбонатного, так и терригенного. При испытании указанных горизонтов получены притоки пластовой воды.

Скважина Северо-Шестовичская 2 пробурена в 1974 г. до глубины 2400 м, до пород кристаллического фундамента, со вскрытием всего разреза осадочного чехла. Основой для заложения скважины послужили материалы сейсморазведки, по результатам которых была построена карта по поверхности подсолевого комплекса в масштабе 1 : 50 000. Скважиной подсолевой комплекс был вскрыт на 200 м выше проектного и по результатам испытания в процессе бурения и разрез оказался обводнен.

В пределах Северо-Шестовичской площади в 950 м к югу от скв. 2 Северо-Шестовичской в 2020 г. пробурена оценочная технологическая скважина № 1 Петриковского ГОКа. Скважина проектировалась с целью закачки технологических рассолов при промышленном освоении калий-

ных солей Петриковского месторождения. Скважина пробурена до глубины 2600 м до вскрытия кристаллического фундамента и всего осадочного чехла. Заложение скважины и программа работ обосновывались с технологических позиций, однако с геологических позиций скважина выполнила также положительную роль.

В процессе бурения скважины по отложениям галитовой подтолщи верхнесоленосных отложений, залегающих в интервале 515–1933 м, при достижении глубины 1265 м на устье скважины был отмечен запах углеводородного газа. Плотность промывочной жидкости составила 1,31 г/см³. На глубине 1355 м произошло разгазирование промывочной жидкости до плотности 1,26 г/см³. В желобах наблюдалась пленка темно-коричневой нефти различной интенсивности в виде пятен и разводов. При достижении глубины 1395 м запах углеводородов усилился, отмечалось увеличение количества нефти и уменьшение ее плотности.

Наряду с непрекращающимися (лишь менялась их интенсивность) нефтепроявлениями и резким запахом углеводородных газов, газопоказания в интервале 1452–2157 м изменились в сумме от 0,000033 до 3,468167 %, с возрастанием концентрации углеводородного газа на устье скважины, которая составила 0,0601 %, а при стоянке – до 3,03429 %.

В результате промыслового-геофизических исследований и детальной интерпретации полученных данных было установлено, что нефтегазопроявления связаны со вскрытыми нефтенасыщенными пластами в интервалах: 1254–1265 м – 11 м; 1433–1444 м – 11 м; 1551–1575 м – 24 м. Кп. сп. – 10,7 %, Кн. сп. – 80,6 %.

Следует отметить, что проявления нефти продолжались до перекрытия разреза до кровли подсолевого карбонатного комплекса технической колонной осаждением на глубину 2157 м. Плотность промывочной жидкости при бурении скважины составляла 1,30 г/см³, что можно определять как бурение вскрытых горизонтов на равновесии. К сожалению, по технологическим причинам испытать объекты испытателем пластов в процессе бурения не представлялось возможным, поэтому значение пластового давления можно ориентировочно определять на уровне 1,30 МПа/100 м. Определение продуктивности нефтяных горизонтов в технической колонне выполнено по отдельному плану, разработанному специалистами филиала Мозырской НРЭГБ при поддержке автора настоящей статьи. По результатам замеров роста уровня жидкости определен приток нефти максимальным дебитом 0,526 м³/сут при СДУ равном 160,35 м. Плотность дегазированной нефти составила 0,9689–0,9760 г/см³.

После получения притока нефти специалистами филиала Мозырской НРЭГБ был детально изучен весь имеющийся геолого-геофизический материал (каротаж, керн) района бурения одной оценочной скважины по всем пробуренным соляным скважинам Петриковского месторождения калийных солей и поисковым скважинам Северо-Шестовичским № 1, 2 и Копаткевичским скважинам.

Особое внимание было обращено на скважины, где эти прослои не только прослеживаются, но и в них отмечались нефтепроявления. Так, к примеру, в скважине № 12 Копаткевичской из первого верхнего пласта при испытании в процессе бурения под ЗПК получен разгазированный раствор с пленкой нефти. При бурении близлежащих соляных скважин в поднятом керне отмечались нефтепроявления в скв. 285, 378, 409. В скважине оценочной 1 керн не отбирался, однако, учитывая описание поднятого керна в пробуренных соляных скважинах и результаты интерпретации ГИС, нефтеэмещающие породы представлены пористо-трещиноватыми известняками доломитизированными, реже – ангидритами.

Все в целом дало возможность выполнить структурные построения поверхности галитовой подтолщи вехнесоленосных отложений и поверхности верхнего нефтяного пласта, построить карту мощностей этого нефтяного пласта, вскрытого всеми пробуренными скважинами в районе скважины № 1, составляющего 8–13 м.

По результатам анализа геологических материалов представляется, что залежь нефти прослеживается вокруг скв. 1 технологической и в направлении к скв. 285, пробуренной как соленосная со вскрытием верхнего внутрисолевого горизонта (рис. 11). Геологические ресурсы нефти вокруг скв. 1 технологической составляют более 300 тыс. т, что свидетельствует о перспективности выявленного нефтепроявления.

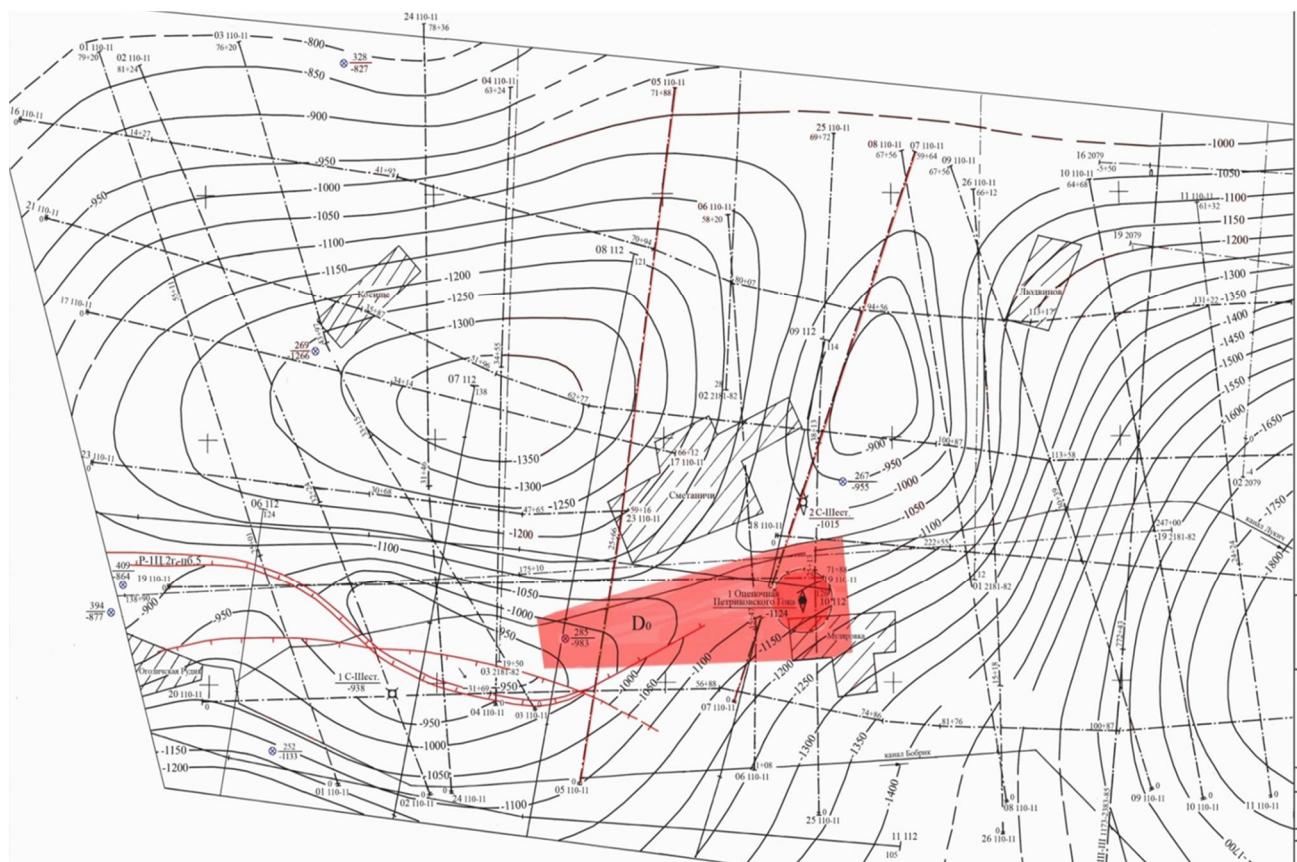
Однако вместе с проявлением внутрисолевой залежи на этом участке представляется необходимым обратить внимание на отложения подсолевого комплекса. В частности, следует отметить положительный геологический фактор, представленный технологической скважиной, сыгравшей роль ДК: в ней весь подсолевой комплекс с глубины 2160,0 м (воронежский горизонт) до 2600 м (AR–PR₁) пробурен со сплошным отбором керна, что не всегда получалось при бурении отдельных опорных скважин. Поэтому эта часть разреза, отобранная в скважине Петриковская технологиче-

ская 1, может служить основой для детального стратиграфического и литологического расчленения разреза. К тому же следует отметить, что при проводке скважины в подсолевых отложениях отмечены в керне признаки нефти в виде выпотов нефти в воронежском, саргаевском, ланском, старооскольском и верхнепротерозойском интервалах разреза. Учитывая проявление нефти в верхнесоленосном разрезе Петриковской технологической скважины здесь уместно применить правило Кудрявцева, действующего во всех нефтегазоносных бассейнах по мере их глубокого разбуривания. Это правило заключается в том, что во всех нефтегазоносных районах, где нефть и газ имеются в каком-либо горизонте разреза, в том или ином количестве они найдутся и во всех нижележащих горизонтах. В горизонтах, где имеются хорошие коллекторы и ловушки, формируются промышленные залежи [11].

И на этом объекте нам представляется перспективным участок в районе скважины Северо-Шестовичская 2 по подсолевым отложениям (рис. 12).

Установлены признаки нефти в подсолевых отложениях, свидетельствующие о перспективности Северо-Шестовичской площади.

По результатам аномальной радиенасыщенности пластовых вод из интервала 1983–2060 м (D_3sr-st) составляющих $1,07 \cdot 10^{-9}$ г/дм [5, 6] расстояние до прогнозируемой залежи составляет более 50 м (рис. 12). Следовательно, этот участок совместно с залегающим к северу Сметаничским блоком подлежит в ближайший период детальному исследованию сейсмическим методом для заложения поисковой скважины.



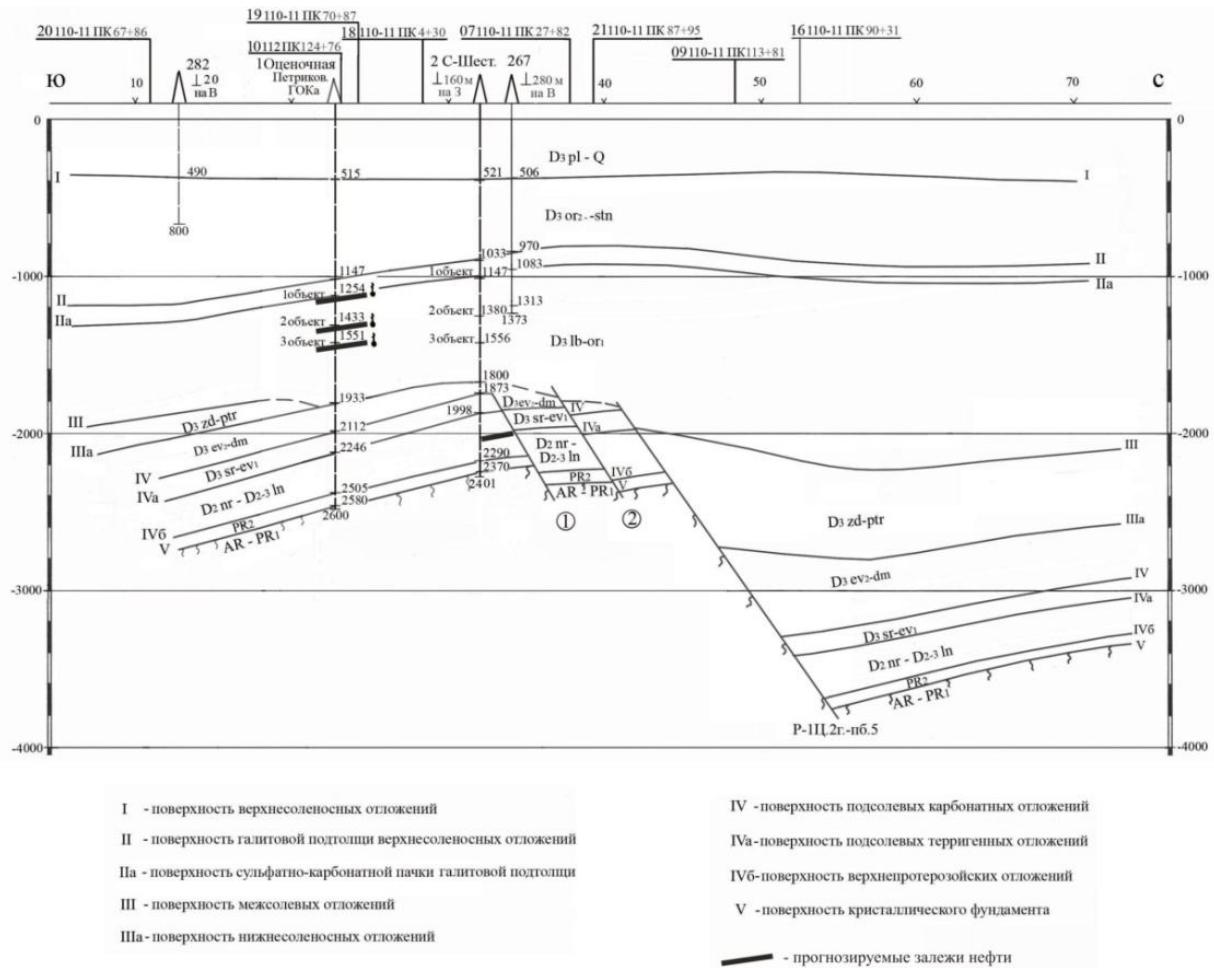


Рис. 12. Петриковская и Северо-Шестовичская площади. Сейсмогеологический профиль

Fig. 12. Petrikovskaya and Severo-Shestovichskaya areas. Seismogeological profile

Обсуждение и заключение. Проанализирован ход геологоразведочных работ в пределах четырех участков, в которых пробурены единичные скважины, заложенные по методу ДК. В чистом виде только одну из четырех скважин можно отнести к заложению по этому принципу – это скважину Ельская 2. Параметрические скважины Шатилковская 1 и Савичская 1 успешно решили параметрические задачи, однако дополнительно во вскрытом разрезе установлены нефтепроявления, которые в последующем доведены до залежей нефти с подсчетом промышленных запасов. Следует отметить, что в районе установленного нефтепроявления проявляется поисковый геологический азарт, стимулирующий ускоренное заложение очередных поисковых скважин. Здесь следует признать, что такому ускорению способствовал результат, полученный в скважине-первооткрывательнице с проявлением нефти. При этом обоснованием для заложения последующих поисковых скважин служили другие нефтеперспективные горизонты. В частности, Ельское проявление нефти в верхнесоленосном комплексе способствовало заложению поисковых скважин на межсолевой и подсолевой комплексы, для чего пробурено 23 глубокие скважины с общей проходкой 68 349 м (см. табл. 1). Таким же образом в историческом плане происходило и на других участках. Завершающим этапом исследования участка является установление реального месторождения (залежи) нефти. В пределах Ельского участка залежь нефти с промышленными извлекаемыми запасами установлена в межсолевом комплексе в елецком горизонте на Ново-Ельском месторождении, составляющими 8 тыс. т по категории C_1 , 121 тыс. т по категории C_2 и ресурсы категории D_0 в количестве 253 тыс. т (табл. 2). Участок первооткрывательницы внутрисолевой залежи скв. 2 определяется в настоящее время как Познякевичская перспективная площадь с ресурсами нефти около 255 тыс. т по категории D_0 . Однако для перевода части ресурсов по этому участку в запасы промышленной категории в настоящее время не требуется никаких физических объектов, кроме аналитического обобщения [4].

Таблица 2. Геологические результаты по объектам, изученным методом «дикая кошка»**Table 2. Geological results for objects studied by the "wildcat" method**

Участок	Горизонт, инициировавший исследования	Пробурено		Геологический результат на 1 января 2021 г.
		скважин	метров	
Ельский	Верхнесоленосная толща	23	68 349	Ново-Ельское месторождение нефти, елецкий горизонт: С ₁ – 8 тыс. т, С ₂ – 121 тыс. т, Д ₀ – 253 тыс. т. Познякевичская площадь, лебедянский горизонт Д ₀ – 255 тыс. т
Шатилковский	Верхнесоленосная толща	16	60 377	Шатилковское и Южно-Шатилковское месторождения, залежи нефти в лебедянском горизонте: С ₁ – 109 тыс. т, С ₂ – 325 тыс. т
Савичский	Подсолевой карбонатный комплекс	12	42 341	Савичское месторождение, залежи в саргаевском, семилукском, воронежском горизонтах: С ₁ – 129 тыс. т, С ₂ – 196 тыс. т, Д ₀ – 113 тыс. т
Петриковско-Шестовичский	Подсолевой комплекс	15	42 670	Нефтепроявление в верхнесоленосной толще через 70 лет с начала параметрического и поискового бурения. Ресурсы по верхнесоленосной толще

В пределах Шатилковского участка в верхнесоленосном горизонте, инициировавшем исследования, установлены залежи нефти в промышленными запасами на Шатилковском и Южно-Шатилковском месторождениях с извлекаемыми запасами 109 тыс. т по категории С₁ и 325 тыс. т по категории С₂ (см. табл. 2).

В пределах Савичского участка основным разрезом, инициировавшим изучение, являются горизонты подсолевого карбонатного комплекса, в котором залежи нефти установлены в саргаевском, семилукском и воронежском горизонтах. Извлекаемые запасы составляют 129 тыс. т по категории С₁, 196 тыс. т по категории С₂ и ресурсы категории Д₀ в количестве 113 тыс. т. В пределах участка пробурено 12 поисково-разведочных скважин с проходкой 42 341 м (см. табл. 2).

В пределах Петриковско-Шатилковского участка основным комплексом исследования являлись подсолевые отложения на отдельных локальных участках. Межсолевые отложения характеризуются весьма низкоемкими пластами, проблемными для обеспечения притоков флюидов. Установление в пределах Петриковской площади нефтепроявления в технологической скважине № 1 Петриковская определяет положительно перспективы верхнесоленосного комплекса. Однако по опыту работ на Шатилковском участке для изучения внутрисоленосных горизонтов потребуется новое более высокое качество сейсмических исследований геологического строения.

Следует признать, что в анализируемый период применяющийся метод сейсморазведки МОГТ 2D в силу существенной разблокированности подсолевого и межсолевого комплекса и влияния соляно-купольной тектоники достоверность изучения оставалась не всегда высокой. В настоящее время сейсморазведочные методы по методике 3D позволяют значительно выше поднять достоверность подготовки объектов под поисковое бурение. Целесообразно территорию, включающую район скважин Петриковская технологическая и Северо-Шестовичская 2, изучить детальной съемкой для заложения поисковой скважины.

Установленные нефтепроявления в первых поисковых и параметрических скважинах, заложенных по методу ДК через значительный период завершаются выявлением залежей нефти с промышленными, однако незначительными запасами нефти – не более 1 млн т геологических запасов.

Из-за незначительных размеров залежей нефти на опыте анализа работ на Шатилковском и Савичском участках выявление залежей является чисто случайным фактом. Достаточно было бы смещения при проектировании скважин на этих участках на 200–300 м от пробуренного, что привело бы к отрицательным результатам.

Активизация поисковых работ в начальный период с заложением дополнительных поисковых скважин без уверенной геологической информации определило невысокую экономическую эффективность поисковых работ. Вместе с тем выполненные работы сыграли положительную геологическую роль при определении реальных моделей ловушек углеводородов, результаты которых использовались при изучении других участков.

Список использованных источников

1. Леворсен, А. Геология нефти и газа / А. Леворсен. – М. : Мир, 1970. – 639 с.
2. Динамика развития нефтегазопоисковых исследований и геолого-геофизическая изученность Припятской нефтегазоносной области / З. А. Познякевич [и др.] // Геология и нефтегазоносность запада Восточно-Европейской платформы. – Минск : Беларусская наука, 1997. – С. 171–210.
3. Нефть Белоруссии (потенциальные нефтегазоносные районы) / К. И. Лукашев [и др.]. – Минск : Наука и техника, 1969. – 204 с.
4. Грибик, Я. Г. Геологическая оценка Ельской (Познякевичской) залежи нефти в Припятском прогибе / Я. Г. Грибик // *Litasfera*. – 2016. – № 2 (45). – С. 94–107.
5. Грибик, Я. Г. Оценка перспектив нефтеносности локальных структур Припятского прогиба по радиоактивности подземных вод / Я. Г. Грибик // Перспективы развития минерально-сырьевой базы БССР : сб. науч. тр. – Минск : БелНИГРИ. – 1990. – С. 67–73.
6. Грибик, Я. Г. Новые прогнозируемые месторождения нефти в Припятском прогибе / Я. Г. Грибик // Инновационное развитие геологической науки – путь к эффективному и комплексному освоению недр. – Минск : БелНИГРИ, 2007. – С. 84–88.
7. Геология нефтяных месторождений Белоруссии / под ред. д-ра геол.-минерал. наук С. П. Максимова. – М. : Недра, 1972. – 232 с.
8. Тектоническая терминология Белоруссии и Прибалтики (локальные структуры) / гл. ред. Р. Г. Гарецкий. – Минск : Наука и техника, 1979. – 208 с.
9. Бескопыльный, В. Н. Пояснительная записка к картам структурного районирования подсолевого и межсолевого комплексов Припятского прогиба для решения задач эффективного освоения ресурсов углеводородов / В. Н. Бескопыльный, Р. Е. Айзберг, Я. Г. Грибик. – Минск ; Гомель, 2011. – 43 с.
10. Лапуть, В. А. Геохимия нефтегазоносных отложений Белоруссии / В. А. Лапуть. – Минск : Наука и техника, 1983. – 214 с.
11. Кудрявцев, Н. А. Состояние вопроса о генезисе нефти / Н. А. Кудрявцев // Генезис нефти и газа. – М. : Недра, 1967. – С. 262–291.

References

1. Levorsen A. *Geologiya nefti i gaza* [Geology of oil and gas]. Moscow, 1970, 639 p. (in Russian)
2. Poznyakevich Z. A., Azarenko F. S., Bogino V. A., Klushin S. V., Mikutskiy S. P. *Dinamika razvitiya neftegazopoiskovykh issledovaniy i geologo-geofizicheskaya izuchennost' Pripyatskoy neftegazonosnoy oblasti* [Dynamics of development of oil and gas prospecting research and geological and geophysical study of the Pripyat oil and gas region]. *Geologiya i neftegazonosnost' zapada Vostochno-Yevropeyskoy platformy = Geology and oil and gas potential of the West of the East European Platform*. Minsk, 1997, pp. 171–210. (in Russian)
3. Lukashev K. I., Laput V. A., Semyachko R. Ya., Buyakov N. I. *Neft Belorussii (potentsial'nyye neftegazonosnyye rayony)* [Oil of Belarus (potential oil and gas regions)]. Minsk, Science and Technology, 1969, 204 p. (in Russian)
4. Gribik Ya. G. *Geologicheskaya otsenka Yel'skoy (Poznyakevichskoy) zalezhi nefti v Pripyatskom progibe* [Geological assessment of the El'skaya (Poznyakevichskaya) oil deposits in the Pripyat trough]. *Litasfera = Litosfera*, 2016, no. 2 (45), 2016, pp. 94–107. (in Russian)
5. Gribik Ya. G. *Otsenka perspektiv neftenosnosti lokal'nykh struktur Pripyatskogo progiba po radioaktivnosti podzemnykh vod* [Assessment of the prospects for the oil-bearing capacity of the local structures of the Pripyat trough based on the radioactivity of groundwater]. *Perspektivnye razvitiya mineral'no-syr'evoy bazy BSSR. Sbornik nauchnyh trudov = Prospects for the development of the mineral resource base of the BSSR. Collection of scientific papers*. Minsk, Belarusian Scientific Research Geological Exploration Institute, 1990, pp. 67–73. (in Russian)
6. Gribik Ya. G. *Novyye prognoziruyemye mestorozhdeniya nefti v Pripyatskom progibe* [New predicted oil fields in the Pripyat trough]. *Innovatsionnoye razvitiye geologicheskoy nauki – put' k effektivnomu i kompleksnomu osvoyeniyu nedr* [Innovative development of geological science – the way to effective and comprehensive development of the subsoil]. Minsk, Belarusian Scientific Research Geological Exploration Institute, 2007, pp. 84–88. (in Russian)
7. *Geologiya neftyanykh mestorozhdeniy Belorussii* [Geology of oil fields in Belarus]. Under ed. of D. Sci. (Geology and Mineralogy) S. P. Maksimov Moscow, 1972, 232 p. (in Russian)
8. *Tektonicheskaya terminologiya Belorussii i Pribaltiki (lokal'nyye struktury)*. [Tectonic terminology of Belarus and the Baltic states (local structures)]. Ed.-in-chief R. G. Garetski. Minsk, Science and Technology Publ., 1979, 208 p. (in Russian)
9. Beskopyl'nyy V. N., Aizberg R. E., Gribik Ya. G. *Poyasnitel'naya zapiska k kartam strukturnogo rayonirovaniya podsolevogo i mezhsolevogo kompleksov Pripyatskogo progiba dlya resheniya zadach effektivnogo osvoeniya resursov uglevodorodov* [Explanatory note to the maps of structural zoning of the subsalt and intersalt complexes of the Pripyat trough for solving the problems of effective development of hydrocarbon resources]. Minsk ; Gomel, 2011, 43 p. (in Russian)
10. Laput' V. A. *Geokhimiya neftegazonosnykh otlozheniy Belorussii* [Geochemistry of oil and gas deposits in Belarus]. Minsk, Science and Technology Publ., 1983, 214 p. (in Russian)
11. Kudryavtsev N. A. *Sostoyaniye voprosa o genezise nefti* [State of the issue of the genesis of oil]. *Genezis nefti i gaza = Genesis of oil and gas*. Moscow, 1967, pp. 262–291. (in Russian)

Информация об авторе

Грибик Ярослав Гаврилович – кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией геотектоники и геофизики, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yaroslavgribik@tut.by

Information about the author

Yaroslav Gribik – Ph. D. (Geology and Mineralogy), Head of Lab. of Geotectonics and Geophysics, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yaroslavgribik@tut.by

**ГЕОТЕХНОЛОГИИ. ДОБЫЧА, ПЕРЕРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
ТВЕРДЫХ ГОРЮЧИХ ИСКОПАЕМЫХ**
**GEOTECHNOLOGY. EXTRACTION, PROCESSING AND THE USE
OF SOLID FUEL MINERALS**

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2021-1-169-174>

УДК 544.77

Поступила в редакцию 19.03.2021

Received 19.03.2021

**РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГУМИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ
ТОРФА И БУРОГО УГЛЯ**

И. И. Лиштван, В. Н. Алейникова

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. Для прогнозирования бурения нефтяных скважин важное значение имеет знание структурно-реологических свойств буровых растворов и реагентов, применяемых для их обработки. В данной статье приведены результаты исследований строения гуминовых веществ торфа и бурого углей, осажденных в различных диапазонах pH с позиций их способности к структурообразованию на основе получения реологических кривых течения их дисперсий и определения их реологических показателей с точки зрения применения указанных веществ в буровой практике. Установлено, что при переходе от фракции, осажденной в щелочной среде (12,0–8,5) к фракции, осажденной в кислой среде (5,0–2,0), происходит уменьшение реологических показателей гуминовых веществ каустобиолитов. Реологические кривые течения дисперсий гуминовых веществ каустобиолитов фракций 1 и 2 характерны для прочных твердообразных структур, дисперсий гуминовых веществ фракции 3 – для малопрочных коагуляционных структур. Наименее структурированы гуминовые вещества бурого угля, поэтому их использование предпочтительнее для регулирования структурно-реологических свойств буровых растворов.

Ключевые слова: торф; бурый уголь; гуминовые вещества; фракционирование; дисперсия; структурообразование; реология; буровые растворы.

Для цитирования. Лиштван И. И., Алейникова В. Н. Реологические свойства гуминовых веществ торфа и бурого угля // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 169–174.

**RHEOLOGICAL PROPERTIES OF HUMIC SUBSTANCES
OF PEAT AND BROWN COAL**

I. I. Lishtvan, V. N. Aleinikova

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. Knowledge about structure and rheological peculiarities of drilling solutions and reagents applied for the proceeding of oil wells has significant value for the forecasting of oil wells drilling. The research results of the structure of the humic substances of peat and brown coals precipitated in different pH ranges from the standpoint of their ability to structure formation on the base of the rheological curves obtaining of the flow of their dispersions and determining of their rheological parameters in terms of their application in drilling practice are given in the article. It is established that during transition from fraction, beset into alkaline media (12.0–8.5) to fraction beset into acid media (5.0–2.0) the decrease of the rheological indicators of caustobiolate humic substance is occurred. Rheological curves of the flow of the disperse of caustobiolate humic substances of the fraction 1 and 2 are characterized for strong fossil structures, disperses of humic substances of the fraction 3 is for less strong coagulation structures. Less structured are humic substances of brown coal so that their use is preferable for the regulation of the structure and rheological peculiarities of drilling solutions.

Keywords: peat; brown coal; humic substances; fractioning; dispersion; structure creation; rheology; drilling solutions.

For citation. Lishtvan I. I., Aleinikova V. N. Rheological properties of humic substances of peat and brown coal. *Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 169–174.

Введение. В Республике Беларусь постоянно ведутся работы по разведке и разработке нефтяных месторождений. Наша страна заинтересована в освоении новых регионов добычи нефти и газа и развивает это направление во многих странах, что требует использования больших объемов буровых растворов и их стабилизаторов. Материалы на основе каустобиолитов являются перспективным сырьем для производства эффективных и экологобезопасных гуматных реагентов. Под гуматными реагентами понимают препараты, содержащие гуматы калия, натрия или аммония. Их используют для общего улучшения качества глинистых буровых растворов, главным образом, для снижения их вязкости, напряжения сдвига и водоотдачи. Основным действующим компонентом всех гуматных реагентов являются гуминовые вещества (ГВ), которые применяются в основном в буровой технике в качестве стабилизаторов и регуляторов структурно-механических и технологических свойств промывочных жидкостей. Именно наличие кислых функциональных групп, как карбоксильных, так и фенольных, придает ГВ способность к регулированию вязкости и предельного напряжения сдвига буровых растворов.

Для получения гуматных реагентов с заданными структурой и свойствами, а также управления технологическими параметрами обработанных ими буровых растворов важное значение имеет знание их структурно-реологических свойств, от которых зависит поведение буровых растворов в скважине (способность их выносить выбуренную породу на дневную поверхность, проявление или поглощение бурового раствора и др.), что дает возможность спрогнозировать режим бурения. Наиболее существенное влияние на реологические свойства системы оказывает взаимодействие частиц дисперсной фазы, которое препятствует их свободному переносу слоями движущейся жидкости, т. е. фиксирует взаимное положение частиц. Явление фиксации пространственного положения частиц за счет возникновения связей между ними называют «структурообразование дисперсных систем». Сами дисперсные системы, состоящие из взаимосвязанных частиц, называются структурированными [1]. Основная задача реологии растворов и дисперсий состоит в установлении взаимосвязи между силами, действующими на реальные дисперсные системы, и деформациями, вызываемыми этими силами [1–5]. При реологических исследованиях изучается зависимость между градиентом скорости течения $\dot{\epsilon}$ и напряжением сдвига P , которую графически изображают в виде кривых течения, по которым рассчитывают реологические параметры с использованием различных уравнений (Кэссона–Шульмана, Шведова–Бингама, Балкли–Гершеля и др.) [5].

Объекты и методы исследования. В качестве объектов исследования был выбран бурый уголь Житковичского месторождения с зольностью (A^c) 29,5 %, верховой пущевый торф месторождения «Радомье» (степень разложения (R) 45 %, $A^c = 4,7 \%$), низинный тростниковый торф месторождения «Житковичское» ($R = 20 \%$, $A^c = 7,3 \%$). Известно, что метод коллоидно-химического фракционирования ГВ путем ступенчатого понижения pH среды позволяет направленно осаждать фракции ГВ с повышенным содержанием либо алифатических фрагментов, либо конденсированных ароматических структур [6]. Однако еще не изучено, влияют ли данные различия в структуре фракций гуминовых веществ каустобиолитов, выделенных в различных диапазонах pH, на их реологические показатели: прочность пространственной структуры, пластическую вязкость, статический и динамический пределы текучести.

Поэтому было проведено фракционирование ГВ торфа и бурого угля следующим образом. На первом этапе выделялись ГВ путем их щелочной экстракции из сырья с последующим осаждением полученных препаратов. Повторность экстракции была трехкратной. Негидролизуемый осадок отделяли центрифугированием в течение 30 мин с частотой вращения ротора 3 000 об⁻¹. Полученный фугат объединяли. Далее реакцию среды фугата снижали соляной кислотой до pH 12,0, раствор выдерживали в течение 12 ч в закрытой емкости для установления равновесия. Разделение велось на центрифуге при параметрах, указанных выше. После отделения осадка процесс разделения фракций ГВ осуществляли согласно работе [7]. В результате фракционирования были получены три фракции в разных диапазонах pH среды: фракция 1 – pH осаждения 12,0–8,5; фракция 2 – pH осаждения 8,5–5,0; фракция 3 – pH осаждения 5,0–2,0. Полученные фракции ГВ имели повышенную зольность, которая обусловлена в первую очередь присутствием NaCl, поэтому их переводили в H-форму с помощью 0,05 н. раствора HCl. Из полученных фракций готовили 5%-ные дисперсии ГВ и измеряли их реологические характеристики. Измерение вязкости дисперсий проводили на ротационном вискозиметре Полимер «РПЭ-1М.3» с помощью системы воспринимающих элементов Т1-В1, которая обеспечивает следующие скорости сдвига: 0,3461; 0,6921; 1,384; 2,768; 5,537; 11,07; 22,15; 44,3; 88,59; 177,2; 354,4; 708,8.

По экспериментальным данным строили реологические кривые течения, которые разбивали на два участка: нелинейный и линейный. Для аппроксимации этих участков использовали уравнение Шведова–Бингама [2]. Определяли реологические характеристики: статический условный предел текучести P_{k1} , характеризующий прочность пространственной структуры и динамический условный пре-

дел текучести P_{k2} (динамическое предельное напряжение сдвига, отрезок на оси P , отсекаемый продолжением спрямленного участка реологической кривой). Затем рассчитывали наибольшую пластическую вязкость практически неразрушенной структуры и наименьшую пластическую вязкость по Бингаму (пластическая вязкость).

Влажность исходных образцов каустобиолитов и ГВ, которые выделены из них, определяли по ГОСТ 27314-91 «Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги», а зольность – по ГОСТ 11022-95 «Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности».

Результаты и их обсуждение. Известно, что процесс течения систем всегда осуществляется, по крайней мере, тремя ступенями. Так, при весьма малых напряжениях происходит перестройка в молекулярном строении дисперсионной среды системы, т. е. это первая ступень.

С повышением напряжения сдвига структурированных сред происходит перестройка в коагуляционных структурах первого рода. Естественно, что для начала течения структурированных систем необходимы уже большие напряжения, поскольку размер первичных агрегатов велик в сравнении с размером молекул полимера, т. е. мы имеем вторую ступень.

С дальнейшим ростом напряжения происходит перестройка в структуре самой системы. Образуются так называемые пространственные кинетические единицы, большие по размерам, чем первичные агрегаты, а это уже третья ступень, которую мы и наблюдаем.

Водные растворы ГВ можно рассматривать как полуколлоидно-высокомолекулярные системы типа полиэлектролитов с признаками микромозаичной гетерогенности [8]. ГВ в зависимости от степени диссоциации кислых и основных групп могут находиться в различных конформационных состояниях. Роль структурных элементов в дисперсиях ГВ выполняют различные ассоциаты. В процессе образования пространственных структур они определяют устойчивость агрегатов частиц [5]. Так, в стационарном состоянии дисперсии ГВ каустобиолитов структурированы. В статических условиях такие структуры равнопрочны во всем объеме. При наложении внешней силы, т. е. при течении, структура постепенно разрушается, начиная с наиболее слабых связей, а продукты разрушения и отдельные агрегаты ориентируются по направлению сдвигающей силы. При малых градиентах скорости медленное течение обеспечивает практически полное восстановление разрушенных связей. Дисперсии ГВ текут с постоянной наибольшей вязкостью, соответствующий на кривых начальному прямолинейному участку (рис. 1, 2).

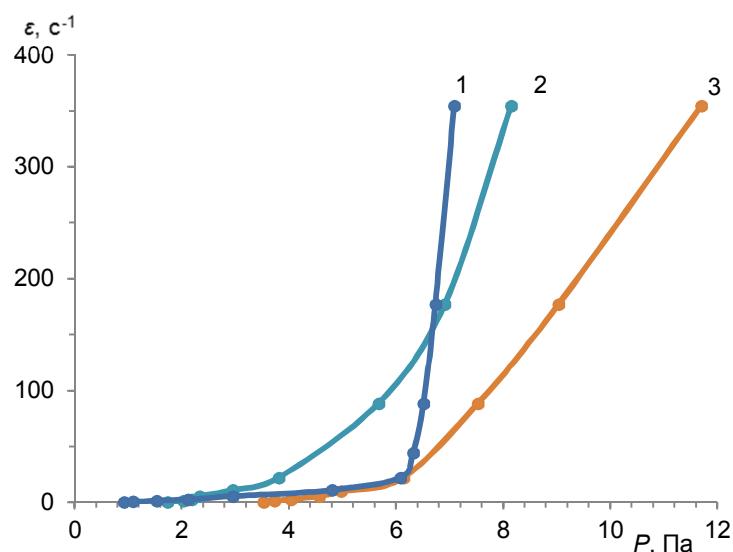


Рис. 1. Реологические кривые 5%-ных дисперсий фракций ГВ каустобиолитов, осажденных в диапазоне pH 12,0–8,5: 1 – ГВ бурого угля; 2 – ГВ верхового торфа; 3 – ГВ низинного торфа

Fig. 1. Rheological curves of 5 % disperse fractions of HS caustobiolates, set in diapason of pH 12.0–8.5: 1 – HS of brown coal; 2 – HS of upper peat; 3 – HS of lower peat

Начиная с некоторого давления P' , соответствующего условной границе практически неразрушенной структуры или пределу прочности структурных связей, когда прямолинейный участок S-образной кривой переходит в криволинейный, не все разрушенные связи успевают восстанавливаться. Прогрессивное разрушение дисперсий ГВ по мере роста давления непрерывно повышается. Однако прибор Полимер «РПЭ-1М.3» не дает возможности зафиксировать участок предельного раз-

рушения структуры, т. е. течение дисперсий с наименьшей ньютоновской вязкостью. Реологические кривые течения дисперсий ГВ каустобиолитов фракций 1 и 2 (см. рис. 1, 2) типичны для вязкопластических систем по Бингаму с высокими значениями динамического предела текучести и зависимостью эффективной вязкости от скорости сдвига, характерной для сильно структурированных дисперсий. Для дисперсий ГВ фракции 3 отсутствует характерно плавное убывание эффективной вязкости до вязкости практически предельно разрушенной структуры η_m в широком диапазоне напряжений сдвига без ярко выраженного предела текучести (рис. 3). Таким образом, полученные данные свидетельствуют, что мы имеем дело с малопрочными твердообразными структурами. Но, так как пределы текучести для фракции 3 ГВ каустобиолитов малы, упругие свойства связей, препятствующих молекулярному течению, тоже малы. В случае фракций 1 и 2 ГВ пределы текучести значительно больше, что указывает на заметные упругие свойства их коагуляционных структур. Соответственно этому, для начала течения необходимо преодолеть упругость связей как структурированных оболочек, так и структуры системы в целом.

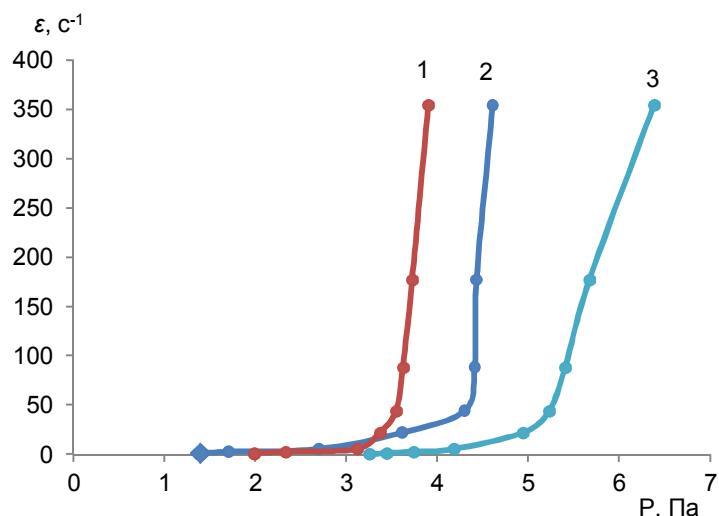


Рис. 2. Реологические кривые 5%-ных дисперсий фракций ГВ каустобиолитов, осажденных в диапазоне pH 8,5–5,0: 1 – ГВ бурого угля; 2 – ГВ верхового торфа; 3 – ГВ низинного торфа

Fig. 2. Rheological curves of 5 % disperse fractions of HS caustobiolates, beset in diapason of pH 8.5–5.0: 1 – HS of brown coal; 2 – HS of upper peat; 3 – HS of lower peat

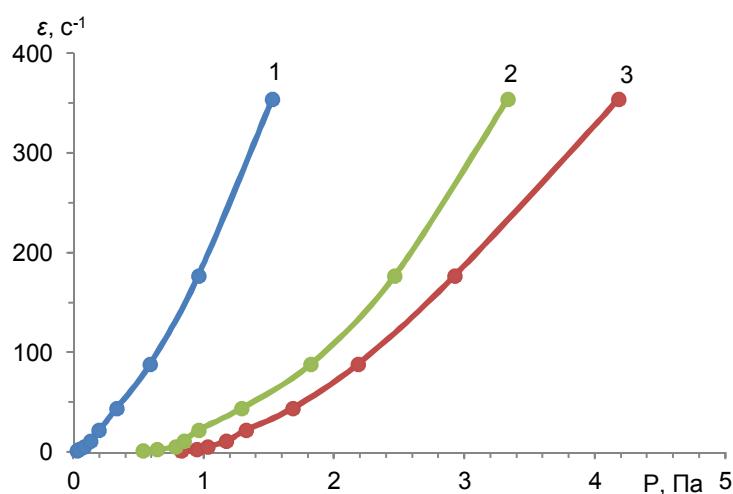


Рис. 3. Реологические кривые 5%-ных дисперсий фракций ГВ каустобиолитов, осажденных в диапазоне pH 5,0–2,0: 1 – ГВ бурого угля; 2 – ГВ верхового торфа; 3 – ГВ низинного торфа

Fig. 3. Rheological curves of 5 % disperse fractions of HS caustobiolates, beset in diapason of pH 5.0–2.0: 1 – HS of brown coal; 2 – HS of upper peat; 3 – HS of lower peat

Как видно из таблицы, в которой представлены данные по реологическим параметрам дисперсий ГВ каустобиолитов, все они различаются степенью развития и прочностью пространственных структур, которые зависят от природы ГВ, формы и компактности надмолекулярных агрегатов.

Вязкость образцов ГВ каустобиолитов, осажденных в различных диапазонах рН, между собой практически не отличается. Для ГВ низинного торфа при переходе от фракции 1 к фракции 3 наибольшая пластическая вязкость практически неразрушенной структуры изменяется от 0,28 до 0,15 Па·с, для ГВ верхового торфа – от 0,22 до 0,12, для ГВ бурого угля – от 0,34 до 0,09 Па·с. Прочность пространственной структуры дисперсий ГВ каустобиолитов фракции 1 практически сравнима с прочностью пространственной структуры их дисперсий для фракции 2, однако для фракции 3 значение данного параметра в 6 раз меньше для дисперсий ГВ верхового торфа и бурого угля и в 11 раз меньше для дисперсии ГВ низинного торфа.

Основные реологические параметры дисперсий ГВ каустобиолитов

The main rheological parameters of the disperse of HS of caustobiolites

Образец	Влажность, %	Зольность, %	Реологические параметры 5%-ных дисперсий				
			P_r , Па	P_{k1} , Па	P_{k2} , Па	η_0 , Па·с	η_m , мПа·с
12,0–8,5							
ГВ бурого угля	95,0	3,5	5,41	1,10	6,30	0,34	2,25
ГВ верхового торфа	95,0	1,8	3,82	1,65	5,70	0,22	7,0
ГВ низинного торфа	95,0	5,6	5,64	3,57	6,32	0,28	9,6
8,5–5,0							
ГВ бурого угля	95,0	6,2	3,12	1,08	3,52	0,20	1,12
ГВ верхового торфа	95,0	1,8	2,80	1,38	4,36	0,20	0,56
ГВ низинного торфа	95,0	3,0	4,21	3,22	5,05	0,20	3,44
5,0–2,0							
ГВ бурого угля	95,0	2,8	0,58	0,18	0,62	0,09	1,9
ГВ верхового торфа	95,0	1,5	0,80	0,29	1,70	0,12	3,3
ГВ низинного торфа	95,0	1,4	1,11	0,31	1,80	0,15	5,0

Полученные данные говорят о том, что структурные связи в ГВ фракции 3 слабы и данные дисперсии можно отнести к малопрочным твердообразным коагуляционным структурам. Это может происходить из-за увеличения доли ароматических фрагментов в ГВ фракции 3, а следовательно, увеличения компактности их агрегатов.

Заключение. Проведенные исследования реологических свойств ГВ каустобиолитов показали, что статический и динамический пределы текучести ГВ бурого угля ниже, чем у ГВ верхового и низинного торфа, что характерно для всех трех фракций. Так как буроугольные ГВ дают менее структурированные соединения, чем ГВ верхового и низинного типов торфа, следует отдать предпочтение их использованию в практике стабилизации глинистых суспензий: они будут работать в качестве эффективных понизителей как вязкости и предельного напряжения сдвига бурового раствора, так и его фильтрационных свойств.

Список использованных источников

- Бибик, Е. Е. Реология дисперсных систем / Е. Е. Бибик. – Л. : Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. – 172 с.
- Овчинников, П. Ф. Реология тиксотропных систем / П. Ф. Овчинников, Н. Н Круглицкий, Н. В. Михайлов. – Киев : Наукова думка, 1972. – 121 с.
- Ребиндер, П. А. Физико-химическая механика дисперсных структур / П. А. Ребиндер // Физико-химическая механика дисперсных структур. – М. : Наука, 1966. – С. 3–16.
- Косаревич, И. В. Сапропелевые буровые растворы / И. В. Косаревич, Н. Н. Битюков, В. Ш. Шмавонянц. – Минск : Наука и техника, 1987. – 191 с.
- Косаревич, И. В. Структурообразование в дисперсиях сапропелей / И. В. Косаревич. – Минск : Наука и техника, 1990. – 248 с.
- Гуминовые кислоты. Взаимодействие с ионами металлов, особенности структуры и свойств металлгуминовых комплексов / И. И. Лиштван [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. – 2006. – Т. 14, № 4. – С. 391–397.
- Спектральные исследования фракций гуминовых кислот / И. И. Лиштван [и др.] // Химия твердого топлива. – 2006. – № 4. – С. 3–11.

8. Лиштван, И. И. Физико-химическая механика гуминовых веществ / И. И. Лиштван, Н. Н. Круглицкий, Р. Ю. Третинник. – Минск : Наука и техника, 1976. – 264 с.

References

1. Bibik E. E. *Reologiya dispersnykh sistem* [Disperse systems rheology]. Leningrad, 1981, 172 p. (in Russian)
2. Ovchinnikov P. F., Kruglitsky N. N., Mikhailov N. V. *Reologiya tixotropnykh system* [Thixotropic systems rheology]. Kiev, 1972, 121 p. (in Russian)
3. Rebinder P. A. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika dispersnykh struktur* [Physical and chemical mechanics of disperse structures]. Moscow, 1966, pp. 3–16. (in Russian)
4. Kosarevich I. V., Bityukov N. N., Schmavonyants V. Sh. *Sapropelevye burovye rastvory* [Sapropel drilling substances]. Minsk, 1987, 191 p. (in Russian)
5. Kosarevich I. V. *Strukturoobrazovanie v dispersiyakh sapropeley* [Structure creation in sapropel disperses]. Minsk, 1990, 248 p. (in Russian)
6. Lishtvan I. I. [et al.]. *Guminovye kisloty. Vzaimodeystvie s ionami metallov, osobennosti struktury i svoystva metallguminovykh kompleksov* [Humic acids. Cooperation with metal ions, the peculiarities of the structure and features of metal-humic complexes]. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya = Chemistry for sustainable development*, 2006, no 4, pp. 391–397. (in Russian)
7. Lishtvan I. I. [et al.]. *Spektral'nye issledovaniya frakciy guminovykh kislot* [Spectral research of humic acids fractions]. *Khimiya tverdogo topliva = Solid Fuel Chemistry*, 2006, no 4, pp. 3–11. (in Russian)
8. Lishtvan I. I., Kruglickiy N. N., Tretinnik R. Yu. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika guminovykh veshchestv* [Physical and chemical mechanics of humic substances]. Minsk, 1976, 264 p. (in Russian)

Информация об авторах

Лиштван Иван Иванович – академик, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Алейникова Вера Николаевна – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: everan@tut.by

Information about the authors

Ivan I. Lishtvan – Academician, D. Sc. (Technical), Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Vera N. Aleinikova – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: everan@tut.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2021-1-175-186>

УДК 662.33:66.081.3:628.541

Поступила в редакцию 06.03.2021

Received 06.03.2021

СОРБЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ЩЕЛОЧЕНЕРАСТВОРИМЫХ КОМПОНЕНТОВ ТОРФА И БУРОГО УГЛЯ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Н. С. Першай, Ю. Г. Янuta

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. Проблема загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами актуальна для Республики Беларусь. Одним из способов удаления тяжелых металлов из сточных вод промышленных предприятий является очистка их с помощью сорбентов. Сорбенты на основе торфа и бурого угля являются эффективными и недорогими, однако их использование приводит ко вторичному загрязнению очищаемой среды водорастворимыми органическими соединениями. Показано, что разработанные сорбционные материалы на основе щелоченерастворимых компонентов (далее остатков) торфа и бурого угля сорбируют ионы тяжелых металлов (медь, никель, цинк) и не загрязняют очищаемую среду водорастворимыми органическими соединениями (величина ХПК сорбционных материалов не превышает 5 мг О₂/дм³). Установлено, что обменная емкость сорбционных материалов в кислой среде (при pH 2,0) выше, чем гуминовых кислот и находится в диапазоне 0,17–1,38 ммоль/г. Использование ультразвуковой обработки для повышения обменной емкости сорбционных материалов позволяет увеличить ее по ионам меди в 2,3–3,0 раза, по ионам цинка – в 2,2 раза, что обусловлено деструкцией крупных агрегатов. Полученные результаты легли в основу разработки технологии получения сорбционных материалов для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов.

Ключевые слова: сорбционные материалы; торф; бурый уголь; остаток; тяжелые металлы; водорастворимые органические вещества; ультразвуковая обработка.

Для цитирования. Першай Н. С., Янuta Ю. Г. Сорбционные материалы на основе щелоченерастворимых компонентов торфа и бурого угля для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 175–186.

SORPTION MATERIALS BASED ON ALKALI-INSOLUBLE COMPONENTS PEAT AND BROWN COAL FOR WASTEWATER TREATMENT FROM IONS OF HEAVY METAL

N. S. Pershay, Yu. G. Yanuta

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The problem of environmental pollution with heavy metals is relevant for the Republic of Belarus. One of the ways to remove heavy metals from industrial wastewater is to treat them with sorbents. Sorbents based on peat and brown coal are effective and inexpensive, but their use leads to secondary contamination of the treated environment with water-soluble organic compounds. It is shown that the developed sorption materials based on peat and brown coal residues sorb heavy metal ions (copper, nickel, zinc) and do not pollute the treated medium with water-soluble organic compounds (the COC value of sorption materials does not exceed 5 mg O₂/dm³). It was found that the exchange capacity of sorption materials in an acidic medium (pH 2.0) is higher than that of humic acids and is in the range of 0.17–1.38 mmol/g. The use of ultrasonic treatment to increase the exchange capacity of sorption materials makes it possible to increase it by 2.3–3.0 times for copper ions and 2.2 times for zinc ions, which is due to the destruction of large aggregates. The obtained results formed the basis for the development of a technology for obtaining sorption materials for wastewater treatment from heavy metal ions.

Keywords: sorption materials; peat; brown coal; residue; heavy metals; water-soluble organic substances; ultrasonic treatment.

For citation. Pershay N. S., Yanuta Yu. G. Sorption materials based on alkali-insoluble components of peat and brown coal for wastewater treatment from ions of heavy metal. *Nature Management*, 2021, no 1, pp. 175–186.

Введение. В Республике Беларусь в настоящее время функционирует более 240 предприятий машино- и приборостроения, радиоэлектроники, металлургии, в составе промышленных сточных вод которых содержатся катионы тяжелых металлов. Большинство технологий очистки сточных вод от

тяжелых металлов перед сбросом в сети канализации не обеспечивают требуемой степени очистки и/или приводят к образованию осадков, относящихся к опасным отходам, проблема использования которых стоит достаточно остро. В свою очередь, сброс в канализацию сточных вод, содержащих ионы тяжелых металлов, приводит к накоплению металлов в осадках очистных сооружений. Это является одной из главных причин, сдерживающих использование данного отхода в качестве сырья. Следует отметить, что ряд тяжелых металлов (Cu, Zn, Co, Cr, Mo, Ni,) относится к микроэлементам, необходимым для протекания жизненно важных процессов в живых организмах. Именно селективное извлечение открывает перспективы для их последующего повторного использования.

С целью удаления тяжелых металлов из водной среды разработан ряд эффективных методов. Одним из таких является сорбционный метод. В качестве сорбентов применяют материалы как природного, так и синтетического происхождения. Известны работы по использованию торфа и продуктов его переработки для этих целей. Преимуществом по сравнению с другими сорбентами является возможность использования отработанного материала в качестве микроэлементной добавки. Несмотря на значительные достижения в данной области, применение таких сорбционных материалов сдерживается рядом факторов, среди которых:

- невысокая сорбционная активность сорбентов на основе торфа;
- высокое влияние сорбционной активности от реакции среды;
- наличие вторичного загрязнения очищенной воды водорастворимыми органическими соединениями.

Цель работы – изучить сорбционные свойства остатков торфа, бурого угля как сырья для получения сорбентов ионов тяжелых металлов.

Объекты и методы исследования. В качестве объектов были выбраны остатки торфа и бурого угля. Сырьем для их получения являлись: древесно-тростниковый торф месторождения Ореховский мох зольностью 8,4 % и степенью разложения 35–40 %; сосново-пушицевый торф Островского месторождения зольностью 2,2 % и степенью разложения 40–45 %; бурый уголь Бриневского месторождения марки Б1 зольностью 19,6 %. В качестве объекта сравнения использовали гуминовые кислоты (ГК), выделенные из исходного сырья.

ГК и остатки торфа и бурого угля извлекали путем щелочной обработки NaOH исходного сырья с последующим отделением остатка от жидкой фракции центрифугированием. Из фугата ГК выделяли путем понижения реакции сред до pH 2,0 с последующим разделением путем центрифугирования. Полученный осадок ГК переводили в H-форму путем обработки 0,1 М раствором HCl.

СМ получали последовательной промывкой остатка водой и 0,1 М раствором HCl, а затем ультразвуковой обработкой на установке ИЛ 100-6/1 с пьезоэлектрическим излучателем.

Групповой анализ образцов проводили по методу Инсторфа [1]. Содержание карбоксильных и суммарное содержание функциональных групп определяли согласно работе [2].

Элементный состав образцов определяли методом пиролиза на C, H, N, O, S – анализаторе VARIOEL III-ELEMENTAR. ИК-спектры регистрировали на спектрофотометре с преобразованием Фурье IR Prestige-21.

Определение удельного содержания (q_i) функциональных групп осуществляли по дифференциальным кривым, которые получали методом потенциометрического титрования согласно методике [3]. Степень диссоциации функциональных групп (pK_a) рассчитывали по уравнению Гендерсона–Гессельбаха [4, 5].

Микрофотографии образцов СМ получали на световом микроскопе Optec BK 5000 с цифровой камерой Optec (Китай) в диапазоне увеличений 40–100 раз.

Определение содержания катионов тяжелых металлов (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+}) в растворе до и после сорбции определяли титrimетрическим методом [6].

Объемный коэффициент распределения (K_d), характеризующий избирательность процесса сорбции, рассчитывали по формуле [7]:

$$K_d = \frac{C_m}{C_m^p},$$

где C_m – концентрация ТМ, сорбированного образцом, ммоль/г; C_m^p – равновесная концентрация ТМ в растворе, ммоль/дм³.

Оценку содержания водорастворимых органических соединений в водных средах осуществляли с использованием таких показателей, как:

- химическое потребление кислорода (ХПК) [8];
- оптическая плотность раствора (D) при длине волн 440 нм на КФК 2 с использованием кюветы с длиной оптического пути 10 мм.

Для количественного описания ультразвуковой деструкции использовали величину акустической энергии Q, которая определяется выражением [9]:

$$Q = \frac{ISt}{Vc},$$

где Q – акустическая энергия ультразвука, Вт/г сухого вещества; I – интенсивность ультразвуковых колебаний, Вт/см²; S – площадь дна реакционного сосуда, см²; t – продолжительность воздействия, с; V – объем материала, см³; c – концентрация материала (в пересчете на абс. сух.), г/см³.

Величина Q представляет собой количество энергии, действующей на единицу массы сорбционных материалов.

Результаты и их обсуждение. Остаток торфа и бурого угля представляет собой сложную многокомпонентную систему, состоящую из органической, минеральной и органоминеральной частей. Преобладающими компонентами органической части остатка, на долю которых приходится от 40 до 60 %, являются трудногидролизуемые вещества (ТГВ) и негидролизуемый остаток (НГО), 6–8 % приходится на битумную составляющую и остальные 28,4–49,7 % составляют гуминовые, водорастворимые (ВРВ) и легкогидролизуемые (ЛГВ) вещества (табл. 1).

Таблица 1. Компонентный состав органической части остатка торфа и бурого угля

Table 1. Component composition of the organic part of the peat and brown coal residue

Сырье	Компонентный состав остатка, %						
	Битумы	ВРВ и ЛГВ	Гуминовые вещества			ТГВ	НГО
			всего	в том числе			
Сосново-пушицевый торф	7,9	13,7	17,1	14,7	2,4	18,1	43,2
Древесно-тростниковый торф	6,4	26,7	23,0	19,9	3,1	9,3	34,6
Бурый уголь	6,8	–	28,4	24,5	3,9	–	64,8

Более высокое содержание ГК в остатке древесно-тростникового торфа по сравнению с сосново-пушицевым объясняется тем, что часть ГК торфа низинного типа в виде нерастворимых гуматов накапливается в полостях разлагающихся клеток растений [10].

Значительная доля гуминовых веществ, ВРВ и ЛГВ в остатке связана с тем, что обработка сырья раствором NaOH при комнатной температуре приводит к неполному их выделению из исходного сырья. Установлено, что до 20 % гуминовых веществ, ВРВ и ЛГВ остается в дисперсионной среде остатка. Экспериментально подтверждено, что их однократная промывка позволяет отделить 17,1 % органической массы, двукратная – 3,3 %, трехкратная – 10,6, четырехкратная – 8,7 %. Промывка остатка также позволяет перевести функциональные группы в Н-форму, получив СМ, свойства которых рассмотрены далее.

В табл. 2 представлены данные элементного анализа органической части СМ.

Отношение H/C характеризует содержание в органической массе макромолекул ненасыщенных фрагментов, O/C – содержание кислородсодержащих функциональных групп. Более низкие по сравнению с ГК (см. табл. 2) значения H/C для СМ на основе остатка свидетельствуют об увеличении степени конденсированности и снижении количества алифатических фрагментов в макромолекулах СМ. Это подтверждают и результаты ИК-спектроскопии. Так, отношение интенсивности полосы валентных колебаний сопряженных углеродных двойных связей (1610 cm^{-1}) к интенсивности полос валентных колебаний CH_2 - и CH_3 -групп для ГК выше, чем для СМ в 2,2–5,0 раз, что свидетельствует о значительном превышении у ГК алифатической составляющей над ароматической.

Величина O/C также уменьшается для СМ по сравнению с ГК (см. табл. 2), что связано со снижением содержания функциональных групп, что подтверждается элементным составом. Так, содержание COOH-групп в СМ меньше в 2,0 раза, а OH-групп – в 1,2–2,4 раза по сравнению с ГК (табл. 3).

Для расчета константы диссоциации функциональных групп СМ и ГК, способных вступать в ионный обмен, использовали метод дифференциального потенциометрического титрования. На рис. 1 приведены данные по удельному содержанию (q_i) функциональной группы с определенным значением константы ее диссоциации (pK_a) для ГК и СМ из различного исходного сырья.

Спектры констант диссоциации функциональных групп ГК содержат по 5 пиков, СМ – 6, которые можно условно поделить на три группы: сильно- (pK_a 2,5–5,0), средне- (pK_a 5,0–9,0) и слабокислые (pK_a 9,0–12,0). Наиболее интенсивные во всех спектрах – пики, отвечающие областям pK_a 2,5–3,0. Наличие одного типа функциональных групп с несколькими значениями pK_a обусловлено различным

расположением их в макромолекуле. Преобладают функциональные группы, константы диссоциации которых находятся в диапазоне, отвечающем областям с pK_a 2,5–3,0, что соотносят с карбоксильными группами [11]. Выявлено, что на их долю приходится более 50 % от всех ионизированных кислых групп. В СМ имеются два типа различных по силе карбоксильных групп (pK_a 2,5 и pK_a 2,9) в равных долях; при этом суммарное содержание COOH-групп также составляет 50–65 % от общего числа ионизированных функциональных групп.

Таблица 2. Элементный состав и относительная интенсивность полос поглощения сорбционных материалов и гуминовых кислот торфа и бурого угля

Table 2. Elemental composition and relative intensity of absorption bands of sorption materials and humic acids of peat and brown coal

Образец	Сырье	Элементный состав, мас.%					Атомные отношения		Относительная интенсивность полос поглощения	
		C	H	N	O	S	H/C	O/C	D_{1720}	D_{1720}
									$D_{2920,2850}$	$D_{2920,2850}$
СМ	Сосново-пушицевый торф	55,0	6,1	1,0	37,7	0,2	1,33	0,52	1,2	1,3
	Древесно-тростниковый торф	56,6	5,4	3,7	34,0	0,3	1,14	0,45	1,4	2,3
	Бурый уголь	64,2	5,4	0,6	29,2	0,6	1,01	0,34	1,7	2,4
ГК	Сосново-пушицевый торф	53,4	6,2	0,5	39,8	0,1	1,39	0,56	2,2	6,5
	Древесно-тростниковый торф	52,6	5,5	2,8	38,9	0,1	1,26	0,55	1,2	8,2
	Бурый уголь	61,2	5,4	0,2	32,7	0,1	1,06	0,40	5,5	6,6

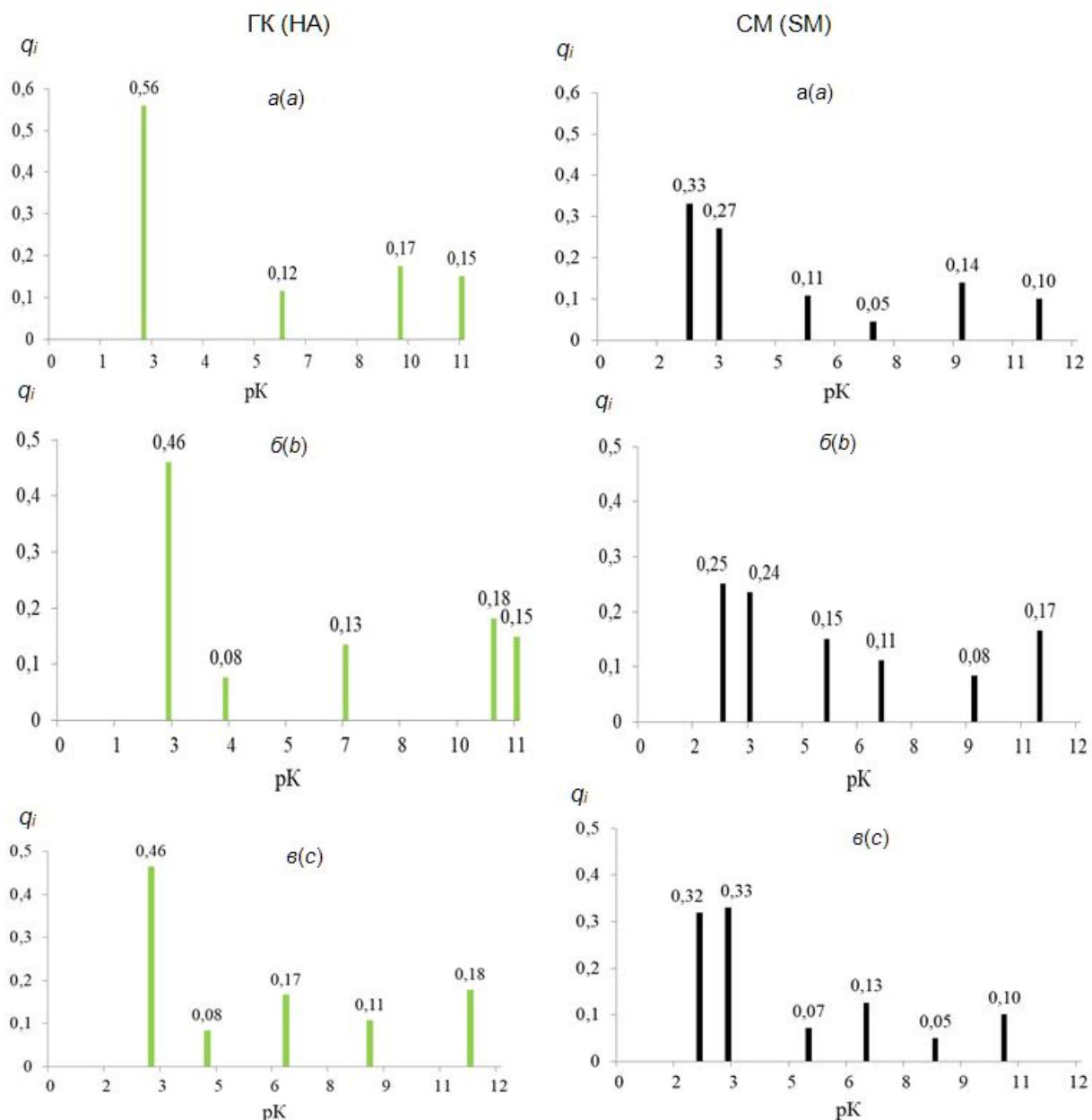
Таблица 3. Сравнительные характеристики сорбционных свойств образцов

Table 3. Comparative characteristics of the sorption properties of samples

Характеристика		ГК			СМ		
		бурый уголь	торф		бурый уголь	торф	
			сосново-пушицевый	древесно-тростниковый		сосново-пушицевый	древесно-тростниковый
Содержание групп, ммоль/г	COOH	2,4	2,9	1,3	1,0	1,5	0,6
	OH	3,4	2,1	1,9	2,8	0,8	1,4
СОЕ, ммоль/г рН 2,0	Cu	0,35	0,53	0,21	0,74	1,38	0,43
	Ni	0,18	0,25	0,11	0,67	1,20	0,31
	Zn	0,15	0,22	0,10	0,55	0,55	0,17
ХПК фугата, мг О ₂ /дм ³		14,6	17,6	14,6	<5,0	<5,0	<5,0
СОЕ, ммоль/г рН 7,0	Cu	2,12	2,59	1,08	0,85	1,45	0,57
	Ni	1,10	1,23	0,60	0,76	1,34	0,49
	Zn	1,05	1,08	0,55	0,62	0,75	0,37
ХПК фугата, мг О ₂ /дм ³		17,6	19,0	17,6	< 5,0	< 5,0	< 5,0

П р и м е ч а н и е. Диапазон определения ХПК по методике составляет 5–50 мг О₂/дм³.

Удельное содержание слабокислых групп с pK_a более 9,0 в ГК выше и составляет около 30 % для торфяных ГК, 18 % – для буроугольных, которые относятся к OH-группам, связанным с алифатическим и ароматическим радикалом. Для СМ удельное содержание фенольных групп ниже и составляет для торфяных 20–24 %, для буроугольных – 10 %.



**Рис. 1. pK_a -спектры гуминовых кислот (первый столбец) и сорбционных материалов (второй столбец) торфа и бурого угля:
а – сосново-пушицевый торф; б – древесно-тростниковый торф; в – бурый уголь**

Fig. 1. pK_a -spectra of humic acids (first column) and sorption materials (second column) of peat and brown coal: a – pine-fluff peat; b – wood-reed peat; c – brown coal

Возникновение пиков в области pK_a 5,5–9,0 может быть связано с наличием дополнительных центров, причем эти пики для всех образцов выражены в меньшей степени, а относительная доля таких центров составляет от 13 до 28 %.

В целом, рассчитанные константы диссоциации функциональных групп СМ, как и ГК, подтверждают их полифункциональность.

Статическая обменная емкость (СОЕ) сорбционных материалов зависит от сорбируемого катиона и pH среды. Экспериментально установлено, что величина СОЕ как СМ, так и ГК в зависимости от иона уменьшается в ряду Cu – Ni – Zn (диапазон исходных концентраций ионов металлов в растворе составлял 0,002–0,04 М). Полученные значения СОЕ коррелируют с содержанием COOH-групп в сорбционных материалах (табл. 3).

Рассчитанные K_d для СМ из остатков торфа и бурого угля отличаются в зависимости от сорбируемого иона (Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+}). Зависимость коэффициента распределения от концентрации иона в растворе описывается степенной функцией для СМ из остатков бурого угля и древесно-тростникового торфа. Отличие значений K_d для различных ионов можно объяснить избирательностью сорбции того или иного иона сорбционным материалом. Так, ионы Cu^{2+} и Ni^{2+} лучше сорбируются на поверхности СМ ($R^2 = 1,0$), избирательность же сорбции ионов Zn^{2+} выражена менее ($R^2 = 0,9$). Снижение K_d для СМ сосново-пушицевого торфа при pH 7,0 по ионам Cu^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} описывается степенной зависимостью ($R^2 = 0,90\text{--}0,98$), при pH 2,0 для всех ионов зависимость имеет более сложный характер ($R^2 = 0,98\text{--}1,0$).

Изменение вида кривой связано с протеканием нескольких механизмов сорбции. Известно, что ионы переходных металлов вступают во взаимодействие преимущественно по типу комплексообразования. В данном случае для СМ сосново-пушицевого торфа перегиб на кривой может свидетельствовать о присутствии не только комплексообразования, но и механизма ионного обмена (рис. 2).

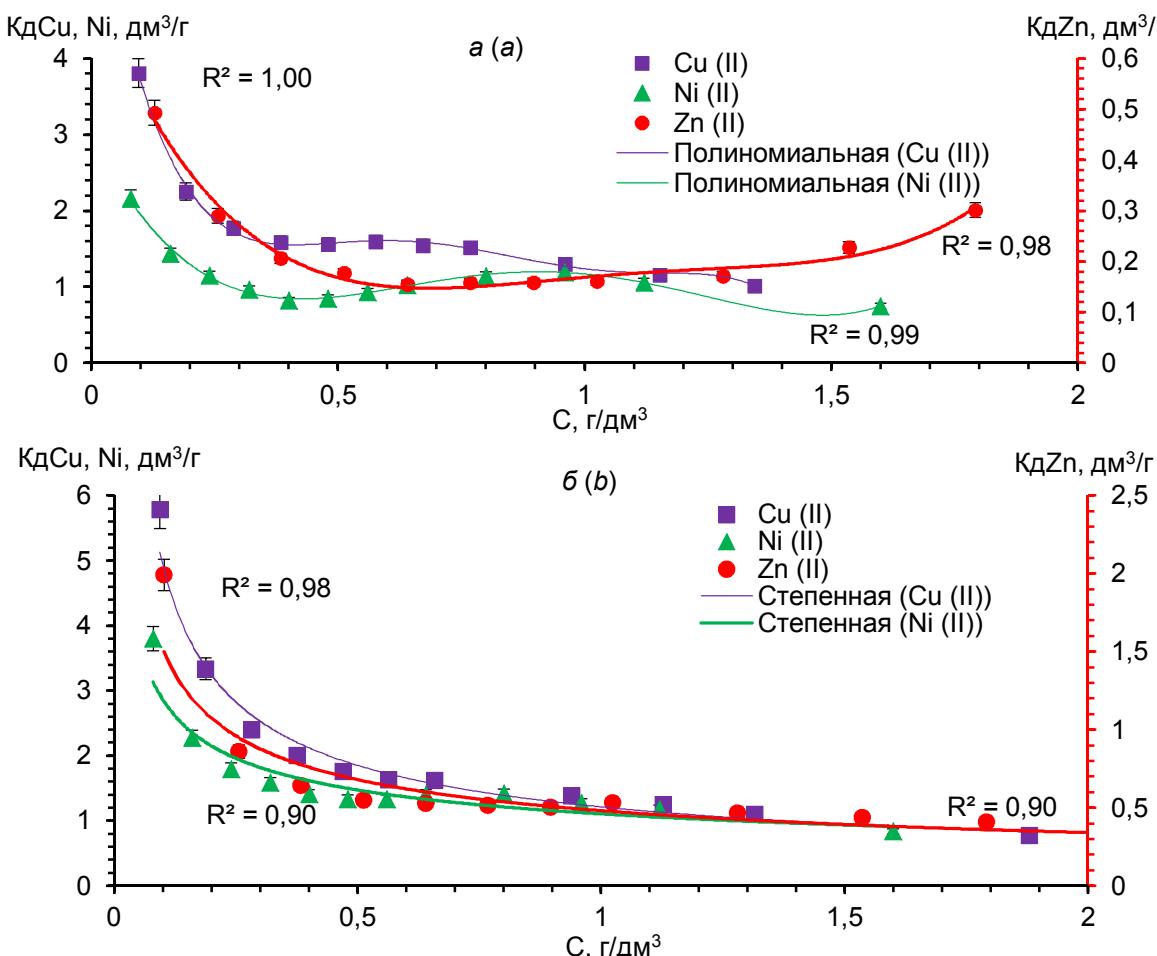


Рис. 2. K_d сорбционных материалов на основе остатка сосново-пушицевого торфа: а – pH 2,0; б – pH 7,0

Fig. 2. K_d of sorption materials based on the residue of pine-fluff peat: a – pH 2.0; b – pH 7.0

Соотнося полученные результаты (рис. 2) с данными р K_a -спектров (рис. 1), можно сделать вывод о том, что протекание нескольких механизмов взаимодействия связано с полифункциональностью ГК и СМ, а также с различной жесткостью каркаса.

Рост обменной емкости СМ с увеличением pH среды (табл. 3) обусловлен ионизацией функциональных групп за счет трансформации структуры макромолекулы СМ, что в свою очередь повышает способность этих групп вступать в обмен с ионами металлов.

Величина ХПК очищаемой среды после использования сорбционных материалов на основе остатков торфа и бурого угля не превышает 5 мг О₂/дм³ и более чем в 3 раза ниже, чем при применении ГК (табл. 3), что подтверждает отсутствие загрязнения очищаемой среды водорастворимыми ор-

ганическими соединениями при использовании СМ. Это связано с удалением лабильной составляющей гуминовых веществ в процессе получения СМ.

Значение СОЕ при pH 2,0 для СМ на основе остатков в 2,5 раза выше, чем для ГК (табл. 3). Полученные результаты согласуются с результатами ИК-спектроскопии (табл. 4): на ИК-спектрах СМ наблюдается снижение интенсивности полос поглощения валентных колебаний свободных карбоксильных групп (с 0,39 до 0,31) по сравнению с ГК (с 0,65 до 0,64).

Таблица 4. Относительная интенсивность полос поглощения сорбционных материалов, гуминовых кислот сосново-пушицевого торфа и их комплексов с Cu²⁺

Table 4. Relative intensity of absorption bands of sorption materials, humic acids of pine-fluff peat and their complexes with Cu²⁺

Образец	Относительная интенсивность полос поглощения	
	$\frac{D_{1610}}{D_{2850, 2920}}$	$\frac{D_{1720}}{D_{2850, 2920}}$
СМ, исходный	0,42	0,39
СМ-Cu, pH 2	1,07	0,31
СМ-Cu, pH 7	1,32	0,07
ГК, исходные	0,45	0,65
ГК-Cu, pH 2	0,64	0,64
ГК-Cu, pH 7	0,96	0,39

Низкие значения СОЕ при pH 2,0 для ГК (0,22–0,53 ммоль/г) обусловлены тем, что при условиях опыта происходит трансформация их структуры в более компактные агрегаты, что затрудняет доступ иона к сорбционно-активным функциональным группам внутри материала. Более высокие значения СОЕ при тех же условиях для СМ на основе остатков (0,55–1,38 ммоль/г) объясняются прежде всего тем, что структура их макромолекул более конденсированная, жесткая за счет наличия минеральной составляющей и связей Si–C, а также ароматических конденсированных структур. Наличие такой структуры макромолекул СМ позволяет функциональным группам при pH 2,0 оставаться на поверхности и быть доступными для взаимодействия.

Для увеличения обменной емкости СМ на основе остатков торфа и бурого угля проводили обработку их ультразвуком (УЗО). Такая обработка приводит к изменению дисперсности СМ, о чем можно судить по порогу структурообразования (табл. 5).

Таблица 5. Значения порога структурообразования СМ до и после ультразвуковой обработки

Table 5. Values of the CM structure formation threshold before and after ultrasonic treatment

Параметр обработки			Температура суспензии, °C	Порог структурообразования, ммоль CaCl ₂ /дм ³ СМ ммоль CaCl ₂ /г СМ	Высота слоя осадка, мм
Мощность УЗО, кВт/дм ³	Время, с	Акустическая энергия, кДж/г			
Без обработки			21,9	$\frac{175}{8,8}$	48
3,15	60	202,1	23,8	$\frac{200}{10,0}$	80
	120	404,2	25,3	$\frac{225}{11,3}$	80
6,3	60	404,2	29,3	$\frac{375}{18,8}$	85
	120	808,5	30,7	$\frac{300}{15,0}$	74

Исследование влияния величины акустической энергии (Q) (мощность УЗО 3,15; 6,3 кВт/дм³, время – от 0 до 600 с) на значение порога структурообразования СМ позволило установить диапазон, в котором наиболее эффективно происходит разрушение агломератов, – от 200 до 810 кДж/г. Воздействие ультразвука с величиной акустической энергии Q менее 200 кДж/г не существенно влияет на величину порога структурообразования СМ, а УЗО с величиной Q от 810 до 1200 кДж/г приводит к падению величины порога структурообразования на 20 % и повышению энергозатрат. Повышение мощности ультразвукового воздействия на 50 % и снижение времени воздействия

в 2,0 раза (величина Q остается постоянной – 404 кДж/г) приводит к скачку величины порога структурообразования в 1,8 раза.

Величина порога структурообразования после УЗО СМ из остатков сосново-пушицевого торфа (см. табл. 5) выросла в 1,1–2,0 раза – с 200 до 375 ммоль $\text{CaCl}_2/\text{дм}^3$ СМ, что обусловлено увеличением степени деструкции их частиц и согласуется с результатами микроскопии (рис. 3).

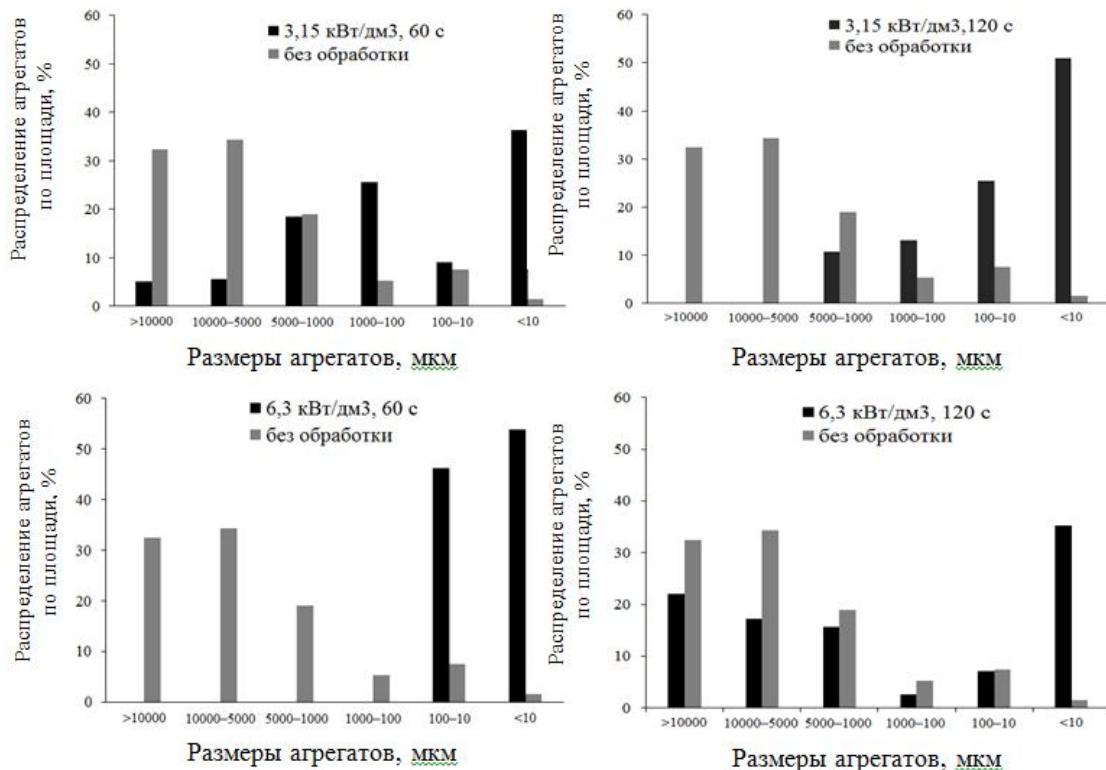


Рис. 3. Распределение агрегатов сорбционных материалов на основе остатков сосново-пушицевого торфа до и после ультразвуковой обработки

Fig. 3. Distribution of aggregates of sorption materials based on pine-fluff peat residues before and after ultrasonic treatment

Установлено (см. рис. 3), что УЗО приводит к снижению полифракционности СМ за счет роста содержания агрегатов размером менее 100 мкм. Размеры их агрегатов при одинаковых условиях обработки снижаются в ряду сосново-пушицевый торф – древесно-тростниковый торф – бурый уголь (рис. 4). Обработка ультразвуком приводит как к деструкции агрегатов СМ (максимальное разрушение фиксируется при мощности УЗО 6,3 кВт/дм³, времени 60 с, величине акустической энергии 400 кДж/г), так и к их агломерации. При максимальном разрушении в торфяных СМ присутствуют агрегаты размером 10–100 мкм (22 %) и менее 10 мкм (78 %). Следует отметить, что структура органической части буроугольных СМ более компактная, менее разветвленная. Данные распределения агрегатов по площади СМ (рис. 4) также свидетельствуют об уменьшении их размеров буроугольных СМ по отношению к торфяным. Так, в СМ сосново-пушицевого торфа основную площадь (65,5 %) составляют агрегаты размером более 5 000 мкм, древесно-тростникового – уже преобладают агрегаты размером 100–1 000 мкм (на их долю приходится 44,4 %), а в буроугольных – максимальный пик распределения агрегатов по площади (33,4 %) приходится на частицы размером 10–100 мкм.

В СМ древесно-тростникового торфа и бурого угля (см. рис. 4), как и в случае СМ сосново-пушицевого торфа (см. рис. 3), после УЗО (3,15 кВт/дм³, 120 с) полностью исчезают частицы размером более 5 000 мкм. Наиболее сильный эффект воздействия УЗО наблюдается для СМ сосново-пушицевого торфа. Так, в них доля агрегатов (менее 10 мкм) увеличивается на 40,0 %. При этом они занимают 50,9 % от всей площади СМ. В СМ древесно-тростникового торфа после УЗО на долю агрегатов менее 10 мкм приходится 70,6 %, что на 5,4 % больше, чем до обработки. Однако занимаемая данными агрегатами площадь (менее 10 мкм) составляет всего 28,3 %. Остальная площадь практически в равных долях распределилась между агрегатами в диапазонах 10–100 мкм (24,9 %), 100–1 000 мкм (28,8) и 1000–5000 мкм (16,3 %).

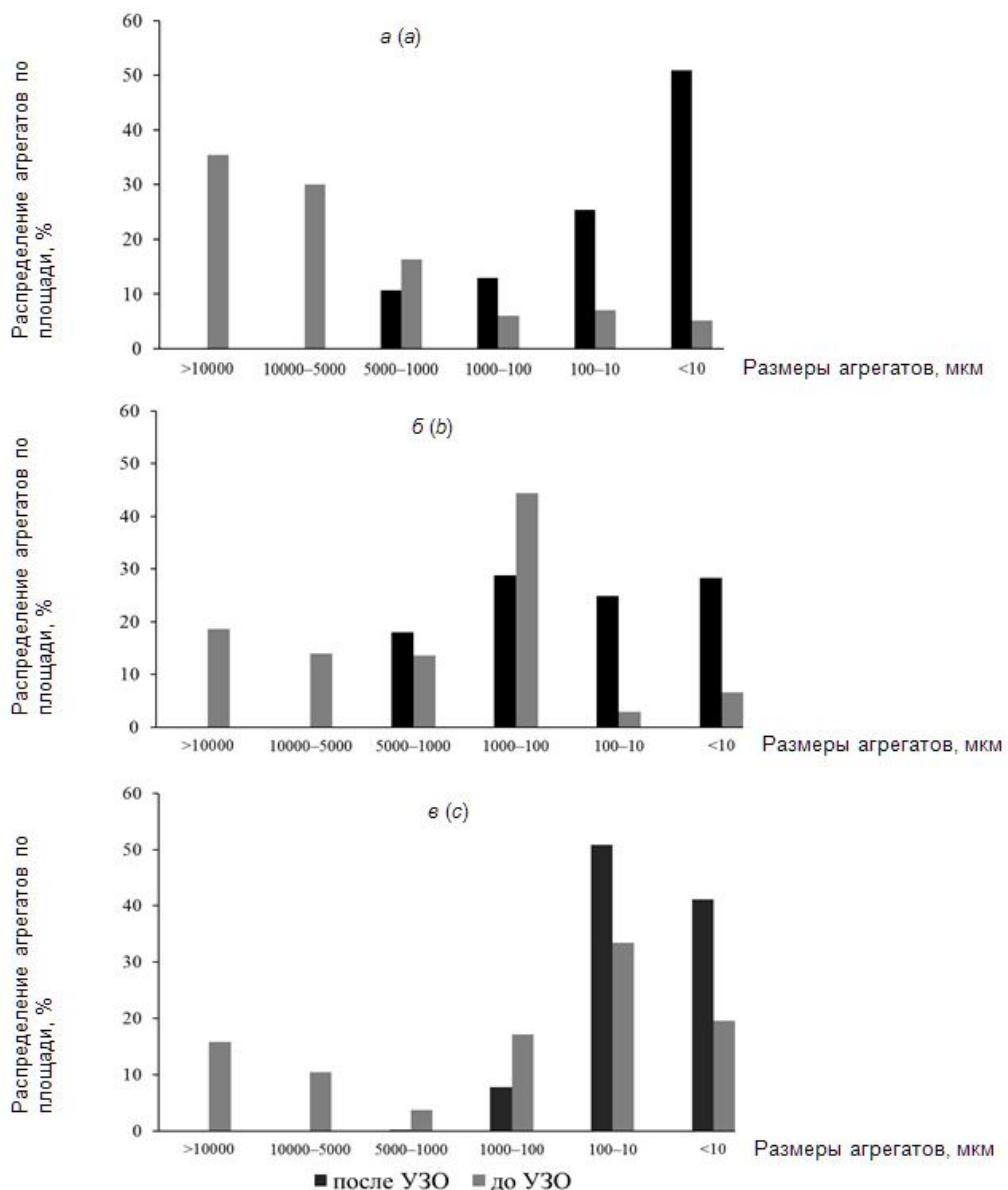


Рис. 4. Распределение агрегатов сорбционных материалов до и после ультразвуковой обработки (мощность УЗО – 3,15 кВт/дм³, время – 120 с) в зависимости от исходного сырья:
а – сосново-пушицевый торф; б – древесно-тростниковый торф; в – бурый уголь

Fig. 4. Distribution of aggregates of sorption materials based on pine-fluff peat residues before and after ultrasonic treatment (RCD power – 3.15 kW / dm³, time – 120 s) depending on the feedstock:
a – pine-fluff peat; b – wood-reed peat; c – brown coal

В буругольных СМ после УЗО преимущественно находятся агрегаты размером 10–100 мкм (46,3 %) и менее 10 мкм (48,8 %). Занимаемая данными агрегатами площадь суммарно составила 92,0 %. Остальная площадь (8,0 %) занята агрегатами размером 100–1000 мкм (7,8 %) и 1000–5000 мкм (0,2 %).

Таким образом, воздействие УЗО на сорбционные материалы оказывает диспергирующее действие, что в конечном итоге приводит к увеличению поверхности СМ и эффективности их сорбирующего действия по отношению к исследуемым ионам тяжелых металлов.

Данные ИК-спектроскопии СМ до и после УЗО показали незначительное изменение интенсивности поглощения (в пределах погрешности) в области 1610 и 1720 см⁻¹. Полученные данные свидетельствуют о том, что в результате ультразвукового воздействия в СМ не протекают окислительно-гидролитические процессы, а увеличение содержания в СМ после УЗО количества функциональных групп (табл. 4) связано с разрушением агломератов при воздействии ультразвука.

Таблица 4. Содержание функциональных групп и СОЕ сорбционных материалов после воздействия ультразвука**Table 4. Content of functional groups and SEC of sorption materials after exposure to ultrasound**

Исходное сырье	Параметр обработки			Содержание групп, ммоль/г		СОЕ, ммоль/г	
	Мощность УЗО, кВт/дм ³	Время, с	Акустическая энергия, кДж/г	COOH	COOH + OH	Cu ²⁺	Zn ²⁺
Торф сосново-пушицевый	Без обработки			1,5	2,3	1,45	0,75
	3,15	60	202,1	1,8	2,4	2,98	0,90
		120	404,2	1,6	2,6	3,31	1,29
	6,3	60	404,2	1,6	2,7	3,51	1,57
		120	808,5	2,0	3,0	3,11	1,32
Бурый уголь	Без обработки			1,0	5,3	0,85	0,62
	3,15	60	202,1	1,3	4,4	2,42	0,82
		120	404,2	1,1	6,6	2,56	1,24
	6,3	60	404,2	1,0	7,0	2,75	1,36
		120	808,5	1,4	6,8	2,26	1,24

Выявлено, что УЗО приводит к увеличению обменной емкости торфяных СМ в 2,3 раза, буроугольных – в 3,0 раза по отношению к ионам Cu²⁺ в нейтральной среде (pH 7,0); по отношению же к ионам Zn²⁺ СОЕ увеличилось в 2,2 раза. Рост обменной емкости СМ под действием ультразвука связан с увеличением их условной удельной поверхности за счет деструкции крупных агрегатов, что подтверждается результатами микроскопии, и, как следствие, приводит к доступности карбоксильных групп (см. табл. 4). Воздействие ультразвука в течение 60 с мощностью излучения 6,3 кВт/дм³ на СМ из остатков торфа и бурого угля позволяет увеличить их обменную емкость при pH 7,0 более чем в 2,0 раза.

Полученные результаты были положены в основу разработки технологии получения сорбционных материалов на основе остатков торфа и бурого угля [12].

Выводы.

1. Установлено, что органическая часть остатков торфа представлена трудногидролизуемыми веществами и «лигнином» (40,0–60,0 %), битумами (6–8), гуминовыми, водорастворимыми и легко-гидролизуемыми веществами (28,4–49,7 %). Выявлено, что до 20 % гуминовых, водорастворимых и легкогидролизуемых веществ остается в дисперсионной среде остатка. Экспериментально подтверждено, что их однократная промывка позволяет отделить 17,1 % органической массы, двукратная – 3,3, трехкратная – 10,6, четырехкратная – 8,7 %.

2. По данным элементного анализа и ИК-спектроскопии установлено, что для сорбционных материалов на основе остатка по сравнению с гуминовыми кислотами характерны увеличение степени конденсированности и снижение количества алифатических фрагментов.

3. Установлено, что спектры констант диссоциации функциональных групп гуминовых кислот содержат по 5 пиков, сорбционных материалов – 6. Выявлено, что на их долю приходится более 50 % от всех ионизированных кислых групп. В сорбционных материалах имеются два типа различных по силе карбоксильных групп (pK_a 2,5 и pK_a 2,9) в равных долях; при этом суммарное содержание COOH-групп также составляет 50–65 % от общего числа ионизированных функциональных групп.

4. Статическая обменная емкость сорбционных материалов на основе остатков торфа и бурого угля зависит от pH и снижается в ряду медь – никель – цинк.

5. Рассчитанные константы диссоциации для сорбционных материалов отличаются в зависимости от сорбируемого иона, что можно объяснить избирательностью сорбции. Так, ионы Cu²⁺ и Ni²⁺ лучше сорбируются на поверхности, избирательность же сорбции ионов Zn²⁺ выражена слабее.

Для сорбционных материалов из остатков сосново-пушицевого торфа при pH 2,0 для всех ионов зависимость изменения константы диссоциации имела более сложный характер, что связано с протеканием нескольких механизмов сорбции. В данном случае для сорбционных материалов из остатков сосново-пушицевого торфа перегиб на кривой может свидетельствовать о присутствии не только комплексообразования, но и механизма ионного.

6. Установлено, что при использовании разработанных сорбционных материалов не происходит вторичного загрязнения очищаемой среды компонентами остатка, в отличие от гуминовых кислот (величина ХПК для которых выше в 3,0 раза при тех же условиях).

7. Установлен диапазон изменения акустической энергии, в котором наиболее эффективно происходит разрушение агломератов сорбционных материалов под действием ультразвука, – от 200 до 810 кДж/г. При этом величина порога их структурообразования выросла в 1,1–2,0 раза, что обусловлено увеличением степени деструкции их частиц. Размеры их агрегатов при одинаковых условиях обработки снижаются в ряду сосново-пушицевый торф – древесно-тростниковый торф – бурый уголь. Обработка ультразвуком приводит как к деструкции агрегатов сорбционных материалов, так и к их агломерации.

8. Экспериментально обоснованы условия обработки ультразвуком сорбционных материалов на основе остатков торфа и бурого угля, позволяющие повысить их сорбционную емкость по ионам меди при pH 7,0 в 2,3–3,0 раза, по ионам цинка – в 2,2 раза.

Список использованных источников

- Лиштван, И. И. Основные свойства торфа и методы их определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск : Наука и техника, 1975. – 320 с.
- Орлов, Д. С. Практикум по химии гумуса. / Д. С. Орлов, Л. А. Гришина. – М. : Моск. гос. ун-т, 1981. – 270 с.
- Айвазов, Б. В. Практикум по химии поверхностных явлений и адсорбции : учеб. пособие для институтов / Б. В. Айвазов. – М. : Высшая школа, 1973. – 208 с.
- Лиштван, И. И. Физико-химическая механика гуминовых веществ / И. И. Лиштван, Н. Н. Круглицкий, В. Ю. Третинник. – Минск : Наука и техника, 1976. – 264 с.
- Рязанов, М. А. РК-спектроскопия как метод изучения кислотно-основных свойств гумусовых веществ / М. А. Рязанов, Е. М. Лаптева, Е. Д. Лодыгин // Гуминовые вещества в биосфере : тр. II Междунар. конф. / Моск. гос. ун-т. – М., 2004. – С. 129–132.
- Шарло, Г. Методы аналитической химии. Количественный анализ неорганических соединений / Г. Шарло. – М. : Химия, 1969. – Ч. II. – 1204 с.
- Кокотов, Ю. А. Равновесие и кинетика ионного обмена / Ю. А. Кокотов, В. А. Пасечник. – М. : Химия, 1970. – 336 с.
- Лихачева, А. В. Химия окружающей среды. Лабораторный практикум : учеб.-метод. пособие для студентов / А. В. Лихачева, Л. А. Шибека. – Минск : БГТУ, 2011. – 204 с.
- Романовский, В. И. Термохимическая и механохимическая переработка отходов сетчатых полимеров : дис. ... канд. техн. наук : 25.00.36 / В. И. Романовский. – Минск, 2008. – 178 л.
- Раковский, В. Е. Химия и генезис торфа / В. Е. Раковский, Л. В. Пигулевская. – М. : Недра, 1978. – 231 с.
- Закис, Г. Ф. Функциональный анализ лигнинов и их производных / Г. Ф. Закис. – Рига: Зинатне, 1987. – 230 с.
- Першай, Н. С. Сорбционные материалы на основе гуматсодержащих соединений торфа и бурого угля : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 25.03.13 / Н. С. Першай ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – Минск, 2020. – 25 с.

References

- Lishtvan I. I., Korol N. T. *Osnovnyye svoystva torfa i metody ikh opredeleniya* [Basic properties of peat and methods of their determination]. Minsk, 1975, 320 p. (in Russian)
- Orlov D. S., Grishina L. A. *Praktikum po khimii gumusa* [Workshop on humus chemistry]. Moscow, 1981, 270 p. (in Russian)
- Ayvazov B. V. *Praktikum po khimii poverkhnostnykh yavleniy i adsorbsii: ucheb. posobiye dlya institutov* [Workshop on the chemistry of surface phenomena and adsorption: a textbook for institutes]. Moscow, 1973, 208 p. (in Russian)
- Lishtvan I. I. [et al.] *Fiziko-himicheskaya mekhanika guminovyh veshchestv* [Physical and chemical mechanics of humic substances]. Minsk, 1976, 264 p. (in Russian)
- Ryazanov M. A. [et al.] *pK-spektroskopiya kak metod izucheniya kislotno-osnovnyh svoystv gumusovyh veshchestv* [pK spectroscopy as a method for studying the acid-base properties of humic substances]. *Guminovye veshchestva v biosfere : tr. II Mezhdun. konf.* [Proc. of the II Int. Conf. "Humic substances in the biosphere"]. Moscow, 2004, pp. 129–132. (in Russian)
- Sharlo G. *Metody analiticheskoy khimii. Kolichestvennyy analiz neorganicheskikh soyedineniy* [Methods of analytical chemistry. Quantitative analysis of inorganic compounds]. Moscow, 1969, Ch. II, 1204 p. (in Russian)
- Kokотов Yu. A., Pasechnik V. A. *Ravnovesie i kinetika ionnogo obmena* [Equilibrium and kinetics of ion exchange]. Moscow, 1970, 336 p. (in Russian)
- Likhacheva A. V., Shibeka L. A. *Khimiya okrughayushchey sredy. Laboratornyy praktikum : ucheb.-metod. posobiye dlya studentov* [Environmental chemistry. Laboratory workshop: teaching aid for students]. Minsk, 2011, 204 p. (in Russian)

9. Romanovskij V. I. *Termohimicheskaya i mekhanohimicheskaya pererabotka othodov setchatyh polimerov. Diss. kand. tekhn. nauk* [Thermochemical and mechanochemical processing of waste mesh polymers. Dr. tech. sci. diss.]. Minsk, 2008, 178 p. (in Russian)
10. Rakovskij V. E. *Himiya i genezis torfa* [Chemistry and genesis of peat]. Moscow, 1978, 231 p. (in Russian)
11. Zakis G. F. *Funktional'nyj analiz ligninov i ih proizvodnyh* [Functional analysis of lignins and their derivatives]. Riga, 1987. 230 p. (in Russian)
12. Pershaj N. S. *Sorbionnye materialy na osnove gumatsoderzhashchih soedinenij torfa i burogo uglya*. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Sorption materials based on humate-containing compounds of peat and brown coal. Dr. tech. sci. diss.]. Minsk, 2020, 25 p. (in Russian)

Информация об авторах

Першай Наталія Сергеевна – кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tasha_com105@tut.by

Янута Юрий Григорьевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник. Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: yanuta@tut.by

Information about the authors

Natalia S. Pershay – Ph. D. (Technical), Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tasha_com105@tut.by

Yuriy G. Yanuta – Ph. D. (Technical), Docent, Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Scoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: yanuta@tut.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2021-1-187-197>

УДК 665.07.032.53+639.3.05

Поступила в редакцию 26.03.2021

Received 26.03.2021

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА ОРГАНИЧЕСКОЙ И МИНЕРАЛЬНОЙ ЧАСТЕЙ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ ОТ ПРОИЗВОДСТВА ГУМИНОВЫХ ПРЕПАРАТОВ

И. И. Лиштван, Г. В. Наумова, Н. А. Жмакова, Н. Л. Макарова,
Т. Ф. Овчинникова, А. А. Макеенко

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. Приведены результаты исследования состава органической и минеральной частей твердых остатков от производства гуминовых препаратов Гидрогумат, Оксигумат, Оксидат торфа и Консил. Установлены существенные различия компонентного состава этих отходов в зависимости от технологий получения препаратов. Окислительно-гидролитическая переработка торфа приводит к практически полной (кислотно-щелочной гидролиз) или частичной (окисление) деструкции гемицеллюлоз и относительному накоплению в твердых отходах целлюлозы и «лигнина». Органические части остатков содержат до 30 % гуминовых веществ, в связи с тем, что технологиями производства гуминовых препаратов не предусмотрена стадия промывки остатков после разделения на центрифуге и часть гуминовых препаратов остается в твердой фазе.

Показано, что минеральная часть твердых остатков включает широкий набор биогенных макро- и микроэлементов, так как гуматы одновалентных металлов переходят в раствор, а соли гуминовых веществ с металлами более высокой валентности нерастворимы и остаются в твердом остатке от гидролиза или окисления торфа.

Исследование химического состава твердых остатков от производства гуминовых препаратов показало возможные направления их эффективной утилизации. Отходы относятся к гуматсодержащим продуктам с широким набором биогенных макро- и микроэлементов, поэтому их можно эффективно использовать как биологически активные добавки к грунтам, компостам, удобрениям, а также в прудовом рыбоводстве для стимуляции развития компонентов естественной кормовой базы рыб и повышения рыбопродуктивности водоемов.

Ключевые слова: торф; гуминовые препараты; остатки от производства; компонентный состав; гуминовые кислоты; макро- и микроэлементы; утилизация отходов.

Для цитирования. Лиштван И. И., Наумова Г. В., Жмакова Н. А., Макарова Н. Л., Овчинникова Т. Ф., Макеенко А. А. Исследование состава органической и минеральной частей твердых отходов от производства гуминовых препаратов // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 187–197.

INVESTIGATION OF THE COMPOSITION OF THE ORGANIC AND MINERAL PARTS OF SOLID WASTE FROM THE PRODUCTION OF HUMIC PREPARATIONS

I. I. Lishtvan, G. V. Naumova, N. A. Zhmakova, N. L. Makarova,
T. F. Ovchinnikova, A. A. Makeenko

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The composition of the organic and mineral parts of solid residues from the production of humic preparations Hydrohumate, Oxyhumate, peat oxidate and Consil was studied. Significant differences in the component composition of these wastes, depending on the technologies for obtaining drugs, have been established. Redox-hydrolytic processing of peat leads to almost complete (acid-base hydrolysis) or partial (oxidation) destruction of hemicelluloses and the relative accumulation of cellulose and "lignin" in solid waste. The organic parts of the residues contain up to 30 % humic substances, due to the fact that the technologies for the production of humic preparations do not provide for the stage of washing the residues after separation in a centrifuge and some of the humic preparations remain in the solid phase.

It is shown that the mineral part of solid residues includes a wide range of biogenic macro-and microelements, since humates of monovalent metals pass into solution, and salts of humic substances with metals of higher valence are insoluble and remain in the solid residue from hydrolysis or oxidation of peat.

The study of the chemical composition of solid residues from the production of humic preparations showed possible directions for their effective disposal. Waste products are humate-containing products with a wide range of biogenic macro-and microelements, so they can be effectively used as biologically active additives to soils, compost, fertilizers, as well as in pond fish farming to stimulate the development of components of the natural food base of fish and increase the fish productivity of reservoirs.

Keywords: peat; humic preparations; residues from production; component composition; humic acids; macro-and microelements; waste disposal.

For citation. Lishtvan I. I., Naumova G. V., Zhmakova N. A., Makarova N. L., Ovchinnikova T. F., Makeenko A. A. Investigation of the composition of the organic and mineral parts of solid waste from the production of humic preparations. *Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 187–198.

Введение. В Институте природопользования НАН Беларуси созданы и внедрены технологии производства ряда экологически безопасных гуминовых препаратов различного назначения. Биологически активные препараты получают методами химической деструкции торфа, обеспечивающей активизацию гуминового комплекса и перевод в растворимое состояние до 60–80 % органической массы сырья. Отходом производства является твердый остаток от гидролиза или окисления торфа, остающийся после отделения на центрифуге жидкого целевого продукта от постакционной суспензии. Его выход на 1 т гуминового препарата в зависимости от технологии производства составляет 120–320 кг при влажности около 80 %. Несмотря на то что остающиеся после получения жидких гуминовых препаратов твердые остатки содержат ценные органические природные компоненты, частично деструктированные в процессе переработки торфа, они не находят достойного применения. Решение проблемы эффективного использования отходов от производства гуминовых препаратов является важной задачей, как в экологическом, так и в экономическом аспекте.

Цель работы – исследовать состав органической и минеральной частей твердых остатков, образующихся в производстве регуляторов роста гуминовой природы Оксидат торфа, Гидрогумат, Оксигумат и консерванта кормов Консил, для определения путей эффективной утилизации этих гуматсодержащих отходов.

Регулятор роста растений Гидрогумат производят путем двухступенчатого кислотно-щелочного гидролиза; при этом на стадии кислотного воздействия происходит гидролиз гемицеллюлоз и переход моносахаридов в жидкую фазу, а на второй, щелочной, стадии – извлечение гуминовых кислот и образование гуминоподобных меланоидинов при взаимодействии соединений со свободными аминогруппами (аминокислоты, амины) с веществами, содержащими карбонильные группы (углеводы, органические кислоты), по реакции Майяра.

Оксигумат и Оксидат торфа получают путем окислительной деструкции исходного торфяного сырья пероксидом водорода в щелочной среде. При этом в случае Оксидата торфа щелочным агентом является гидроксид аммония, который относится к слабым основаниям, а в случае Оксигумата – сильная щелочь гидроксид натрия. Консервант силосованных кормов Консил также производят на базе продуктов окисления торфа с последующим внесением азотсодержащих добавок для усиления его консервирующего действия. Однако эти добавки вносят в жидкий препарат после отделения твердого остатка на центрифуге и они не попадают в твердый остаток.

Оксидат торфа представлен в основном окисленными гуматами аммония, которые составляют более 80 % его органической массы. В процессе его получения окисление затрагивает в основном гуминовый комплекс торфа, переводя в растворимое состояние гуматы в форме солей аммония.

Оксигумат и Консил, в отличие от Оксидата торфа, являются продуктами предварительного щелочного гидролиза, а затем окисления торфяного сырья в присутствии катализирующих агентов, обеспечивающих более глубокую деструкцию органических компонентов торфа, в том числе его гуминовых веществ, углеводного комплекса и даже в незначительной степени и негидролизуемого остатка («лигнин»). Они представляют собой более сложные по химическому составу продукты, представленные не только окисленными гуминовыми кислотами (около 50 % от ОМ препарата), но и широким спектром карбоновых, оксикарбоновых, фенолкарбоновых кислот. В наибольшей степени это касается консерванта кормов Консила, в связи с тем, что технология его производства предусматривает более жесткие условия технологического процесса по температурным, времененным и расходным параметрам, обеспечивающим более глубокую деструкцию торфа [1].

При производстве всех этих препаратов образуются не только жидкие целевые продукты, но и твердые остатки, с которыми теряется значительная часть органических составляющих исходного сырья. Для определения направлений использования гуматсодержащих остатков необходимо было изучить физико-химические свойства и химический состав этих ценных отходов гуминового производства.

В связи с различием технологических процессов при производстве данных препаратов деструкция основных компонентов торфа происходит не одинаково и состав как самих гуминовых препаратов, так и твердых остатков от их производств также будет различным.

Объекты и методы исследования. Объектами исследований являлись остатки от производства гуминовых препаратов, отобранные на промышленных установках ЧПУП «ЧервеньАГРО», ЗАО «Юнатекс» и ООО «Фермент», осуществляющих выпуск биологически активных гуминовых препаратов

Гидрогумат, Оксигумат, Оксидат торфа и Консил, а также образцы торфяного сырья, используемого при производстве этих препаратов.

Все образцы охарактеризованы по основным физико-химическим показателям.

Содержание массовой доли влаги, сухих и органических веществ определяли в соответствии с установившейся практикой.

Элементный состав твердых остатков определяли с использованием CHNOS-анализатора VARIOEL фирмы ELEMENTAR в ЦАСИ Института физики НАН Беларуси.

Исследование компонентного состава образцов твердых остатков от производства гуминовых препаратов проводили по методикам, предварительно разработанным для этих целей путем модификации методик определения компонентного состава торфа [2, 3] с учетом специфики объектов (гумат-содержащих твердых остатков) и их отличий от торфяного сырья.

В стандартный ход анализов по определению выхода отдельных компонентов в твердых остатках, в сравнении с методикой, рекомендуемой для изучения группового анализа исходного торфа, внесены необходимые изменения в последовательности определения компонентов. Учитывая щелочную реакцию этих продуктов, в них первоначально определяли содержание гуминовых веществ, а в отмытом водой остатке после его сушки на воздухе – битумы. Порядок определения остающихся в остатках компонентов проводили в такой же последовательности, как и при анализе самого торфа. То есть после удаления битумов и гемицеллюлоз, содержащихся в твердых остатках, определяли содержание трудногидролизуемых веществ (целлюлозы) и непрогидролизованного или неокисленного остатка, принимаемых за «лигнин».

Определение содержания макроэлементов в препаратах и остатках выполнено в Гродненском государственном университете имени Янки Купалы с использование метода рентгенофлуоресцентного анализа на анализаторе СЕР-01(ELVA-X). Содержание микроэлементов в твердых остатках определяли в лаборатории биогеохимии и агрэкологии института с использованием атомно-сорбционного метода на спектрометре марки ZEE nit 700P.

Результаты исследований. Одной из важных химических характеристик органической части как самого торфа, так и продуктов его переработки является элементный состав.

Элементный состав твердых остатков, отобранных на предприятиях, выпускающих Гидрогумат, Оксигумат, Оксидат торфа и Консил определяли с использованием CHNOS-анализатора VARIOEL фирмы ELEMENTAR в ЦАСИ Института физики НАН Беларуси.

Результаты определения содержания таких элементов, как C, H, N, O и S, в исследуемых твердых остатках в расчете на их горючую массу, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Элементный состав твердых остатков гидролитической и окислительной деструкции торфа в щелочной среде и соответствующего торфяного сырья

Table 1. Elemental composition of solid residues of hydrolytic and oxidative degradation of peat in an alkaline environment and the corresponding peat raw materials

Объект исследования	Элементный состав, % на горючую массу				
	C	H	N	O	S
Торф для производства Гидрогумата и Консила	58,5	5,8	2,8	32,9	–
Твердый остаток от Гидрогумата	56,8	4,0	2,3	34,3	2,6
Твердый остаток от Консила	52,3	3,8	2,5	41,4	–
Торф для производства Оксигумата	60,9	5,3	2,1	31,7	–
Твердый остаток от Оксигумата	54,5	3,9	2,4	39,2	–
Торф для производства Оксидата торфа	58,3	5,9	2,6	33,2	–
Твердый остаток от Оксидата торфа	50,6	4,5	3,8	41,1	–

Анализ экспериментальных данных по элементному составу твердых остатков – отходов, образующихся в производстве Гидрогумата, Оксигумата, Оксидата торфа и Консила, показывает, что по содержанию отдельных элементов горючей массы они существенно различаются между собой. Так, в твердом остатке, образующемся в производстве Гидрогумата и Оксигумата, содержится значительно больше углерода (56,8 и 54,5 %) в сравнении с его показателем в аналогичном отходе производства Оксидата торфа (50,6 %) и Консила (52,3 %). Это обусловлено более глубокой деструкцией органической составляющей торфа при гидролизе и окислении в среде раствора гидроксида натрия в присутствии пероксида водорода и переходом в жидкую фазу продуктов окисления, кроме гуминовых веществ также и кислородсодержащих соединений, в первую очередь углеводов, что повышает относительное содержание углерода в твердом остатке Гидрогумата и Оксигумата. При производстве

Консила содержание углерода в остатке снижается за счет более глубокой деструкции торфа в более жестких технологических условиях окисления и большего выхода органических веществ в раствор.

Другая тенденция наблюдается с содержанием водорода. В твердых остатках Гидрогумата, Оксигумата и Консила оно отличается незначительно и составляет 4,0; 3,9 и 3,8 % соответственно, а в остатке Оксидата торфа – 4,5 % в расчете на горючую массу, т. е. его на 13–15 % больше, чем в других остатках.

Значительный научный интерес представляло сравнение элементного состава исходных образцов торфа, используемых в производстве указанных гуминовых препаратов, с элементным составом твердых остатков от их производства.

При определении геоботанической характеристики исходных образцов торфа, на основе которых получены гуминовые препараты Оксигумат и Оксидат торфа, было установлено, что исходное торфяное сырье представлено в обоих случаях низинным тростниковым и древесно-осоковым торфом с одинаковой степенью разложения ($R = 40\%$). Гидрогумат и Консил получают на одной промышленной установке с использованием одного торфяного сырья – древесно-осокового торфа со степенью разложения 40 %. Это свидетельствует о том, что как на выход твердых остатков, так и на их элементный состав большое влияние оказывают процессы химической деструкции торфа, предусмотренные технологическими регламентами в производстве этих препаратов, а не торфяное сырье, которое является очень близким по своим характеристикам.

Сравнительная характеристика образцов исходного торфа и твердых остатков по содержанию наиболее значимых по величине элементов горючей массы – углерода и кислорода – показывает, что образец торфа, используемый в производстве Оксигумата, содержит в горючей массе 60,9 % углерода, а в твердом остатке его содержание находится на уровне 54,5 %. В то время как в образце торфа для производства Оксидата торфа содержание углерода составляет 58,3 %, а в твердом остатке – 50,6 % в расчете на горючую массу. Торф, используемый в производстве препаратов Гидрогумат и Консил, содержит в горючей массе 58,5 % углерода, а в твердом остатке от Гидрогумата его содержание находится на уровне 54,5 %. В то время как в остатке от производства Консила – 52,3 % в расчете на горючую массу.

Как и следовало ожидать, процессы окислительно-гидролитической деструкции торфа приводят к обогащению твердых остатков от производства гуминовых препаратов кислородом. Если в исходном торфе, используемом в производстве Оксигумата, содержание кислорода составляет 31,7 %, то в твердом остатке уровень его содержания достигает 39,2 % в горючей массе. Аналогичная тенденция наблюдается и для других твердых остатков. В исходном торфяном сырье для производства Оксидата торфа содержится 33,2 % кислорода, в отделяемом твердом остатке его уровень возрастает до 41,1 %. В исходном торфе, используемом для производства Гидрогумата и Консила, содержание кислорода составляет 32,9 %, в твердом остатке от производства Консила – 41,3, а в остатке от Гидрогумата, получаемого методом гидролитической деструкции торфа, – 34,3 %, т. е. содержание кислорода в нем также возрастает по сравнению с его содержанием в торфе, но существенно меньше, чем в остатках от производства препаратов, получаемых способом окислительной деструкции. Следовательно, окислительная деструкция торфа приводит к снижению содержания углерода и увеличению выхода кислорода в твердых остатках, что представляется закономерным.

Сравнительная характеристика содержания водорода в горючей массе исходных образцов торфа и исследуемых твердых остатков показала, что содержание водорода в горючей массе торфяного сырья для Оксигумата и Оксидата торфа составляет 5,3 и 5,9 % соответственно, а в горючей массе твердых остатков от их производства водорода несколько меньше – 4,0 и 4,1 %. Остатки от Гидрогумата и Консила тоже содержат заметно меньше водорода, чем торфяное сырье. Так, содержание водорода в горючей массе исходного торфа составляет 5,8 % а в твердых остатках от Гидрогумата и Консила 4,0 и 3,8 % от горючей массы соответственно.

По содержанию азота исходные образцы торфа практически не отличаются. Доля азота в их горючей массе находится на уровне 2,1 % (сырье Оксигумата), 2,6 % (сырье Оксидата торфа) и 2,8 % (сырье Гидрогумата и Консила). Последующая химическая переработка торфа приводит к некоторым различиям по содержанию азота в твердых остатках. Так, в остатке от Оксигумата существует 2,4 % азота в горючей массе, Гидрогумата – 2,3, Консила – 2,5, а в твердом остатке Оксидата торфа этот показатель возрастает до 3,8 %, что связано с использованием водного амиака в его производстве.

В элементном составе остатка от производства Гидрогумата обнаружено 2,6 % серы, которой нет ни в исходном торфе, ни в других препаратах. Наличие серы в остатке от этого препарата связано с тем, что на одном из этапов его производства используется серная кислота, которая в последующем образует сульфат натрия, содержащийся как в препарате, так и в твердом остатке от его производства.

Таким образом, химическая переработка торфа, базирующаяся на окислительно-гидролитической деструкции его отдельных компонентов, приводит к образованию твердых отходов, существенно отличающихся по элементному составу. При этом твердые остатки обогащаются кислородом при одновременном снижении углерода в их горючей массе, при использовании в качестве реагента аммиака – обогащаются азотом, а в случае гидролиза серной кислотой – серой.

Химическая характеристика торфа и продуктов его модификации предусматривает определение их группового состава, который позволяет установить содержание основных компонентов в органическом веществе: битумов, легкогидролизуемых веществ, гуминовых веществ, гуминовых кислот и фульвокислот, трудногидролизуемых веществ и «лигнина».

Значительный интерес с научной и практической точек зрения представляло сравнение группового состава образцов исходного торфа, на основе которых произведены гуминовые препараты, с групповым составом твердых отходов, образующихся в процессе производства. Исследован групповой состав органической массы древесно-осокового торфа, отобранного на промышленной установке по выпуску Оксигумата, тростникового торфа, используемого в производстве Оксидата торфа, а также древесно-осокового торфа, отобранного на промышленной установке по выпуску Гидрогумата и Консила. Групповой состав образцов торфа приведен в табл. 2.

Таблица 2. Групповой состав торфа, используемого в качестве исходного сырья для производства Оксигумата, Оксидата торфа, Гидроумата и Консила

Table 2. Group composition of peat used as feedstock for the production of Oxyhumate, Peat oxidate, Hydrohumate and Consil

Объект исследования	Ботанический вид торфа	Степень разложения, R, %	Содержание компонентов в органической массе, % на ОМ						
			Б	ЛГ	ГВ			ТГ	«Л»
					сумма	ГК	ФК		
Торф для производства Оксигумата	Тростниковый	40	3,4	18,9	56,8	38,1	18,7	8,0	12,9
Торф для производства Оксидата торфа	Древесно-осоковый	40	3,5	19,1	52,2	36,0	16,2	10,4	14,8
Торф для производства Гидрогумата и Консила	Древесно-осоковый	40	3,6	20,3	52,9	36,8	16,1	9,5	13,7

П р и м е ч а н и е. Б – битумы; ЛГ – легкогидролизуемые вещества; ГВ – гуминовые вещества; гуминовые кислоты; ФК – фульвокислоты; ТВ – трудногидролизуемые вещества; Л – «лигнин».

Установлено, что исследуемые образцы торфа имеют близкие показатели по компонентному составу. Низинные древесно-осоковый и тростниковый торфа с равновеликой степенью разложения (40 %) содержат практически одинаковое количество битумов (3,4; 3,5; 3,6 %), легкогидролизуемых веществ (18,9; 19,1; 20,3 %), гуминовых кислот (38,1; 36,0; 36,8 %) и фульвокислот (18,7; 17,2; 16,1 %). Следует отметить, что древесно-осоковый торф содержит больше трудногидролизуемых веществ и «лигнина», чем тростниковый, что можно объяснить присутствием в их ботаническом составе древесных включений.

Групповой состав остатков гуминовых производств имеет свои особенности, что связано в первую очередь с различными способами переработки исходного сырья и в меньшей мере с геоботанической природой исходного торфа.

Сравнительная характеристика компонентного состава образцов исходного торфа и твердых остатков показана на рис. 1–3.

Установлено, что в исследуемых твердых остатках содержится 3,0–4,0 % битумов, что свидетельствует об их относительной устойчивости к воздействию химических реагентов, используемых при переработке торфа.

Наибольшие различия отмечены в содержании легкогидролизуемых веществ. Так, в твердом остатке, отделяемом от Гидрогумата, где торфяное сырье, содержащее 20,3 % легкогидролизуемых углеводов, последовательно гидролизуется в кислой и щелочной среде, они практически отсутствуют. Это связано с гидролизом гемицеллюлоз и переходом моносахаридов в жидкую фазу – целевой продукт производства. В органической массе твердых остатков, отделяемых от Оксигумата и Консила, где торф окисляется в присутствии водного раствора NaOH, сохраняется лишь половина гемицеллюлоз – 9,5 и 9,6 % соответственно, при их содержании в исходных торфах 18,9 и 20,3 %. В то же время в остатке от Оксидата торфа, в котором окисление торфа проводится в среде водного аммиака, сохраняется 11,6 % гемицеллюлоз или более 60 % от их содержания в торфяном сырье.

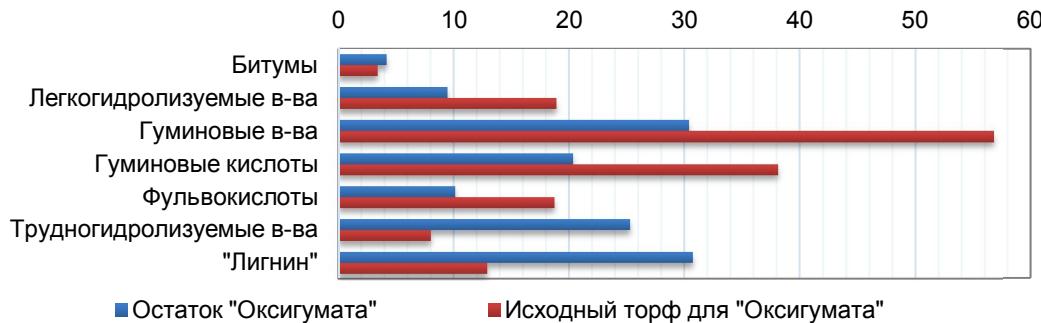


Рис. 1. Содержание основных компонентов в исходном торфе и твердом остатке от Оксигумата

Fig. 1. The content of the main components in the initial peat and the solid residue from the Oxyhumate

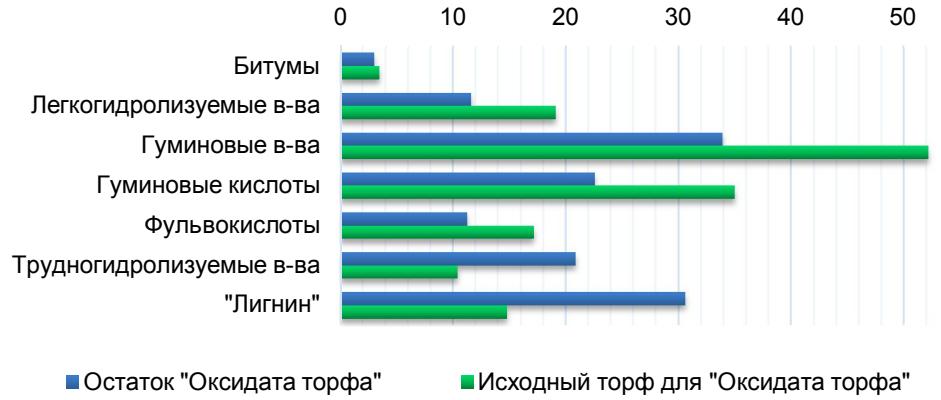


Рис. 2. Содержание основных компонентов в исходном торфе и остатке от Оксидата торфа

Fig. 2. The content of the main components in the initial peat and the residue from the peat oxidate

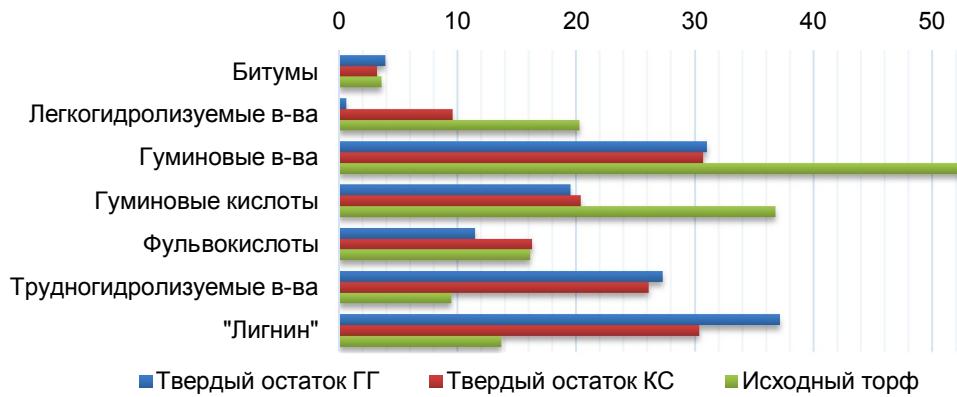


Рис. 3. Сравнительная характеристика группового состава исходного торфа и твердых остатков от производства Гидрогумата и Консил

Fig. 3. Comparative characteristics of the group composition of the initial peat and solid residues from the production of Hydrohumate and Consil

Во всех остатках происходит относительное накопление трудногидролизуемых веществ. Если в исходных торфах их содержание составляет 9–10 %, то в остатках – от 20 до 27 %. Это накопление относительное, так как оно происходит за счет деструкции других лабильных компонентов, переходящих после окисления торфа в жидкую фазу.

Переработка торфа приводит также к обогащению твердых остатков «лигнином», при этом в продуктах окисления доля «лигнина» значительно ниже, чем в прогидролизованном остатке. Это обусловлено тем, что процесс окисления, особенно в случае получения Консила, происходит в достаточ-

но жестких условиях по температурным и расходным параметрам реагентов и, по-видимому, частично затрагивает и полифенилпропановые структуры торфяного «лигнина».

Твердые остатки включают значительное количество гуминовых веществ. Их содержание в остатках практически одинаково и составляет для остатка от Гидрогумата 31,0 %, от Консила – до 30,7, в остатке Оксигумата – 30,0, а в остатке Оксидата торфа – до 34 %, что является положительным, так как эти соединения обладают многогранным биологическим действием и способностью положительно воздействовать на различные процессы в живых организмах.

Физико-химическая характеристика твердых остатков от производства гуминовых препаратов показала, что они включают значительное количество минеральных веществ. Их содержание в сухом веществе твердого остатка Гидрогумата составляет 47,3 %, остатка Оксигумата – 29,7, а в сухой массе остатке Оксидата торфа – 3,4, а в остатке от производства Консила – 27,6 %, в то время как исходный торф, используемый в производстве этих препаратов, содержит значительно меньше золы. Следовательно, твердые остатки богаче минеральными элементами, чем торфяное сырье, на основе которого они производятся.

Как известно, состав золы низинного торфа основных месторождений Беларуси, детально исследован агрономами в связи с его использованием в качестве органического удобрения. Эти сведения представлены в публикациях Института природопользования НАН Беларуси (ранее – Институт торфа БССР) и в других работах.

Согласно литературным данным [2], на большом экспериментальном материале установлено, что тростниковый и древесно-осоковый торф содержат в составе зольной части 0,75–5,14 % оксида кремния, 3,4–3,7 % оксида кальция, 0,46–0,47 % оксида магния, 0,72–0,75 % оксида алюминия и от 0,01 до 0,18 % оксида фосфора в сухом веществе. Эти показатели характеризуют незазоленный торф, к которому относится исследуемое нами торфяное сырье.

Определение содержания макроэлементов в препаратах и остатках выполнено в Гродненском государственном университете имени Янки Купалы с использованием метода рентгенофлуоресцентного анализа на анализаторе СЕР-01(ELVA-X).

Экспериментальные данные, полученные при определении содержания макроэлементов в сухом веществе и золе препарата Оксигумат и твердого остатка от его производства, представлены в табл. 3.

Таблица 3. Содержание основных макроэлементов в сухом веществе и золе в Оксигумате и твердом остатке от его производства

Table 3. The content of the main macronutrients in the dry matter and ash of Oxyhumate and the solid residue from its production

Эле- мент	Содержание в сухом веществе				Содержание в золе, мкг/г			
	Оксигумата		остатка от Оксигумата		Оксигумата		остатка от Оксигумата	
	мкг/г	%	мкг/г	%	мкг/г	%	мкг/г	%
Al	11 133,7	4,45	18 966,8	6,21	38 553,9	4,14	75 846,5	7,88
Ca	7 806,1	3,12	17 806,2	5,83	26 540,8	2,85	62 948,8	6,54
Fe	5 179,0	2,07	14 354,9	4,70	19 649,5	2,11	50 147,3	5,21
S	6 755,3	2,70	11 636,6	3,81	23 374,5	2,51	39 944,6	4,15
Mg	3 552,8	1,42	10 414,9	3,41	14 155,1	1,52	38 404,5	3,99
P	3 027,4	1,21	7 177,4	2,35	11 547,6	1,24	24 832,9	2,58
Si	2 051,6	0,82	12 949,9	4,24	8 195,0	0,88	40 714,6	4,23
K	1 125,9	0,45	3 359,7	1,10	4 470,0	0,48	10 780,2	1,12
Na	209 563,5	83,76	20 875,7	68,35	784 768,3	84,27	618 899,9	64,30
Сумма	250 195,3	100,00	295 423,1	100,00	931 254,7	100,00	962 519,3	100,00

Как видно из приведенных данных, зора и сухое вещество препарата Оксигумат в наибольшем количестве представлены натрием, доля которого составляет 84,27 % в зольном остатке и 83,76 % в сухом веществе. Это связано с тем, что при производстве Оксигумата окисление торфа осуществляют в щелочной среде; при этом основным реагентом является гидроксид натрия.

В значительных количествах в зольной части препарата присутствуют также алюминий (4,14 %), кальций (2,85), железо (2,1%), сера (2,51), магний (1,52), фосфор (1,24 %). Кремний и калий составляют в золе 0,88 и 0,48 % соответственно. Аналогичная закономерность снижения содержания макроэлементов в сухом веществе препарата наблюдается от алюминия и кальция к железу и сере и далее к магнию, фосфору, кремнию и калию. В целом, основными макроэлементами представлено более 93 % зольной части препарата Оксигумат.

Согласно представленным данным, в твердом остатке от Оксигумата на долю макроэлементов приходится более 96,0 % золы и 29,5 % сухого вещества остатка. Особенно выделяется натрий, который вносится в состав остатка из реагента – гидроксида натрия, используемого при производстве препарата. Его доля в золе твердого остатка составляет 64,30 %, а в сухом веществе – 68,35 %. В значительных количествах в зольной части твердого остатка присутствует также алюминий (7,88 %) кальций (6,54), железо (5,21), сера (4,15), магний (3,99) и кремний (4,23 %). В меньших количествах представлены фосфор (2,58 %) и калий (1,12 %). Аналогичная закономерность наблюдается и по содержанию этих элементов в сухом веществе твердого остатка.

В табл. 4 представлены данные по содержанию основных макроэлементов в сухом веществе и золе в Оксидате торфа и твердом остатке от его производства.

**Таблица 4. Содержание основных макроэлементов в сухом веществе и золе
Оксидата торфа и твердом остатке от его производства**

**Table 4. The content of the main macronutrients in the dry matter and ash
of peat oxidate and the solid residue from its production**

Элемент	Содержание в сухом веществе				Содержание в золе, мкг/г			
	Оксидата торфа		остатка от Оксидата торфа		Оксидата торфа		остатка от Оксидата торфа	
	мкг/г	%	мкг/г	%	мкг/г	%	мкг/г	%
Al	4 105,3	16,14	5 567,7	17,11	145 187,1	15,76	173 315,1	17,77
Ca	3 614,4	14,21	5 440,8	16,72	136 988,1	14,87	169 121,9	17,34
Fe	3 494,8	13,74	4 968,9	15,27	114 325,7	12,41	155 856,7	15,98
S	3 105,7	12,21	3 501,5	10,76	104 560,5	11,35	88 852,0	9,11
Mg	3 260,8	12,82	4 539,5	13,95	120 866,4	13,12	122 500,6	12,56
P	2 396,0	9,42	2 642,4	8,12	80 792,5	8,77	82 122,9	8,42
Si	2 238,3	8,80	3 175,9	9,76	85 398,7	9,27	100 946,0	10,35
K	1 554,1	6,11	1 155,3	3,55	57 577,3	6,25	40 475,9	4,15
Na	1 666,1	6,55	1 548,9	4,76	62 907,2	6,72	42 134,0	4,32
Сумма	25 435,5	100,00	32 540,9	100,00	921 237,5	100,00	975 324,1	100,00

Как показывают полученные данные, минеральная часть Оксидата торфа и твердого остатка от его производства отличается от минеральной части Оксигумата и его остатка по содержанию натрия, так как в случае Оксидата торфа окисление торфа проводят в водно-аммиачной среде. Натрий поступает в продукты производства Оксидата торфа только из торфяного сырья и его содержание, как в препарате, так и в твердом остатке несравненно ниже. Основным макроэлементом в этих продуктах является алюминий, в значительных количествах присутствует кальций, железо, сера и магний.

Экспериментальные данные, полученные при определении содержания макроэлементов в сухом веществе и золе твердых остатков от Гидрогумата и Консила, представлены в табл. 5 и 6 соответственно.

В золе и сухом веществе Гидрогумата и остатка от его производства в наибольшем количестве представлены натрий и сера.

Содержание натрия в сухом веществе остатка составляет 55,09 %, а в золе остатка – 51,6 %. Значительную долю составляет также содержание серы – 22,43 % и 23,5 соответственно.

**Таблица 5. Содержание основных макроэлементов в сухом веществе и золе
Гидрогумата и твердого остатка от его производства**

**Table 5. Content of the main macronutrients in dry matter and ash
of Hydrohumate and solid residue from its production**

Эле- мент	Содержание в сухом веществе				Содержание в золе, мкг/г			
	Гидрогумата		остатка от Гидрогумата		Гидрогумата		остатка от Гидрогумата	
	мкг/г	%	мкг/г	%	мкг/г	%	мкг/г	%
Al	12 432,4	3,37	24 637,2	5,29	33 195,5	3,54	64 196,7	6,60
Ca	9 481,1	2,57	24 357,8	5,23	21 005,2	2,24	54 761,7	5,63
Fe	8 521,9	2,31	16 812,8	3,61	24 005,8	2,56	34 238,3	3,52
S	89 974,2	22,6	104 463,6	22,43	195 984,9	20,90	228 579,2	23,5
Mg	5 607,5	1,52	14 158,2	3,04	18 754,5	2,00	32 876,5	3,38
P	4 943,4	1,34	11 224,4	2,41	13 972,1	1,49	23 052,5	2,37
Si	3 320,2	0,9	9 314,6	2,0	9 471,0	1,01	25 484,2	2,62
K	1 106,7	0,3	4 191,6	0,9	1 875,5	0,20	7 677,9	0,78
Na	240 125,1	65,09	256 571,6	55,09	619 462,4	66,06	501 901,6	51,60
Сумма	368 912,5	100,00	465 731,8	100,00	937 726,9	100,00	972 677,6	100,00

Содержание этих элементов в золе и сухом веществе препарата Гидрогумат еще выше и составляет соответственно 66,06 и 65,09 % и 22,6 и 23,5 % соответственно.

Эти элементы привносятся в Гидрогумат и остаток при производстве, технология которого предусматривает двухступенчатый гидролиз торфа вначале в кислой, а затем в щелочной среде. При этом в качестве кислотного агента используют серную кислоту, а в качестве щелочного агента – гидроксид натрия.

Таблица 6. Содержание основных макроэлементов в сухом веществе и золе Консила и твердого остатка от его производства

Table 6. The content of the main macronutrients in the dry matter and ash of the finished product and the solid residue from its production

Эле- мент	Содержание в сухом веществе				Содержание в золе, мкг/г			
	Консила		остатка от Консила		Консила		остатка от Консила	
	мкг/г	%	мкг/г	%	мкг/г	%	мкг/г	%
Al	10 044,8	4,05	18 261,3	6,32	43 683,8	4,74	68 656,6	7,20
Ca	7 440,6	3,00	16 267,5	5,63	27 555,7	2,99	58 262,7	6,11
Fe	3 323,4	1,34	13 031,4	4,51	18 247,6	1,98	40 240,4	4,22
S	6 498,1	2,62	10 546,5	3,65	22 671,3	2,46	38 142,6	4,00
Mg	3 348,3	1,35	12 280,2	4,25	14 284,8	1,55	39 096,1	4,10
P	2 777,8	1,12	6 385,7	2,21	11 427,8	1,24	19 166,6	2,01
Si	1 860,1	0,75	9 072,9	3,14	8 017,9	0,87	30 990,8	3,25
K	1 240,1	0,50	2 889,5	1,00	4 607,9	0,50	8 582,1	0,90
Na	211 486,1	85,27	200 210,1	69,29	771 100,1	83,67	650 425,9	68,21
Сумма	248 019,3	100,00	288 945,1	100,00	921 596,9	100,00	953 563,8	100,00

В значительных количествах в зольной части остатка от Гидрогумата присутствуют также алюминий (6,60 %), кальций (5,63), железо (3,52) магний (3,38) и фосфор (2,37 %). Содержание кремния составляет 2,62 %, а калия – 0,78 %. Аналогичная закономерность снижения содержания макроэлементов в сухом веществе остатка от Гидрогумата наблюдается для кальция, алюминия, железа и далее магния, фосфора, кремния и калия. В целом, основными макроэлементами представлено около 97 % зольной части остатка Гидрогумата и 46,5 % его сухого вещества.

Содержание макроэлементов в сухом веществе самого препарата Гидрогумат составляет 36,9 % и в еще более значительной степени представлено натрием и серой. Массовая доля остальных макроэлементов в нем значительно ниже, так как в раствор переходят в основном соли одновалентных металлов гуминовых кислот (т. е. натрия), а соли двух- и многовалентных металлов этих соединений не растворимы в щелочной среде и остаются в твердом остатке от гидролиза торфа.

В табл. 6 представлены данные по определению содержания основных макроэлементов в препарате Консил и твердом остатке от его производства.

В твердом остатке от Консила на долю макроэлементов приходится более 95,4 % в зольной части и 28,8 % в сухом веществе остатка. Среди макроэлементов в наибольшем количестве представлен натрий, который поступает в состав препарата и остатка от его получения из реагента – гидроксида натрия, используемого при производстве для перевода в раствор гуминовых веществ. Его доля в золе твердого остатка составляет 68,21 %. В значительных количествах в зольной части твердого остатка присутствует также кальций (7,20 %), алюминий (6,11), железо (4,22), сера (4,00), магний (4,10) и кремний (3,25 %). В меньших количествах представлены фосфор (2,01%), и калий (0,90 %). Аналогичная закономерность наблюдается и по содержанию этих элементов в сухом веществе твердого остатка.

Содержание макроэлементов в сухом веществе препарата Консил составляет 24,8 %, при этом доля натрия в нем выше, чем в сухом веществе остатка от его производства и составляет 85,27 %. Содержание остальных макроэлементов в Консиле значительно ниже, так как соли гуматов металлов высокой валентности нерастворимы и остаются в твердом остатке от окисления торфа.

При исследовании минеральной части твердых остатков наибольший интерес представляло изучение содержания в них тяжелых металлов, способных в высоких концентрациях оказывать отрицательное воздействие на живые организмы. Содержание микроэлементов в твердых остатках, определяли в лаборатории биогеохимии и агроэкологии института с использованием атомно-сорбционного метода на спектрометре марки ZEE nit 700P.

Содержание тяжелых металлов в минеральной части твердых остатков в расчете на золу и сухое вещество представлено в табл. 7.

Таблица 7. Содержание отдельных микроэлементов в зольной части и сухом веществе остатков**Table 7. The content of individual trace elements in the ash part and the dry matter of the residues**

Микро-элемент	Массовая доля микроэлемента, мг/кг в остатке от препарата							
	Гидрогумат		Оксигумат		Оксидат торфа		Консил	
	в золе	в сухом веществе	в золе	в сухом веществе	в золе	в сухом веществе	в золе	в сухом веществе
Ni	6,43	2,19	2,31	0,69	6,43	2,19	2,54	0,70
Cu	8,48	22,9	5,98	1,77	8,48	2,88	36,73	10,14
Cd	1,55	0,53	1,50	0,44	1,55	0,53	1,26	0,35
Pb	0,44	0,15	0,73	0,21	0,44	0,15	0,82	0,23
Zn	13,38	11,36	4,15	1,23	13,38	4,55	25,48	7,03
Mn	167,96	57,13	188,55	55,95	167,96	57,13	75,32	20,79
Co	6,35	2,16	88,69	26,32	6,35	2,16	92,33	25,48

В составе остатка от Гидрогумата среди тяжелых металлов наиболее представлены марганец (57,13 мг/кг СВ), медь (22,9) и цинк (11,36), в меньшей степени – никель (2,19) и кадмий (0,53 мг/кг СВ), а свинец и кобальт содержатся в незначительных количествах.

В сухом веществе остатка от Оксигумата в наибольшем количестве присутствуют марганец (55,95 мг/кг) и кобальт (26,32 мг/кг). Соль кобальта используют при производстве Оксигумата и Консила в качестве катализатора окисления и элемент в основном переходит в твердый остаток. Приблизительно на одном уровне в сухом веществе этого остатка находится содержание меди (1,77 мг/кг) и цинка (1,23 мг/кг). В наименьшем количестве в остатке от Оксигумата присутствуют кадмий и свинец.

В остатке от Оксидата торфа преобладают марганец (57,13 мг/кг) и цинк (4,55 мг/кг). Никель, медь и кобальт содержатся в значительно меньших и примерно равных количествах (2,19, 2,88 и 2,16, мг/кг соответственно), а менее всего представлены кадмий и свинец.

В сухом веществе остатка от производства консерванта кормов Консил в наибольшем количестве содержатся кобальт (25,48 мг/кг), привносимый с реагентами, марганец (20,79), медь (10,14) и цинк (7,03 мг/кг). В незначительных количествах присутствуют кадмий и свинец.

Оценка твердых остатков по содержанию тяжелых металлов показала, что они являются безопасными продуктами и содержат соли тяжелых металлов в незначительных количествах.

Заключение. Исследование элементного состава твердых остатков от производства гуминовых препаратов Гидрогумат, Оксигумат, Оксидат торфа и Консил показало, что химическая переработка торфа с целью производства гуминовых препаратов, базирующаяся на окислительно-гидролитической деструкции его отдельных компонентов, приводит к образованию твердых отходов, существенно отличающихся по элементному составу. При этом остатки обогащаются кислородом при одновременном снижении углерода в их горючей массе, а при использовании в качестве реагента аммиака – обогащаются азотом, а в случае гидролиза серной кислотой – серой.

Исследован состав органической и минеральной частей твердых остатков. Установлены существенные различия в групповом составе исследуемых отходов в зависимости от технологии их получения. В остатке от Гидрогумата, получаемого методом последовательного кислотного и щелочно-гидролиза торфа, происходит практически полная, а в остатках от Оксигумата и Консила частичная деструкция гемицеллюлоз, их содержание по отношению к исходному торфяному сырью снижается наполовину. В этих остатках происходит относительное накопление целлюлозы и «лигнина», содержание которых составляет соответственно 27,3 и 25,2 % для Оксигумата, 26,1 и 37,2 % для Гидрогумата, 30,7 и 30,4 % для Консила. При этом в остатках от Консила и Оксигумата доля «лигнина» несколько ниже, чем в остатке от Гидрогумата в связи с тем, что при их производстве осуществляется более глубокая деструкция торфа с применением катализатора окисления.

В остатке от Оксидата торфа, производство которого связано с меньшими температурными параметрами и использованием слабого щелочного агента, сохраняется большее количество гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина.

Все изучаемые отходы гуминовых производств содержат большое количество гуминовых веществ (до 30,0 %), так как технологиями производства этих препаратов не предусмотрена стадия промывки твердой фазы после центрифугирования и часть гуминовых препаратов остается в твердых остатках.

Сравнительное исследование минеральной части гуминовых препаратов Гидрогумат, Оксигумат, Оксидат торфа и Консил и твердых остатков, образующихся при их производстве, показало, что они включают в свой состав широкий набор макро- и микроэлементов, которые в значительно большей степени сосредоточены в твердых остатках.

Исследование химического состава органической и минеральной частей твердых остатков от производства гуминовых препаратов показало возможные направления их эффективной утилизации. Эти отходы можно отнести к гуматсодержащим продуктам с содержанием гуминовых веществ более 30,0 %, кроме этого, они включают широкий набор биогенных макро- и микроэлементов, в связи с чем их можно эффективно использовать как биологически активные добавки к грунтам, компостам, удобрениям. Одним из перспективных направлений использования данных отходов может быть важнейшая отрасль агропромышленного комплекса республики – рыбоводство. Применение остатков в качестве гуматсодержащих добавок в рыбоводческие пруды может стать малозатратным способом стимуляции развития компонентов естественной кормовой базы рыб и увеличения рыбопродуктивности водоемов.

Список использованных источников

- Наумова, Г. В., Торф и продукты его переработки / Г. В. Наумова, А. Э. Томсон. – Минск : Беларусская наука, 2009. – С. 235–286.
- Семенский, Е. П. Технический анализ торфа / Е. П. Семенский. – М. : Недра, 1966. – 232 с.
- Лиштван, И. И. Основные свойства торфа и методы их определения / И. И. Лиштван, Н. Т. Король. – Минск : Наука и техника, 1975. – 320 с.

References

- Naumova G. V., Tomson A. E. *Torf i produkty ego pererabotki* [Peat and the products of its proceeding]. Minsk, 2009, pp. 235–286. (in Russian)
- Semeniskiy E. P. *Tekhnicheskiy analiz torfa* [Technical analysis of peat]. Moscow, 1966, 232 p. (in Russian)
- Lishtvan I. I., Korol N. T. *Osnovnye svoystva torfa i metody ikh opredeleniya* [Basic properties of peat and methods for their determination]. Minsk, 1975, 320 pp. (in Russian)

Информация об авторах

Лиштван Иван Иванович – академик, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Наумова Галина Васильевна – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Жмакова Надежда Анатольевна – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: zhmakova@mail.ru

Макарова Наталья Леонидовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси, Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: nat.makarova05@gmail.com

Овчинникова Татьяна Феликсовна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Макеенко Александр Александрович – младший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: makeenko1507@mail.ru

Information about the authors

Ivan I. Lishtvan – Academician, D. Cs. (Technical), Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Galina V. Naumova – D. Cs. (Technical), Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Nadezhda A. Zhmakova – Ph. D (Technical), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: zhmakova@mail.ru

Natalya L. Makarova – Ph. D (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: nat.makarova05@gmail.com

Tatiyana F. Ovchinnikova – Ph. D (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Aleksander A. Makeenko – Junior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: makeenko1507@mail.ru

МЕТОД ВЫБОРА ТОРФЯНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИЗ НЕСКОЛЬКИХ ПРИГОДНЫХ НА ПРЕДПРОЕКТНОЙ СТАДИИ ЕГО ПОДГОТОВКИ К ЭКСПЛУАТАЦИИ

Т. И. Макаренко, В. Б. Кунцевич

Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. В различных областях народного хозяйства при поиске оптимальных условий широко используется обобщенная функция желательности Харрингтона, которую могут входить самые разнообразные частные отклики: технологические, технико-экономические, качественные характеристики и др. Анализ задач, решаемых при проведении исследовательских и проектных работ показал, что данный способ можно успешно применить и в торфяной отрасли.

В статье в качестве примера рассматривается метод выбора торфяного месторождения из нескольких пригодных для добычи кускового торфа, предназначенного для производства активированных углей, которое на текущий момент времени является оптимальным вариантом. Показано, что применение обобщенной функции желательности позволяет достичь приемлемых результатов, на стадии предпроектной подготовки, не прибегая к сложным математическим расчетам, которые являются основой стандартного технико-экономического обоснования. Таким образом, предлагаемый метод позволяет снизить трудовые и финансовые затраты при выборе торфяного месторождения для производственной эксплуатации.

Ключевые слова: торфяное месторождение; активированный уголь; влияющие факторы; методы выбора месторождения; шкала желательности.

Для цитирования. Макаренко Т. И., Кунцевич В. Б. Метод выбора торфяного месторождения из нескольких пригодных на предпроектной стадии его подготовки к эксплуатации // Природопользование. – 2021. – № 1. – С.198–206.

THE METHOD OF SELECTING OF PEATLAND FROM SEVERAL SUITABLE AT THE PRE-DESIGN STAGE OF ITS PREPARATION FOR EXPLOITATION

T. I. Makarenko, V. B. Kuntsevich

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. The generalize desirability function of Harrington which can include a variety of particular parameters such as technological, technical and economic, qualitative characteristics is widely used in the search for optimal conditions in various areas of the national economy. The analysis of the tasks solved during the research and project works showed that this method can be successfully applied in the peat industry.

The article, as an example, considers the selection method for the peat deposit from several suitable for extraction of sod peat intended for the production of activated charcoals, which at the current time is the best option. It is shown that the use of the generalized desirability function makes it possible to achieve acceptable results at the stage of pre-project preparation, without recourse to complex mathematical calculations, which are the basis of a standard feasibility study. Thus, the proposed method allows to reduce labor and financial costs.

Keywords: peatland; activated charcoal; influencing factors; deposit selection methods; desirability scale.

For citation. Makarenko T. I., Kuntsevich V. B. The method of selecting of peatland from several suitable at the pre-design stage of its preparation for exploitation. *Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 198–206.

Введение. В Республике Беларусь планируется строительство горно-химического комбината по глубокой комплексной переработке торфа с получением различной продукции с высокой добавленной стоимостью. Одним из основных продуктов комбината, согласно разработанному бизнес-плану, является активированный уголь (АУ), который в настоящее время в стране не производится. Ранее выполненными исследованиями показано, что АУ, полученный из торфа верхового типа, обладает высокой адсорбционной активностью как по йоду, так и по метиленовому голубому [1]. Строительство комбината предполагается осуществить в Крупском районе Минской области (пос. Ухвала,

ОАО «Туршовка»). В настоящее время предприятие специализируется на добыче кускового и фрэзерного торфа. Последний предназначен для поставок на экспорт в кипованном виде.

Строительство комбината в пос. Ухвала обусловлено тем, что ОАО «Туршовка» располагает развитой инфраструктурой, квалифицированными кадрами, что, с одной стороны, существенно сократит затраты на капитальное строительство, а с другой – обеспечит стабильное социально-экономическое развитие региона.

Анализ торфяного фонда Крупского района показал, что в районе имеется несколько месторождений верхового типа, которые по качественной характеристике залежи пригодны для добычи кускового торфа – сырья для производства АУ. Задача состоит в том, чтобы из нескольких пригодных выбрать одно, которое на текущий момент времени является наиболее оптимальным вариантом.

Методы исследования и полученные результаты. Задачи такого рода традиционным способом решаются путем технико-экономического обоснования на стадии предпроектной подготовки, что требует существенных финансовых и трудовых затрат. В то же время в различных отраслях народного хозяйства (медицине, металлургии, фармацевтической промышленности, животноводстве, при разработке оптимальных рецептур новых изделий) подобные задачи успешно решаются с использованием метода, который значительно упрощает достижение приемлемых результатов, не прибегая к сложным математическим расчетам.

Сущность метода состоит в том, что необходимо обобщить большое количество откликов, определяющих объект, в единый количественный признак, для чего требуется ввести для каждого из них некоторую безразмерную величину. Одним из наиболее удобных способов интегрального построения отклика является обобщенная функция желательности Харрингтона [2]. В основе построения функции лежит идея преобразования натуральных значений влияющих факторов в безразмерную шкалу желательности, в которую могут входить самые разнообразные частные отклики: технологические, технико-экономические, экономические, качественные характеристики исследуемого продукта и др.

Функция желательности может быть построена по формуле

$$d_i = \exp[-\exp(-y_i)], \quad (1)$$

где d_i – оценка частного отклика; y_i – значение частного отклика в кодированном виде.

На практике чтобы получить шкалу желательности рекомендуется пользоваться готовыми разработанными таблицами соответствий между отношениями предпочтения в эмпирической и числовой системах (табл. 1).

Таблица 1. Стандартные отметки на шкале желательности

Table 1. Standard marks on the desirability scale

Оценка желательности	Значение функции желательности	Оценка желательности	Значение функции желательности
Очень хорошо	1,00–0,80	Плохо	0,37–0,20
Хорошо	0,80–0,63	Очень плохо	0,20–0,00
Удовлетворительно	0,63–0,37	–	–

Выбор отметок на шкале желательности 0,63 и 0,37 объясняется удобством вычислений: $0,63 \approx 1 - (1/e)$, $0,37 \approx 1/e$. Значение $d = 0,37$ обычно соответствует границе допустимых значений показателей (параметров) и является точкой перегиба кривой.

Для получения кодированных значений y_i в большинстве случаев используется три равномерных интервала, т. е. выбран код: -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3.

Допускается значения показателей кодированной шкалы распространять и в отрицательную область, если значения рассматриваемых факторов ниже граничного возможны в практике.

Ранее проведенными маркетинговыми исследованиями установлено, что фактическая годовая потребность Республики Беларусь в АУ различного назначения за период с 2017 по 2020 г. колебалась в пределах 360–700 т, хотя в перспективе она может составить не менее 1 тыс. т [3].

Согласно данным АО «Электростальское научно-производственное объединение “Неорганика”» (Россия), выход АУ из кускового торфа влажностью 30 % равен 8 % по массе. Таким образом, чтобы обеспечить минимальную годовую программу производства АУ в количестве 360 т на протяжении 35 лет, промышленные запасы торфа на месторождении должны составлять не менее 158 тыс. т 30%-ной влажности. Так как в кадастровом справочнике приведены геологические запасы торфа, чтобы перейти к промышленным запасам, необходимо учесть все потери залежи, которые неизбежны

при добыче кондиционной продукции. Потери залежи рассчитываются для каждого конкретного месторождения при разработке проекта на его освоение, в иных случаях рекомендуется среднестатистический коэффициент использования залежи при добыче кускового торфа способом послойно-щелевого фрезерования принимать равным 0,65 [4]. Кроме того, в кадастровом справочнике запасы торфа приведены в расчете на 40%-ную влажность, а так как влажность кускового торфа – сырья для производства АУ – должна быть не более 30 %, это обстоятельство следует учитывать при определении запасов торфа, необходимых для производства указанной продукции.

Согласно литературным данным, сырьем для производства АУ служит торф верхового типа, степенью разложения не менее 25 % и зольностью не более 2 % [5].

Ниже приведена характеристика выбранных для оценки месторождений, которые расположены в Крупском районе и по качественной характеристике залежи пригодны для производства АУ [6].

1. Торфяное месторождение «Селище» (кадастровый номер 353):

запасы торфа (здесь и далее – геологические) – 1970 тыс. т;

площадь в промышленных границах – 510 га;

средняя степень разложения – 26 %;

средняя зольность – 1,9 %;

средняя мощность залежи с требуемой характеристикой торфа – 2,21 м;

расстояние до ОАО «Туршовка» – 20 км;

возможный срок начала добычи кондиционного сырья (с момента окончания болотно-подготовительных работ) – 2 года;

по гидрологическим условиям относится к трудноосушаемым.

2. Торфяное месторождение «Галое» (кадастровый номер 369):

запасы торфа – 1780 тыс. т;

площадь в промышленных границах – 513 га;

средняя степень разложения – 28 %;

средняя зольность – 1,8 %;

средняя мощность залежи с требуемой характеристикой торфа – 2,67 м;

расстояние до ОАО «Туршовка» – 11 км;

возможный срок начала добычи кондиционного сырья – 1 год;

по гидрологическим условиям относится к очень трудноосушаемым.

3. Торфяное месторождение «Заболотье» (кадастровый номер 376):

запасы торфа – 843 тыс. т;

площадь в промышленных границах – 167 га;

средняя степень разложения – 30 %;

средняя зольность – 2,0 %;

средняя мощность залежи с требуемой характеристикой торфа – 3,36 м;

расстояние до ОАО «Туршовка» – 11 км;

возможный срок начала добычи кондиционного сырья – 2 года;

по гидрологическим условиям относится к очень трудноосушаемым.

4. Торфяное месторождение «Туршевка–Чертово» (кадастровый номер 402)

запасы торфа – 1265 тыс. т;

площадь в промышленных границах – 303 га;

средняя степень разложения – 35 %;

средняя зольность – 1,4 %;

средняя мощность залежи с требуемой характеристикой торфа – 3,31 м;

расстояние до ОАО «Туршовка» – 7 км;

возможный срок начала добычи кондиционного сырья – 9 лет;

по гидрологическим условиям относится к очень трудноосушаемым.

Что касается торфяного месторождения «Туршевка–Чертово», следует отметить, что оно впервые было исследовано в 1954 г. в результате проведения детальной разведки категории «А». В 2015 г. месторождение доразведано с целью уточнения количественных и качественных характеристик залежи [7].

Установлено, что на действующем участке (южная часть месторождения, поле № 7, 7^a, 8) геологические запасы торфа, пригодные для производства АУ, составляют 241,8 тыс. т.

Естественно предположить, что, если бы горно-химический комбинат уже строился, наиболее оптимальны вариантом было бы использование запасов торфа на действующем участке. Однако в связи с тем, что сроки строительства комбината не определены, а на указанных полях идет интенсивная добыча кускового и фрезерного торфа, есть вероятность того, что в случае принятия решения о его строительстве, к моменту окончания монтажных и пуско-наладочных работ, запасы торфа, при-

годные для получения АУ, будут исчерпаны. Учитывая изложенное, в примере рассматривается перспективный участок площадью 303 га в границах промышленной глубины залежи, который расположен в северной части месторождения.

Для получения кодированных значений y_i приняты три равномерных интервала: -3, -2, -1, 0, +1, +2, +3. Причем, интервал «+3» соответствует лучшему значению свойства и на шкале желательности $d = 1$. Чтобы приспособить такую стандартную кривую к реальным частным откликам, необходимо установить основные факторы, влияющие на выбор месторождения и пределы их изменения. Тип залежи не рассматривается, так как эта характеристика всех четырех месторождений идентична.

1. Степень разложения (y_1). Чем выше степень разложения торфа, тем лучше адсорбционная активность углей, как по йоду, так и по метиленовому голубому [8]. Так как в Республике Беларусь встречаются залежи верхового типа со степенью разложения 50 %, принимаем, что это значение на шкале желательности соответствует единице. Предельно допустимое значение степени разложения – 25 %, что на кодированной шкале соответствует отметке «0», а на шкале желательности – 0,37.

2. Зольность (y_2). Зола является балластом в торфе, и чем выше этот показатель, тем хуже качество АУ. На кодированной шкале за лучший показатель принят торф зольностью 0,5 %, так как это реальный минимальный показатель на практике. Ноль на кодированной шкале соответствует предельно допустимому значению зольности (2,0 %).

3. Логистический показатель (y_3). Согласно статистическим данным экономически целесообразно, если расстояние от мест добычи торфа до пункта его переработки не превышает 50 км. На оси ординат это соответствует оценке желательности 0,37. В некоторых случаях перерабатывающие предприятия, из-за истощения рядом расположенных сырьевых баз, вынуждены транспортировать торф и на большие расстояния, что существенно ухудшает экономические показатели производства, а на кодированной шкале данный показатель входит в отрицательную область. За лучший показатель на кодированной шкале принято расстояние 0,5 км, что на шкале желательности соответствует «1».

4. Изученность месторождений (y_4). Три месторождения (№ 353, 369, 376) исследованы в 1936 г. в результате проведения предварительных разведок (категория С₁). Чем выше категория разведки, тем достовернее данные о количественных и качественных показателях торфяной залежи, в связи с чем, на шкале желательности «1» присвоена разведке категории «А», выполненной в соответствии с инструкциями 1964 и 1983 г., низшее значение – разведке категории «С₂», выполненной до 1948 г., что на шкале желательности соответствует 0,37.

5. Гидрологические условия (y_5).

Данный показатель оценим по пятибалльной системе:

легкоосушаемые торфяные месторождения – 5 баллов;

трудноосушаемые торфяные месторождения – 4 балла;

очень трудноосушаемые – 3 балла;

принудительное осушение – 2 балла;

6. Капитальные вложения на болотно-подготовительные работы (y_6).

Необходимая площадь для обеспечения программы добычи торфа

$$F = \frac{P(100 - w_k)}{h_{cp} \rho (100 - w_3) k_{iz}}, \quad (2)$$

где F – необходимая площадь в границах промышленной глубины залежи, га; P – программа добычи торфа за весь период деятельности предприятия, т; h_{cp} – средняя мощность слоя кондиционного сырья, м; ρ – плотность залежи, т/м³; w_3 – средняя влажность залежи, %; w_k – конечная влажность, %; $k_{iz} = 0,65$ – коэффициент использования залежи.

Программа добычи торфа рассчитана из фактического потребления АУ в Республике и стабильной работы предприятия на протяжении 35 лет.

Торфяное месторождение «Селище»:

$$F = 158\ 000 \cdot (100 - 30) / (2,21 \cdot 0,999 \cdot (100 - 91) \cdot 0,65) = 856\ 330 \text{ м}^2 = 86 \text{ га.}$$

Торфяное месторождение «Галое»:

$$F = 158\ 000 \cdot (100 - 30) / (2,67 \cdot 0,999 \cdot (100 - 91) \cdot 0,65) = 708\ 798 \text{ м}^2 = 71 \text{ га.}$$

Торфяное месторождение «Заболотье»:

$$F = 158\ 000 \cdot (100 - 30) / (3,36 \cdot 1,013 \cdot (100 - 91) \cdot 0,65) = 555\ 457 \text{ м}^2 = 56 \text{ га.}$$

Торфяное месторождение «Туршевка-Чертово»:

$$F = 158\ 000 \cdot (100 - 30) / (3,31 \cdot 1,054 \cdot (100 - 91) \cdot 0,65) = 542\ 187 \text{ м}^2 = 54 \text{ га.}$$

Согласно данным, представленных институтом «Белгипротопгаз», средняя стоимость подготовки 1 га площади торфяных месторождений верхового типа, находящихся в естественном состоянии, составляет 40 тыс. руб.

Тогда стоимость подготовки участка на месторождении, тыс. руб.: Селище – 3440; Галое – 2840; Заболотье – 2240; Туршевка–Чертово – 2160.

Учитывая, что мощность слоя торфа для производства АУ на торфяном месторождении «Туршевка–Чертово» приближается к максимальной для месторождений Крупского района, а следовательно, капитальные вложения на болотно-подготовительные работы в этом случае минимальны, принимаем, что на кодированной шкале отметке «+3» соответствует значение 2100 тыс. руб. Границное значение стоимости работ 4800 тыс. руб., на кодированной шкале отметка «0», рассчитано исходя из условия, что минимальная глубина залежи в неосушеннем состоянии при разработке месторождения должна быть не менее 1,5 м [9].

7. Экологический показатель (y_7).

Воздействие на окружающую среду в результате подготовки месторождения к эксплуатации и добычи на нем торфа детально оценивается в абсолютных величинах на стадии разработки проекта. На предпроектном этапе при решении задач, подобных рассматриваемой, можно достичь приемлемого результата, не прибегая к сложным расчетам, а путем сравнения соответствующих показателей исследуемых объектов.

Извлечение торфяных месторождений из природной среды и, как следствие, потеря ими водо-регулирующей и водоочистительных функций, в значительной степени зависят от размера площади подготовки месторождения к эксплуатации. Осушение и выработка месторождения неизбежно приводят к негативным последствиям: снижению уровня стояния грунтовых вод как на самом месторождении, так и на прилегающих территориях, увеличению степени пожароопасности. Очевидно, что с точки зрения экологии частная желательность выше у месторождения, разрабатываемая площадь которого наименьшая. На кодированной шкале это соответствует отметке «+3», а на шкале желательности – 1,0. Границное значение площади (120 га) определено из условия, что месторождение не подлежит разработке, если средняя глубина залежи менее 1,5 м в неосушеннем состоянии. На оси ординат желательность в этом случае равна 0,37.

8. Возможный срок начала добычи кондиционного сырья (y_8).

Если предположить, что все работы, связанные со строительством комбината, будут начаты в 2021 г., предпочтение следует отдать месторождению, у которого кондиционное сырье находится непосредственно под очесным слоем. В этом случае время будет затрачено на предварительное осушение, сводку древесной растительности, снятие очесного слоя, углубление осушительной сети до проектных отметок, выравнивание и профилирование поверхности карт. При подготовке к эксплуатации торфяного месторождения верхового типа на это потребуется 3–4 года (в зависимости от сложности осушения). Рассматривая этот фактор, необходимо отметить, что худший показатель у торфяного месторождения «Туршевка–Чертово», так как под очесом находится слой торфа малой степени разложения (<25 %), средняя мощность которого составляет 2,25 м [7].

Толщина сработки залежи за сезон при фрезерном способе добычи торфа рассчитывается по формуле

$$H_c = \frac{hnak\beta\eta_x}{\eta_{nh}}, \quad (3)$$

где H_c – толщина сработки залежи за сезон, м; h – глубина фрезерования при добыче торфа, предназначенного для кипования, м [6]; n – количество циклов для Минской области [6]; a – коэффициент сбора, равный 0,65 [6]; k – коэффициент увеличения количества циклов на профилированных полях при механической уборке, равный 1,1; β – коэффициент использования площади полей; η_x – коэффициент, учитывающий потери торфа при хранении; η_{nh} – коэффициент, учитывающий пнистость залежи.

$$\beta = (100 - \Pi) / 100, \quad (4)$$

где Π – потери площади полей при фрезерном способе добычи торфа бункерными машинами, %:

$$\Pi = \frac{2b_n \cdot 100}{2L} + \frac{b_k L_p \cdot 100}{bL}, \quad (5)$$

где $b_{\text{п}}$ – ширина подштабельной полосы, включая валовые каналы, м; L – длина карты, м; $b_{\text{к}}$ – ширина картового канала, включая бровки, м; $L_{\text{р}}$ – рабочая длина карты, м; b – ширина карты, м;

$$\Pi = \frac{2 \cdot 45 \cdot 100}{2 \cdot 500} + \frac{1,7 \cdot 410 \cdot 100}{20 \cdot 500} = 16 \%,$$

$$\beta = (100 - 16) / 100 = 0,84,$$

$$\eta_x = \frac{100 - a}{100}, \quad (6)$$

где $a = 5 \%$ – потери фрезерного торфа верхового типа 60%-ной влажности при хранении [6];

$$\eta_x = \frac{100 - 5}{100} = 0,95,$$

$$\eta_n = \frac{100 - u}{100}, \quad (7)$$

где u – пнистость залежи, %.

Согласно данным детальной разведки, средняя пнистость перспективного участка торфяного месторождения «Туршевка–Чертово» составляет 1,0 % [7].

$$\eta_n = \frac{100 - 1}{100} = 0,99.$$

$$H_c = \frac{0,015 \cdot 29 \cdot 0,65 \cdot 1,1 \cdot 0,84 \cdot 0,95}{0,99} = 0,25 \text{ м.}$$

Таким образом, некондиционный слой торфа ($R \leq 25 \%$) толщиной 2,25 м будет выработан за $2,25 : 0,25 = 9$ лет.

Чтобы приспособить стандартную кривую к реальным частным откликам необходимо табл. 1 дополнить информацией, приведенной в табл. 2.

Таблица 2. Распределение значений влияющих факторов по диапазонам желательности

Table 2. Distribution of values of influencing factors by ranges of desirability

Отметки на шкале желательности (d_i)	y_i^*	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8
1,00–0,80	3,00	50	0,5	0,5	A	5	2100	50	0,5
0,80–0,63	1,50	40	1,0	10	B	4	2500	60	1,0
0,63–0,37	0,85	30	1,5	25	C ₁	3	3200	75	2,0
0,37–0,20	0,00	25	2,0	50	C ₂	2	4800	120	9,0
0,20–0,00	-0,50	-	-	-	-	-	-	-	-

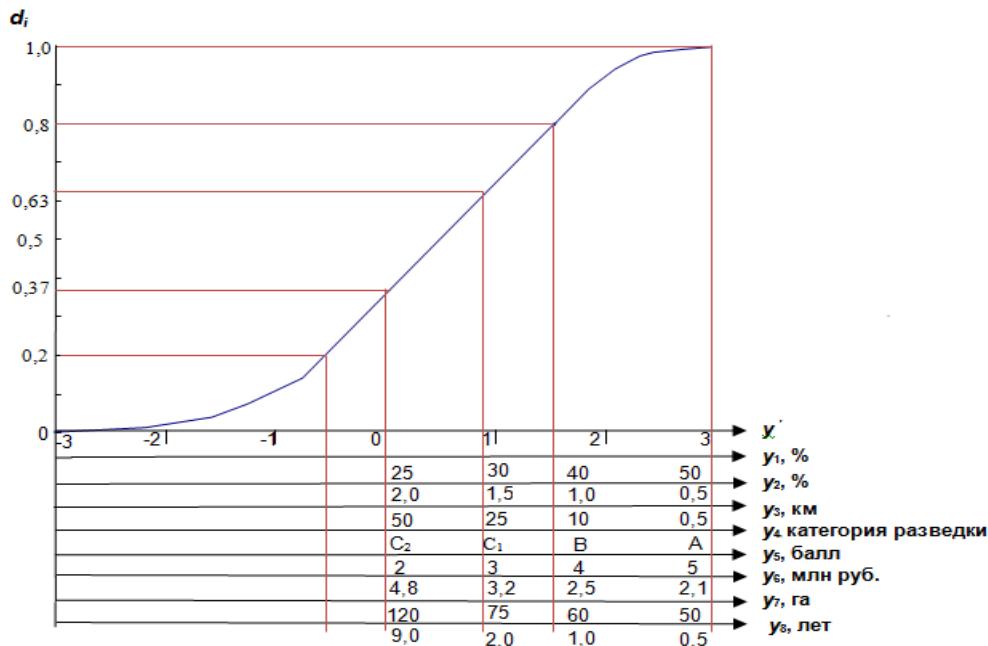
*Стандартные отметки на оси абсцисс, необходимые для построения шкалы желательности.

Промежуточные величины факторов и их ранжирование по диапазонам желательности получены исходя из реальных условий их влияния на исследуемый объект, а также логических размышлений специалистов, какое значение каждого фактора должно находиться в том или ином диапазоне отметок на шкале желательности.

На рисунке построена шкала желательности выбора торфяного месторождения в качестве сырьевой базы для производства АУ.

На оси ординат нанесены значения желательности, изменяющиеся от «0» до «1». Но оси абсцисс указаны значения отклика, записанные в условном масштабе.

В табл. 3 приведены натуральные значения факторов и их частные желательности, полученные по шкале.



Шкала желательности выбора торфяного месторождения
в качестве сырьевой базы для производства активированных углей

The desirability scale of choosing a peat deposit as a raw material base
for the production of activated charcoals

Таблица 3. Натуральные значения факторов и их частные желательности

Table 3. Natural values of factors and their particular desirability

Месторождение	Натуральные значения факторов								Частные желательности							
	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8
Селище	26	1,9	20	C ₁	4	3,44	86	2	0,39	0,39	0,69	0,63	0,80	0,61	0,57	0,63
Галое	28	1,8	11	C ₁	3	2,80	71	1	0,60	0,42	0,79	0,63	0,63	0,71	0,66	0,80
Заболотье	30	2,0	11	C ₁	3	2,24	56	2	0,63	0,37	0,79	0,63	0,63	0,93	0,88	0,63
Туршевка-Чертово	35	1,4	7	A	3	2,16	54	9	0,71	0,65	0,85	1,00	0,63	0,98	0,89	0,37

Решение о выборе месторождения принимается по обобщенной функции желательности, которая является средним геометрическим частных желательностей:

$$D = \sqrt[8]{d_1 d_2 d_3 d_4 d_5 d_6 d_7 d_8}, \quad (8)$$

Обобщенная функция желательности для месторождения:

$$\text{Селище: } D_1 = \sqrt[8]{0,39 \cdot 0,39 \cdot 0,69 \cdot 0,63 \cdot 0,80 \cdot 0,61 \cdot 0,57 \cdot 0,63} = 0,5728;$$

$$\text{Галое } D_2 = \sqrt[8]{0,60 \cdot 0,42 \cdot 0,79 \cdot 0,63 \cdot 0,63 \cdot 0,71 \cdot 0,66 \cdot 0,80} = 0,6441;$$

$$\text{Заболотье } D_3 = \sqrt[8]{0,63 \cdot 0,37 \cdot 0,79 \cdot 0,63 \cdot 0,63 \cdot 0,93 \cdot 0,88 \cdot 0,63} = 0,6638;$$

$$\text{Туршевка-Чертово } D_4 = \sqrt[8]{0,71 \cdot 0,65 \cdot 0,85 \cdot 1,00 \cdot 0,63 \cdot 0,98 \cdot 0,89 \cdot 0,37} = 0,7290.$$

Лучший показатель по обобщенной функции желательности получен для торфяного месторождения «Туршевка-Чертово». Здесь следует отметить, что это несколько нетипичный случай. Как было отмечено выше, над кондиционным торфом ($R \geq 25\%$) находится слой торфа низкой степени разложения и его необходимо убрать, чтобы начать добывчу торфа требуемого качества. На это потребует-

ся 9 лет при условии, что добыча будет осуществляться фрезерным способом. В данном случае скажалось, что частные желательности большинства факторов месторождения «Туршевка–Чертово» значительно выше, чем аналогичные значения факторов остальных рассматриваемых месторождений. И это оказало решающее влияние на величины обобщенных функций желательности. Выбор месторождения из четырех возможных для добычи кускового торфа в этом случае будет зависеть от дополнительных конкретных условий: сроков начала и окончания строительства горно-химического комбината, сроков выполнения болотно-подготовительных работ, оставшихся запасов торфа на действующем участке месторождения «Туршевка–Чертово». И если время начала эксплуатации участка с кондиционным сырьем не удовлетворит производственные потребности, разработке подлежит следующее месторождение, которое находится рангом ниже (торфяное месторождение «Заболотье»). В заключение следует отметить, что при выборе факторов и степени их влияния на исследуемый объект, а также пределов их изменения, необходимо руководствоваться данными, приведенными в научных и нормативных материалах. При их отсутствии решение принимается коллегиально, с учетом мнения специалистов, хорошо знающих торфяное производство. При обобщении ряда мнений и установлении степени согласованности между ними рекомендуется воспользоваться методом ранговой корреляции.

Заключение. В настоящее время при выборе торфяного месторождения (участка) из нескольких возможных, используют традиционный способ, основанный на технико-экономическом обосновании, что требует существенных финансовых и трудовых затрат. Рассмотренный в статье альтернативный метод, в основу которого положена обобщенная функция желательности Харрингтона, позволяет на предпроектной стадии подготовки документации на разработку торфяного месторождения получить приемлемый результат не прибегая к сложным математическим расчетам. Метод положительно оценен специалистами института Белгипротопгаз, которые непосредственно занимаются разведкой торфяных месторождений и разработкой проектов на ввод их в эксплуатацию. По их данным, применение метода позволяет снизить в 2,3 раза трудозатраты и в 4,6 раза финансовые средства по сравнению со стандартным методом.

С некоторой долей вероятности можно предположить, что при решении подобных задач в ряде случаев изложенному методу может быть отдано предпочтение, так как он позволяет количественно и однозначно оценить степень влияния всех факторов на исследуемый объект, что весьма сложно осуществить при традиционном способе.

Список использованных источников

1. Оценить пригодность торфяных запасов Республики Беларусь как технологического сырья для производства углеродных сорбентов : отчет о НИР (промежуточный) / Институт проблем использования природных ресурсов и экологии НАН Беларуси. – Минск, 1999. – 78 с. – № ГР 19993950.
2. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М., 1976. – 279 с.
3. Организация изготовления опытной партии торфяных активных углей, проведение их испытаний в условиях потенциальных потребителей с целью получения отзывов и заключений о качественных характеристиках используемых торфяных активных углей и возможных объемах их потребления : отчет о НИР (заключительный) / Институт природопользования НАН Беларуси. – Минск, 2018. – 85 с. – № ГР 20180222.
4. Варенцов, В. С. Технология производства фрезерного торфа / В. С. Варенцов, А. В. Лазарев. – М. : Недра, 1970. – 288 с.
5. Мухин, В. М. Производство и применение углеродных адсорбентов / В. М. Мухин, В. Н. Клушин. – М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2012. – 307 с.
6. Справочник по торфу / под ред. А. В. Лазарева и С. С. Корчунова. – М. : Недра, 1982. – 760 с.
7. Отчет о доразведке торфа на участке «Захаровка» торфяного месторождения «Туршевка–Чертово» Крупского района Минской области с подсчетом запасов по состоянию на 21.09.2015 г. / Институт природопользования НАН Беларуси ; рук. темы: Б. В. Курзо, В. А. Тумашков. – Минск, 2015. – 167 с. – № ГР 510-5-15/18.
8. Дрожалина, Н. Д. Влияние модифицирующих добавок на пористую структуру углеродных адсорбентов из торфа / Н. Д. Дрожалина, Н. А. Булгакова, В. К. Жуков // Весці Акад. навук БССР. Сер. хім. науок. – 1987. – № 6. – С. 98–101.
9. Технологические нормы проектирования открытых горных работ на торфяных месторождениях сырьевых баз предприятий ГПО «Белтопгаз»: разработчик – Институт «Белгипротопгаз». – Минск, 2019. – 102 с.

References

1. *Otsenit prigodnost torfyanykh zapasov Respubliki Belarus kak tekhnologicheskogo syria dlya proizvodstva uglerodnykh sorbentov* [To assess the suitability of peat reserves of the Republic of Belarus as the technological raw materials for the production of carbon sorbents]. *Otchet o NIR (promezhutochnyy)* [Research report (interim)]. Institute of Problems of Use of Natural Resources and Ecology of the NAS of Belarus. Minsk, 1999, 78 p. St. Reg. no. 19993950. (in Russian)
2. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovskiy Yu. V. *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimalnykh usloviy* [Planning an experiment to find optimal conditions]. Moscow, 1976, 279 p. (in Russian)
3. *Organizaciya izgotovleniya optytnoj partii torfyanyh aktivnyh uglej, provedenie ih ispytanij v usloviyah potencial'nyh potrebitelej s cel'yu poluchenija otzyvov i zaklyuchenij o kachestvennyh harakteristikah ispytuemyh torfyanyh aktivnyh uglej i vozmozhnyh ob'emah ih potrebleniya* [Organization of production of a pilot batch of peat activated coals, testing them in the conditions of potential consumers in order to obtain feedback and conclusions on the quality characteristics of the tested peat activated coals and possible volumes of their consumption]. *Otchet o NIR (zaklyuch.)* [Research report (final)]. State Scientific Institution 'Institute of Nature Management of the NAS of Belarus'. Minsk, 2018, 85 p. St. Reg. no. 20180222. (in Russian)
4. Varencov V. S., Lazarev A. V. *Tekhnologiya proizvodstva frezernogo torfa* [Milled peat production technology]. Moscow, 2012, 288 p. (in Russian)
5. Mukhin V. M., Klushin V. N. *Proizvodstvo i primeneniye uglerodnykh adsorbentov* [Production and use of carbon adsorbents]. Moscow, 2012, 307 p. (in Russian)
6. *Spravochnik po torfu* [Reference of peat]. Ed. A. V. Lazareva and S. S. Korchunova. Moscow, Nedra Publ., 1982. 759 p. (in Russian)
7. *Otchet o dorazvedke torfa na uchastke «Zaharovka» torfyanogo mestorozhdeniya «Turshevka-Chertovo» Krupskogo rajona Minskoy oblasti s podschetom zapasov po sostoyaniyu na 21.09.2015 g.* [Report on the additional exploration of peat at the "Zaharovka" site of the "Turshevka-Chertovo" peat deposit in the Krupskiy district of the Minsk region with the calculation of reserves as of 09.21.2015]. State Scientific Institution 'Institute of Nature Management of the NAS of Belarus'. Minsk, 2015, 167 p. St. Reg. no. 510-5-15/18. (in Russian)
8. Drozhalina N. D., Bulgakova N. A., Zhukov V. K. *Vliyanie modifitsiruyushchih dobavok na poristuyu strukturu uglerodnykh adsorbentov iz torfa* [Influence of modifying additives on the porous structure of carbon adsorbents from peat]. *Vesti AN BSSR. Ser. him. navuk = Vesti of the Academy of Sciences of the BSSR. Chemical Sci. Series*, 1987, no. 6, pp. 98–101. (in Russian)
9. *Tekhnologicheskie normy proektirovaniya otkrytyh gornyh rabot na torfyanyh mestorozhdeniyah syrevyh baz predpriyatij GPO «Beltopgaz»* [Technological standards for the design of open pit mining in peat deposits of raw material bases of enterprises of the State Production Association 'Beltopgaz']. *Institut «Belgiprotogaz»* [Institute 'Belgiprotogaz']. Minsk, 2019, 102 p. (in Russian)

Информация об авторах

Кунцевич Виктор Болеславович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: info@nature-nas.by

Макаренко Татьяна Ивановна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: Makarenko.IP@mail.ru

Information about the authors

Victor B. Kuntsevich – Ph. D. (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: info@nature-nas.by

Tatiana I. Makarenko – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: Makarenko.IP@mail.ru

ОЦЕНКА ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА КОМПОЗИТНЫХ ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТОВ ИЗ ФРЕЗЕРНОГО ТОРФА И БИОМАССЫ

О. И. Родькин¹, Е. В. Черненок¹, В. М. Сивко², В. А. Ракович³

¹*Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь;*

²*ОАО «ТБЗ Усяж», Смолевичский р-н, Минская обл., Беларусь;*

³*Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь*

Аннотация. Цель исследований – дать эколого-экономическую оценку производству композитных брикетов из фрезерного торфа и возобновляемой биомассы. В качестве компонента биотоплива для экспериментальных образцов композитных брикетов использовали солому сельскохозяйственных культур и отходов деревообработки (опилки, стружка, щепа) в соотношении торф : биомасса – 25 : 75, 50 : 50, 75 : 25. Разработаны технологические карты производства биомассы для шести вариантов заготовки и подготовки сырья, на основе которых выполнен расчет выбросов в атмосферный воздух и себестоимости. Минимальные объемы выбросов (оксидов углерода, азота, серы, углеводородов, твердых частиц) характерны для технологии заготовки и подготовки сырья на основе опилок и максимальные для сырья на основе соломы с прессованием в тюки стандартного размера. Объемы выбросов диоксида углерода колеблются от 6 кг/т (опилки) до 19 кг/т (солома, прессованная в тюки стандартного размера). Себестоимость заготовки и подготовки опилок при транспортировке до 10 км составляет около 11 руб/т сырья, древесной щепы и стружки – 19 руб/т. При использовании в качестве компонента композитного топлива соломы себестоимость составляет от 26 до 33 руб/т сырья в зависимости от выбранной технологии. Установлены зависимости между соотношением компонентов топлива и основными технологическими характеристиками брикетов, которые позволяют прогнозировать возможность производства топлива с требуемыми параметрами. Увеличение доли растительной и древесной биомассы положительно сказывается на таких характеристиках, как зольность, влажность, содержание серы. Низшая теплота сгорания при добавлении биомассы имеет небольшую тенденцию к снижению. По комплексной оценке оптимальные технологические показатели выявлены для композитного топлива на основе опилок, для которого характерны более низкие показатели влажности и зольности и более высокие показатели удельной теплоты сгорания.

Ключевые слова: топливо; композитные брикеты; торф; солома; древесные отходы.

Для цитирования. Родькин О. И., Черненок Е. В., Сивко В. М., Ракович В. А. Оценка эколого-экономической эффективности производства композитных топливных брикетов из фрезерного торфа и биомассы // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 207–220.

ASSESSMENT OF ECOLOGICAL AND ECONOMIC EFFICIENCY OF COMPOSITE FUEL PRODUCTION FROM THE PEAT AND BIOMASS

A. I. Rodzkin¹, E. V. Chernonenok¹, V. M. Sivko², V. A. Rakovitch³

¹*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus;*

²*JSC "PBF Usiahz", Usyazh village, Smolevichi district, Minsk region, Belarus;*

³*Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

Abstract. The goal of investigation was assessment of environmental impact and economic efficiency of composite briquette production on the base of peat and renewable biomass. Biomass for composite briquettes was obtained from straw (cereal crops and rape) and wood residues (sawdust, chips) Experimental composite briquette were produced from the mixture of peat and biomass in relation to – 25 : 75, 50 : 50, 75 : 25. The technological cards of biomass feedstock production for 6 variants were developed. Technological cards were used for calculation of emission into the atmosphere during life cycle of biomass production and prime cost of biomass. The lowest volume of gas (SO₂, NO_x, CO₂) and particulate matter (PM) emission was installed for biomass production from the sawdust. The highest volume of emission was installed for production of biomass from the straw with pressing it in standard bale. The volume of CO₂ emission for the sawdust production was 6 kg per ton of biomass and for the standard bale of straw was 19 kg per ton of biomass. Prime cost of sawdust production (lowest) was 11 belarusian rubles per ton of biomass, for the wood chips was

19 rubles per ton and for the straw varied from 26 to 33 rubles per ton in depend of technology. It was installed that growth of biomass rate in composite briquette had a good influence on number of basic fuel characteristics (contents of ash, sulfur and moisture). The variation of calorific value of briquette was not significant in depend of biomass contents. In accordance with assessment of all characteristics the better briquettes was obtained from the peat and sawdust.

Keywords: fuel; composite briquette; peat; straw; wood residues.

For citation. Rodzkin A. I., Chernonok E. V., Sivko V. M., Rakovitch V. A. Assessment of ecological and economic efficiency of composite fuel production from the peat and biomass. *Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 207–220.

Введение. Торф является одним из наиболее значимых природных ресурсов для Республики Беларусь. Наша страна занимает 17-е место в мире и 5-е место в Европе по абсолютной площади торфяников. В Беларуси находится около 9 тыс. торфяных месторождений, общая площадь которых составляет 2,4 млн га, а общие геологические запасы торфа оцениваются в 4 млрд т, что позволяет рассматривать его как перспективный местный источник энергии, как в ближайшем, так и отдаленном будущем. Для производства топливных торфяных брикетов отведено 17,2 тыс. га площадей торфяных месторождений (0,72 % от общей площади торфяных месторождений) с запасами торфа в количестве 33,2 млн т (0,84 % от общих запасов торфа в республике) [1]. Производство брикетов из фрезерного торфа за последнее десятилетие колебалось в диапазоне 0,7–1,4 млн т в год, при этом с 2010 по 2019 г. оно сократилось с 1317 тыс. до 961 тыс. т [2].

Поэтому следует учитывать, что несмотря на значительные запасы торфа, необходимо принять во внимание тот факт, что его использование в топливных целях неуклонно сокращается, а также что торф относится к категории исчерпаемых и невозобновляемых природных ресурсов. Это значит, что за основу при эксплуатации торфяных ресурсов следует принять принцип рационального природоиспользования и учитывать, что этот ресурс имеет комплексное значение.

С одной стороны, наряду с топливными брикетами на основе торфа, можно получить целый ряд других видов продукции, которые эффективно используются в различных отраслях экономики. Торф применяется при производстве ряда продуктов для сельскохозяйственного назначения, таких как регуляторы роста, препараты фунгицидного и бактерицидного действия, биологически активные гуматодержащие кормовые добавки и консерванты кормов. Полученные на основе торфа сорбционные материалы применяются в сфере охраны окружающей среды в качестве фильтров для очистки сточных вод и выбросов в атмосферный воздух [3].

С другой стороны, доля ископаемого топлива, как в глобальном, так и республиканском масштабе, имеет четкую тенденцию к сокращению. Так, согласно национальным целям устойчивого развития Республики Беларусь доля первичной энергии из возобновляемых источников энергии к объему валового потребления топливно-энергетических ресурсов с 2020 по 2030 г. должна возрасти с 6,2 до 8,0 % [4].

В связи с этим производство и использование композитного топлива с частичной заменой торфа на возобновляемую биомассу имеют как экономическое, так и экологическое значение. Для производства композитных топливных брикетов на основе фрезерного торфа и биомассы целесообразно использовать инфраструктуру и возможности торфопредприятий. При этом более эффективно будут задействованы источники биомассы, расположенные в непосредственной близости от предприятия. К потенциальным источникам биомассы, которые могут быть использованы на энергетические цели в регионе торфобрикетных предприятий, относятся: естественная болотная травянистая и кустарниковая растительность на территории выработанных торфяных месторождений; растительные остатки, образовавшиеся на сельскохозяйственных предприятиях; отходы деревоперерабатывающей и пищевой промышленности; органические твердые коммунальные отходы; плантации энергетических культур на выработанных торфяных месторождениях и др. Из них в настоящее время наиболее значимыми источниками биомассы, которую можно использовать в энергетических целях, являются солома сельскохозяйственных культур и отходы деревопереработки.

Доля сельскохозяйственного сектора в мировом производстве возобновляемой энергии по прогнозам в 2050 г. составит 50–70 млн га. При этом ежегодный прирост площадей, используемых для производства биотоплива, составляет около 1–2 млн га [5].

Энергетическая эффективность использования соломы в качестве биотоплива определяется ее сравнительно высокой удельной теплотой сгорания [6, 7]. Поэтому солома рапса, так же, как и зерновых культур (пшеница, рожь, тритикале, ячмень), имеет значительный потенциал для энергетического использования, но реальные объемы на региональном уровне зависят от ряда факторов, в первую очередь от ее использования в кормовых целях или в качестве удобрения для повышения плодородия почвы [8]. В настоящее время солома для энергетических целей активно используется в ряде европейских стран, а наиболее высокий удельный уровень ее производства характерен для Дании [9]. С учетом природно-климатических и хозяйственных условий нашей страны

наиболее перспективными для биоэнергетики культурами являются кукуруза, рапс, многолетние травы, зерновые и зернобобовые культуры. В Республике Беларусь площадь пашни, занятой под озимыми и яровыми зерновыми культурами, за последнее десятилетие остается достаточно стабильной, а средний валовой сбор зерна в стране приближается к 8–9 млн т, что соответствует производству приблизительно 9–10 млн т соломы [10]. Возможность выделения определенных объемов соломы в качестве биотоплива зависит от ряда факторов, и это количество является нестабильным. Потенциальный объем использования соломы в качестве биотоплива на региональном уровне определяется на основе расчета баланского метода с учетом ее применения на другие цели. Основной объем соломы используется в животноводстве в качестве подстилки для производства органических удобрений. В среднем для получения 1 т подстилочного навоза необходимо около 250 кг соломы. В масштабах страны при существующей структуре посевных площадей для обеспечения бездефицитного баланса гумуса необходимо ежегодно вносить не менее 43 млн т органики на пахотные земли из расчета 9,4 т/га [11], что близко к фактическим показателям. Это означает, что при условии использования для получения органики только соломистого субстрата его ежегодное необходимое количество составляет около 10 млн т. Самый лучший по качеству компост получается при использовании соломы и торфокрошки в соотношении торф : солома – 1 : 1 [11]. Таким образом, для использования в качестве компонента компста необходимо не более 5 млн т соломы. Ежегодное производство соломы в стране при соотношении зерно : солома как 1,0 : 0,1,2 составляет около 10 млн т, из которых примерно половину можно использовать в качестве биотоплива.

Возможный объем использования соломы на энергетические цели в рамках конкретного хозяйства может быть установлен после соответствующего экономического обоснования. Технически доступные ресурсы соломы сельскохозяйственной культуры при уборке урожая рассчитываются по соотношению урожайности соломы : зерно. Данный показатель не является стабильным и зависит от сорта, генотипа, агротехники выращивания, погодных условий и т. д.

Вторым крупным источником биотоплива является биомасса, образующаяся на предприятиях деревопереработки (опилки, стружка, щепа). Согласно СТБ 1867-2017 к отходам лесозаготовки относятся отрезки хлыстов, вершины, сучья, ветви, козырек, откомлевка, пневматическая древесина, кора [12].

В своем естественном виде отходы лесозаготовок малотранспортабельны, при использовании в качестве топлива они предварительно измельчаются в щепу. В Классификаторе отходов, образующихся в Республике Беларусь, отходы переработки и обработки древесины выделены в отдельную группу, которая включает такие виды отходов, как кора, опилки, древесная пыль, стружка, горбыль, рейка [13].

Количество отходов деревообрабатывающих производств зависит от качества поставляемого сырья, типа и размера изготавляемой продукции, технической оснащенности предприятия и его мощности и может составить 45–63 % от исходного сырья (пиломатериалов, фанеры). При этом количество опилок, образующихся в процессе лесопиления, варьирует от 9 до 16 % от объема распиливаемого сырья. Объем древесины, переходящей в опилки, зависит от толщины пил: чем тоньше пила, тем меньше опилок [14].

С учетом объема заготавливаемой древесины для Минлесхоза, который к 2020 г. достиг величины 6,6 млн м³, количество отходов лесопереработки, которые могут быть потенциально использованы в энергетических целях, составляет миллионы кубометров [15].

Дополнительным источником биомассы может быть естественная растительность, формирующаяся на торфяных площадях после прекращения их эксплуатации.

На территориях выработанных торфяников в первые годы после прекращения добычи торфа отсутствуют условия для вегетации растений, но обводнение территории позволяет решить эту проблему. В последние годы в результате реализации ряда природоохранных проектов по минимизации воздействия выработанных торфяников на окружающую среду, а также проведения обязательных восстановительных мер в Беларуси было повторно заболочено более чем 50 тыс. га таких площадей. В рамках дальнейших мероприятий по заболачиванию в Беларуси может быть восстановлено еще более 500 тыс. га выработанных торфяников [16].

Повторное заболачивание осущенных торфяников позволяет также сохранить биологическое разнообразие территорий, так как конечные результаты заболачивания ближе к естественным условиям торфяных болот.

Одним из потенциальных источников биомассы с территории выведенных из промышленной эксплуатации торфяных месторождений является создание специальных энергетических плантаций деревьев или сельскохозяйственных культур. Разработаны технологии создания и выращивания энергетических плантаций сосны, березы и лиственницы, которые позволяют получать до 150–200 м³ ценной топливной древесины с 1 га плантаций [17]. Изучение потенциала для энергетического использования быстрорастущих подвидов и гибридов ивы, тополя, осины, мискантуса сегодня активно

проводится в ряде зарубежных стран (Швеции, Финляндии, США, Канаде, Польше и др.) [18]. В этой связи особый интерес вызывает ива как растение, способное произрастать в условиях повышенной увлажненности и на разных типах почв, характеризующихся различным уровнем плодородия. Среднегодовой урожай при четырехлетней ротации ивы в соответствии с результатами, полученными в ряде зарубежных стран, может достигать 10–15 т сухой древесины с 1 га (Швеция, США, Канада). Однократно заложенная плантация может быть использована для получения семи урожаев продукции без значительного снижения продуктивности [19].

Одним из перспективных направлений, в первую очередь для торфобрикетных предприятий, является производство композитного топлива, в качестве одного из компонентов которого используются ископаемые ресурсы, а в качестве второго – возобновляемая биомасса.

Для производства композитного топлива в зарубежных странах применяют различные источники сырья. К наиболее распространенным из них относится древесная биомасса, образующаяся в деревообрабатывающей и лесной отрасли (стволы, ветви, хвоя, пни, опилки, стружка), деревья быстрорастущих энергетических плантаций (такие как ива, мискантус) и отходы агропромышленного комплекса: солома злаковых культур, багасса сахарного тростника, кукурузные початки, шелуха риса, гречихи, лузга подсолнечника, костра льна, скорлупки орехов, косточки плодов, камыш и др. Например, в России разработаны и успешно применяются методы получения топливных брикетов из двухкомпонентной смеси древесного происхождения: первый компонент – измельченные древесные отходы деревозаготовительных или деревоперерабатывающих предприятий, а второй компонент – древесный уголь; при этом двухкомпонентная смесь представлена в виде гомогенизированного композиционного материала. Полученные брикеты имеют повышенную теплотворность, прочность и высокое содержание нелетучего углерода [20].

Композитные биоугольные твердотопливные брикеты на российских угольных станциях, а также на котельных, работающих на мазуте, используются в качестве альтернативного топлива взамен каменного угля. В качестве первой составляющей (т. е. основой) таких изделий служат опилки и другие отходы лесохимической и деревообрабатывающей промышленности, отходы целлюлозно-бумажных комбинатов, агропромышленного комплекса, в качестве второй составляющей – углеродсодержащие соединения угля, торфа и отходы нефтепереработки. Твердый пластификатор, который используется в изделиях в качестве связующего, обеспечивает совершенствование всех эксплуатационных параметров брикетов (пеллет) и снижает их биоразлагаемость [21].

Композитные брикеты (пеллеты) из биомассы, полученной в агропромышленном комплексе, все более широко используются в странах Европейского Союза, Японии и Китае. Так, исследования, проведенные в Китае, подтвердили экологическую эффективность использования брикетированной композитной биомассы, полученной из измельченных кукурузных початков, ветвей и соломы, при совместном сжигании на угольных станциях. При этом наблюдалось снижение выбросов оксидов азота на 10 % и диоксидов серы на 100 мг/Нм³ [22].

В США активно проводятся исследования, направленные на оценку возможности применения лигнокеллюлозной растительности при производстве бионефти. Установлено, что использование смешанной биомассы (остатков сосны и биомассы проса) в качестве сырья для жидких биотоплив имеет ряд преимуществ для термохимического преобразования [23].

В качестве твердого топлива для энергоустановок совместного сжигания разработаны изделия в форме брикетов или пеллет: первый компонент – материал биомассы, включающей посадочный материал соевых бобов, шалфей, посадочный материал кукурузы и посадочный материал подсолнечника; второй компонент – уголь. В качестве связующего применяются водоросли или воск [24].

В целях улучшения прочностных свойств пеллет или брикетов (снижение крошения, процента отсева и устойчивость к излому) при их производстве используют различные добавки. В лигнинсодержащих растениях таким связующим выступает непосредственно лигнин, а в сельскохозяйственные отходы добавляют крахмал, также используют рыбий жир, соду, известняк, воск, растительные масла, можно вводить минеральные добавки. Так, ученые из Австрийского научно-исследовательского института леса оценивали эффективность пеллет, полученных из измельченных початков кукурузы, соломы рапса и зерновых культур, где в качестве присадки использовали каолин, бентонит и угольную золу. Сжигание такой смеси обеспечивало высокую температуру плавления золы и значительное сокращение выбросов мелких взвешенных частиц (пыли) в атмосферу по сравнению с результатами сжигания пеллет без добавления минеральных веществ. При изготовлении агропеллет наибольшей популярностью пользуется солома различных сельскохозяйственных культур (чаще рапс, ячмень, пшеница), поскольку теплотворность практически не уступает древесным гранулам (до 16 МДж/кг). Также ввиду хороших энергетических характеристик к перспективным материалам для производства твердого топлива можно отнести камыш и лузгу подсолнечника [25].

В Беларуси, с учетом наличия базовых источников сырья, перспективным направлением представляется производство композитного топлива из фрезерного торфа, а также сельскохозяйственных

и древесных отходов. Рациональное использование биомассы в энергетических целях возможно при соответствующем обосновании.

Цели исследований – дать экологическую оценку методам получения биомассы для производства композитных топливных брикетов и провести анализ их основных технологических характеристик.

Материалы и методы исследований. Исследования проводились на базе предприятия ОАО «Торфорбрикетный завод Усяж» Смолевичского района Минской области.

Отбор проб соломы (ячмень, рапс) осуществляли после уборки зерновых культур урожая 2019 и 2020 года. Отбор проб древесной биомассы (опилки, стружка) производили на предприятиях, входящих в комплекс Лесопункта Смолевичского района. Пробы фрезерного торфа отбирали на полях торфодобычи торфобрикетного предприятия ОАО «ТБЗ Усяж». Пробы соломы, опилок и стружки отбирали из равноудаленных друг от друга источников, расположенных на одном поле (площадке хранения). Для последующего анализа из объединенной пробы биомассы выделяли усредненный образец, который перевозили в лабораторию для проведения дальнейших исследований.

Лабораторные исследования проводили на базе научно-исследовательской лаборатории «Экопром» Белорусского национального технического университета и сертифицированной лаборатории ОАО «ТБЗ Усяж».

В НИЛ «Экопром» определяли влажность и зольность торфа и биомассы согласно стандарту СТБ 2042-2010 [26].

Экспериментальные образцы композитных брикетов получали путем смешивания биомассы с фрезерным торфом, используемым в производственной деятельности предприятия для изготовления топливных брикетов. Образцы предварительно подсушивали до равновесной влажности в закрытом помещении, т. е. до полного равномерного распределения влаги, когда высыхание образцов в естественных условиях прекращается. Равновесная влажность торфа составляла 20–22 %, биомассы – 10–12 %. Измельченные биомассу и торф просеивали через сите с размером ячейки 3 мм и смешивали в соотношении: 25 % (биомасса) на 75 % (торф), 50 % (биомасса) на 50 % (торф), 75 % (биомасса) на 25 % (торф). Для получения брикетов использовали цилиндрическую пресс-форму диаметром 50 мм, изготовленную из прочной стали толщиной 10 мм. Прессование композитной смеси проводили на прессе марки HOREX при давлении 68 ± 1 МПа.

Для сравнительно испытания также были получены брикеты из чистого торфа и образцов биомассы.

Теплоту сгорания и технологические характеристики экспериментальных образцов композитного топлива определяли в лаборатории ОАО «ТБЗ Усяж».

Теплоту сгорания топлива определяли по ГОСТ 147-2013 [27]. Теплота сгорания – это количество выделившейся теплоты при полном сгорании массовой (для твердых и жидких веществ) или объемной (для газообразных веществ) единицы вещества. Термогравиметрическая методика определения теплоты сгорания – это методика определения теплоты сгорания вещества в калориметрической камере сгорания. Для определения теплоты сгорания вещества в калориметрической камере сгорания используются различные методы, включая методика определения теплоты сгорания вещества в калориметрической камере сгорания.

Оценку технических характеристик композитных и брикетов выполняли по следующим стандартным методикам:

- массовой доли общей влаги и зольности – по СТБ 2042-2010 [26];
- массовой доли общей серы – по ГОСТ 8606-2015 [28].

Для экологической оценки методов подготовки биомассы для производства композитных брикетов проводили расчет выбросов с отработавшими газами дизельных двигателей согласно ТКП 17.08-18-2016 (33140) [29].

Расчет выбросов диоксида углерода проводили согласно ТКП 17.09-05-2013 (02120) [30].

Технологические карты получения сырья (растительные остатки или древесные остатки) для композитного топлива разрабатывали на основе:

- Приказа Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь от 15 января 2018 г. № 15 [31];
- Постановления Совета Министров Республики Беларусь «Об утверждении правил автомобильных перевозок грузов» от 30 июня 2008 г. № 970 [32];
- Постановления Министерства транспорта и коммуникаций Республики Беларусь от 6 января 2012 г. № 3 [33];
- Организационно-технологических нормативов возделывания сельскохозяйственных культур [34].

– Организационно-технологических нормативов возделывания зерновых, зернобобовых, крупяных культур [35].

Результаты исследований и их обсуждение. Применяемая в процессе исследований технология прессования смеси биомассы и фрезерного торфа показала, что композитные топливные брикеты могут быть получены при различных соотношениях возобновляемой биомассы и фрезерного торфа. Это соотношение и вид используемого сырья в свою очередь определяют характеристики и стоимость топлива.

Для эколого-экономической оценки получения сырья с установленными характеристиками, используемого в качестве компонента композитного топлива, были разработаны технологические карты. При использовании в качестве компонента композитных брикетов соломы оценивали четыре базовых варианта:

- подбор соломы из валков с последующим измельчением и транспортировкой к месту производства брикетов;
- подбор соломы из валков с прессованием в малогабаритные тюки (ширина, высота, длина – 460 × 360 × 400...1200 мм) с последующей транспортировкой к месту производства брикетов и измельчением;
- подбор соломы из валков с прессованием в крупногабаритные тюки типа BIG PACK (1200 × 900 × 2000 мм) с последующей транспортировкой к месту производства брикетов и измельчением;
- подбор соломы из валков с прессованием в рулоны (диаметр 1800 мм и длина 1500 мм) с последующей транспортировкой к месту производства брикетов и измельчением.

Преимущество технологий с прессованием биомассы – возможность длительного хранения, недостаток – необходимость дополнительного включения в линию переработки измельчителя соломы.

При использовании в качестве компонента композитных брикетов древесных остатков оценивались два варианта: древесные опилки и стружка (щепа). Различие заключается в необходимости измельчения древесной щепы или стружки до фракции размером не более 5 мм.

Для всех вариантов заготовки сырья для композитных брикетов обязательным приемом является смещивание измельченной биомассы и торфа перед прессованием до получения гомогенной смеси.

Логистика перевозок строилась из расчета использования источников сырья, расположенных в районе торфобрикетного предприятия ОАО «ТБЗ Усяж». Так, в 2014 г. в Смолевичском районе Минской области образован Лесопункт, который осуществляет комплекс мероприятий по хранению и переработке древесины и является источником остатков деревообработки (щепа, опилки), которые потенциально могут быть использованы для производства композитных брикетов. На территории района также находится девять сельскохозяйственных предприятий. Под зерновые культуры ежегодно засевается около 21,6 тыс. га пахотных площадей. При средней урожайности зерновых около 35,3 ц/га ежегодные объемы образования соломы составляют около 70 тыс. т.

Экологическая оценка производства сырья для композитного топлива, выполненная на основе технологических карт, показывает, что основной аспект воздействия связан с выбросами в атмосферный воздух. Основным источником выбросов является топливо, потребляемое в процессе заготовки, транспортировки и переработки сырья.

Для работы уборочной техники и транспортировки сырья до места складирования используется дизельное топливо, на котором работают уборочные комбайны, трактора, агрегатирующие прицепную технику (например, сельскохозяйственная техника для прессования соломы). Так как для транспортировки на небольшие расстояния (до 10 км) целесообразно использовать тракторные прицепы различных типов, то дизельное топливо потребляется и в процессе транспортировки.

Для переработки сырья в соответствии с оптимальными параметрами для производства композитного топлива (измельчение), а также для смещивания компонентов композитного топлива потребляется электрическая энергия. По состоянию на 2020 г. основным энергоносителем, используемым для производства электроэнергии является природный газ. Рассчитан объем природного газа, который необходим для производства электроэнергии, потребляемой в процессе переработки сырья согласно технологической карте. Объемы потребления природного газа и дизельного топлива использовали для расчета выбросов диоксида углерода и других загрязнителей. Результаты расчетов представлены в табл. 1, из данных которой следует, что основными загрязнителями воздушной среды являются оксиды углерода, азота, серы, углеводороды и твердые частицы. Объемы выбросов диоксида углерода при заготовке и подготовке сырья для композитного топлива колеблются от 6 кг/т (опилки) до 19 кг/т (солома, прессованная в тюки стандартного размера). Минимальные объемы выбросов остальных загрязнителей также характерны для технологии заготовки и подготовки сырья на основе опилок и максимальные – для сырья на основе соломы с прессованием в тюки стандартного размера. Объем выбросов загрязнителей и диоксида углерода при подборе соломы из валков с из-

мелочением выше, чем при использовании технологии с прессованием, что связано с более значительным потреблением дизельного топлива.

В экспериментах, проведенных в Норвегии, оценивались выбросы парникового газа (CO_2) при использовании различных источников биомассы для производства брикетов. В процессе жизненного цикла так же, как и в наших исследованиях, выделяли этапы заготовки, погрузки и транспортировки сырья. Было установлено, что выбросы диоксида углерода в процессе жизненного цикла заготовки и использования древесных опилок составили около 14 кг CO_2 в расчете на 1 м³ биомассы. В пересчете на тонны это составит около 4–5 т CO_2 на 1 т опилок в зависимости от их влажности, что сопоставимо с нашими расчетами [36].

Таблица 1. Расчет выбросов загрязняющих веществ и диоксида углерода в атмосферный воздух, образующихся в процессе получения сырья для композитного топлива

Table 1. Calculation of pollutants and carbon dioxide emission into the atmosphere in process of biomass production for composite briquette

Источник сырья и технология получения	Выбросы, кг/т сырья					
	CO_2	CO	NO_x	CH	PM	SO_2
Солома:						
измельчение	18,469	0,142	0,218	0,065	0,010	0,027
прессование в рулоны	18,469	0,142	0,218	0,065	0,010	0,027
прессование в тюки BIG PACK	14,718	0,076	0,118	0,035	0,005	0,014
прессование в тюки	15,012	0,079	0,122	0,036	0,006	0,015
щепа	19,921	0,128	0,1,98	0,059	0,009	0,024
Опилки	9,599	0,053	0,082	0,024	0,004	0,010
	6,009	0,053	0,082	0,024	0,004	0,010

Для расчета себестоимости заготовки сырья также использовалась информация, полученная при разработке технологических карт. Технологические карты позволяют оценить весь технологический цикл получения сырья (биомассы) как ряд последовательных операций, внутри каждой из которых можно посчитать затраты времени (трудовые затраты), потребление топлива и потребление электроэнергии. Для расчетов себестоимости использовались следующие показатели:

– трудовые затраты или оплата труда работников, которые рассчитывались на основе средней заработной платы по Республике Беларусь (около 1200 руб. в месяц). Так как технологические карты рассчитывались на массу заготовленного сырья – 10 т и отдельные технологические операции включали небольшой промежуток времени, то за основу брались расчеты часовой оплаты труда. С учетом продолжительности установленного периода рабочего времени (22 дня в месяц и 8 ч в день) часовая оплата труда составила около 7 руб.;

– стоимость электроэнергии для юридических лиц бралась из расчета 0,24295 руб/кВт·ч;

– стоимость дизельного топлива для юридических лиц бралась из расчета 1,83 руб/л.

При расчете себестоимости не учитывалась рыночная (договорная) стоимость как растительных (солома), так и древесных остатков (щепа, опилки), которую может потребовать производитель. Эти затраты зависят от ряда факторов, могут колебаться в значительной степени и должны дополнительно учитываться производителем композитного топлива при калькуляции его стоимости. Результаты расчетов себестоимости заготовки сырья для производства композитного топлива представлены в табл. 2.

Таблица 2. Показатели расчета себестоимости сырья для композитных брикетов

Table 2. Results of prime-cost calculation of biomass for composite briquette

Источник сырья и технология	Стоимость, руб.			
	Заработка плата	Дизельное топливо	Электрическая энергия	Себестоимость 1 т сырья
Солома:				
измельчение	117,88	42,07	100,13	26,0
прессование в тюки	177,31	69,70	90,74	33,77
прессование в рулоны	154,56	69,70	54,11	27,84
прессование в тюки BIG PACK	152,95	69,70	56,18	27,88
щепа	109,48	42,07	37,70	18,92
Опилки	68,32	6,47	37,70	11,24

В разделе «введение» мы отмечали, что потенциальные источники биомассы для композитного топлива не ограничиваются соломой или опилками, но также могут включать болотную растительность, искусственные плантации энергетических культур. По результатам наших предыдущих исследований установлено, что себестоимость уборки и подготовки к брикетированию биомассы естественной растительности с осущенных выработанных торфяников, рассчитанная также на основе жизненного цикла, составит около 40 руб/т. Это несколько выше, чем себестоимость заготовки биомассы соломы или древесных остатков. А самая высокая себестоимость установлена для биомассы, полученной с плантации энергетических культур (ивы). Для 1 т измельченной до требуемых для производства композитных брикетов параметров щепы она составит около 70 руб. Очевидно, что при существующих технологиях с экономической точки зрения для производства брикетов более рационально использовать солому и остатки деревопереработки [37, 38].

Так как воздействие на окружающую среду будет иметь место как в процессе получения, так и использования топливных брикетов, этот фактор во многом определяется их технологическими характеристиками, такими как зольность, содержание серы, влажность и удельная теплота сгорания. Последние два показателя не связаны с воздействием на окружающую среду непосредственно, но могут оказывать косвенное влияние. Так, более низкая влажность обуславливает лучшие условия для эксплуатации котельного оборудования. Теплота сгорания определяется химическим составом горючего вещества (H, C, N, O, S) и количественным содержанием элементов. Она также может зависеть от зольности и влажности сжигаемого топлива.

В ходе исследований оценивали экспериментальные образцы брикетов в соотношении: 25 % (биомасса) на 75 % (торф), 50 % (биомасса) на 50 % (торф), 75 % (биомасса) на 25 % (торф). Установленные зависимости между соотношением компонентов топлива и основными технологическими характеристиками, которые позволяют прогнозировать возможность производства топлива с требуемыми параметрами, представлены на рис. 1 и 2.

Установлено, что увеличение процента как растительной, так и древесной биомассы положительно сказывается на таких характеристиках, как зольность, влажность, содержание серы. Поэтому, с точки зрения воздействия на окружающую среду, лучшие характеристики топлива могут быть получены при доле торфа в композитном брикете не более 25 %. Низшая теплота сгорания при добавлении биомассы имеет небольшую тенденцию к снижению. Наши результаты сопоставимы с данными экспериментальных исследований, выполненных в Индонезии. Так, было установлено, что наивысшая удельная теплота сгорания при оценке композитных брикетов, полученных из торфа и древесных опилок, была для топлива в соотношении торф : опилки как 2 : 1 (около 19 кДж/кг). Увеличение доли опилок в композитных брикетах приводила к незначительному снижению удельной теплоты сгорания.

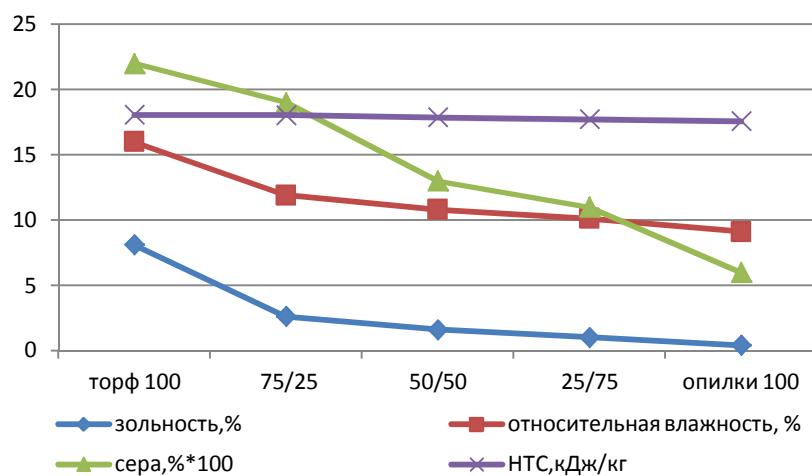


Рис. 1. Графики зависимостей технологических характеристик композитных брикетов из торфа и опилок от соотношения компонентов топлива

Fig. 1. The curve of relationship of technological characteristics of composite briquette from the peat and straw with difference rates of components

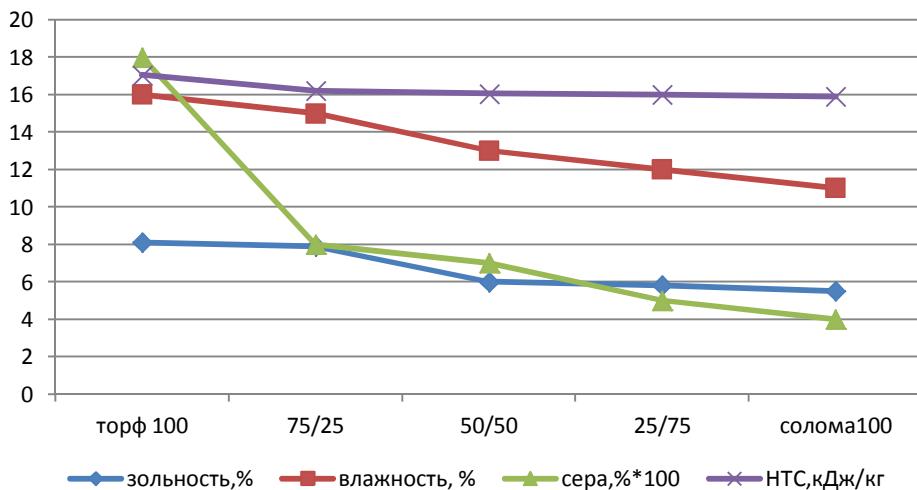


Рис. 2. Графики зависимостей технологических характеристик композитных брикетов из торфа и соломы от соотношения компонентов топлива

Fig. 2. The curve of relationship of technological characteristics of composite briquette from the peat and sawdust with difference rates of components

Авторы также отмечают, что удельная теплота сгорания в значительной степени зависела от качества опилок. В Индонезии опилки классифицируются в трех градациях: A₁, A₂, B. При снижении класса опилок с A₁ до B удельная теплота их сгорания уменьшилась с 17,5 до 16,8 кДж/кг биомассы [39]. Этот фактор, безусловно, надо учитывать при промышленном производстве композитных брикетов.

Относительно использования компонентов топлива двух видов биомассы (солома, опилки) можно отметить более высокие показатели качества брикетов с добавлением опилок по сравнению с брикетами с добавлением соломы по таким параметрам, как зольность, влажность и теплота сгорания.

Для производства топливных брикетов можно эффективно использовать как солому зерновых культур, так и рапса. Композитные брикеты с добавлением рапса несколько уступали по основным технологическим характеристикам аналогичным образцам топлива, полученным с добавлением соломы зерновых, но в обоих случаях с ростом процентного соотношения биомассы и торфа зольность, влажность и содержание серы снижается (табл. 3).

Таблица 3. Технологические характеристики и удельная теплота сгорания композитных брикетов из фрезерного торфа и биомассы соломы

Table 3. Technological characteristics and calorific value of composite briquette from peat and straw

Композитная смесь	Влажность, %	Зольность, %	Содержание серы, %	Низшая теплота сгорания, кДж/кг (ккал/кг)
75%-ный торф : 25%-ный рапс	14,9	7,6	0,080	16 380 (3 910)
50%-ный торф : 50%-ный рапс	13,1	5,2	0,070	16 220 (3 870)
25%-ный торф : 75%-ный рапс	12,2	4,9	0,050	16 050 (3 830)
75%-ный торф : 25%-ный ячмень	14,7	7,3	0,090	16 490 (3 940)
50%-ный торф : 50%-ный ячмень	12,7	4,9	0,085	16 260 (3 880)
25%-ный торф : 75%-ный ячмень	11,4	3,6	0,070	16 170 (3 860)

Как следует из полученных результатов, с увеличением процента содержания биомассы, независимо от вида соломы, снижаются зольность, влажность и содержание серы в брикетах. Удельная теплота сгорания с увеличением процента содержания биомассы также несколько снижается.

Выводы

1. Композитные пеллеты и композитные брикеты могут быть получены при использовании в качестве компонента биотоплива соломы сельскохозяйственных культур и отходов деревообработки в различных соотношениях с учетом их обязательной предварительной подготовки (высушивание, измельчение и просеивание). Экспериментальные образцы брикетов были получены путем прессования массы при давлении около 70 МПа, что на 50–70 % ниже по сравнению с давлением при брикетировании фрезерного торфа на прессах типа МС 1600.
2. Установлены зависимости между соотношением компонентов топлива и основными технологическими характеристиками, которые позволяют прогнозировать возможность производства топлива с требуемыми параметрами. Добавление биосырья в качестве топливного компонента в композитные брикеты не снижает экологическую эффективность образцов экспериментального топлива по сравнению с чистым фрезерным топливом. Увеличение процента как растительной, так и древесной биомассы положительно сказывается на таких характеристиках, как зольность, влажность, содержание серы. Низшая теплота сгорания при добавлении биомассы имеет небольшую тенденцию к снижению. Относительно использования компонентов топлива можно отметить более высокие показатели качества брикетов с добавлением опилок по сравнению с брикетами с добавлением соломы, по таким параметрам, как зольность, влажность и теплота сгорания. По комплексной оценке оптимальные технологические показатели выявлены для композитного топлива на основе опилок, для которого характерны более низкие показатели влажности и зольности и более высокие показатели удельной теплоты сгорания.
3. Предварительная подготовка биомассы для брикетирования зависит от вида сырья и технологии его получения. При использовании в качестве компонента композитных брикетов соломы рекомендуется четыре базовых варианта: подбор соломы из валков с последующим измельчением и транспортировкой к месту производства брикетов; прессование соломы из валков в тюки, рулоны или тюки BIG PACK с последующей транспортировкой к месту производства брикетов и измельчением. При использовании в качестве компонента композитных брикетов древесной щепы или стружки необходимо дополнительное измельчение биомассы до фракции размером не более 5 мм. Для всех вариантов обязательным приемом является смешивание измельченной биомассы и торфа перед прессованием до получения гомогенной смеси.
4. Экологическая оценка производства сырья для композитного топлива, выполненная на основе технологических карт, показывает, что основной аспект воздействия связан с выбросами загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Основным источником выбросов является ископаемое топливо, потребляемое в процессе заготовки, транспортировки и переработки сырья, поэтому более рационально использовать источники биосырья, расположенные вблизи предприятия по производству композитного топлива. Основными загрязнителями воздушной среды являются оксиды углерода, азота, серы, углеводороды и твердые частицы. Объемы выбросов диоксида углерода при заготовке и подготовке сырья для композитного топлива колеблются от 6 кг/т (опилки) до 19 кг/т (солома, прессованная в тюки стандартного размера). Минимальные объемы выбросов остальных загрязнителей также характерны для технологии заготовки и подготовки сырья на основе опилок и максимальные для сырья на основе соломы с прессованием в тюки стандартного размера. Объем выбросов загрязнителей и диоксида углерода при подборе соломы из валков с измельчением выше, чем при использовании технологии с прессованием, что связано с более значительным потреблением дизельного топлива.
5. С экономической точки зрения, наиболее рациональным является использование в качестве компонентов композитного топлива древесных остатков, предприятий деревообработки. Себестоимость заготовки и подготовки опилок при транспортировке до 10 км не превышает 11 руб/т сырья. Себестоимость заготовки и подготовки щепы (стружки) увеличивается до 19 руб/т, что связано с необходимостью ее дополнительного измельчения. При использовании в качестве компонента композитного топлива соломы самая низкая себестоимость будет при использовании технологии с подбором соломы из валков с одновременным измельчением и последующей транспортировкой (26 руб/т сырья, соответствующего требуемым техническим параметрам). При прессовании соломы из валков в рулоны и крупногабаритные тюки себестоимость заготовки и подготовки соломы в качестве сырья возрастает на 7 %. Себестоимость прессования соломы с последующей подготовкой сырья в тюки стандартных размеров, по сравнению с крупногабаритными тюками, возрастает более чем на 20 % и составляет 33 руб/т. Тем не менее это более низкая себестоимость по сравнению с использованием для производства композитных брикетов биомассы естественной болотной растительности и энергетических плантаций.

Список использованных источников

1. О развитии торфяной промышленности ГПО «Белтопгаз» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.topgas.by/content/sobytiya/novosti/156_o_razvitii_torfyanoj_promyshlennosti_gpo_beltopgaz/. – Дата доступа: 01.03.2021.
2. Первичный анализ торфяной промышленности Беларуси [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bahna.land/ru/bolota/pervichnyj-analiz-torfyanoj-promyshlennosti-belorussi>. – Дата доступа: 01.03.2021.
3. Томсон, А. Э. Торф и продукты его переработки / А. Э. Томсон, Г. В. Наумова // Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. – Минск : Беларуская наука, 2009. – 328 с.
4. Отношение объема производства (добычи) первичной энергии из возобновляемых источников энергии к объему валового потребления ТЭР (процент) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sdgplatform.belstat.gov.by/sites/belstatfront/index-info.html?indicator=7.2.1.1>. – Дата доступа: 01.03.2021.
5. Биотопливо. Перспективы, риски и возможности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.fao.org/3/i0100r/i0100r00.htm>. – Дата доступа: 01.03.2021.
6. Straw for energy production. Technology – Environment – Economy / The center for biomass technology. – 1998. – 53 р.
7. Van Doorn J. Combined Combustion of Biomass, Municipal Sewage Sludge and Coal in an Atmospheric Fluidised Bed Installation / J. Van Doorn, P. Bruyn, P. Vermeij // Proc. of the 9th Europ. Bioenergy Conf. / Copenhagen, Denmark, June 24–27, 2006. – Pergamon, 2006. – Vol. 2. – Р. 1007–1012.
8. Энергосбережение и возобновляемые источники энергии: учебно-методическое пособие / О. И. Родькин [и др.] ; под общ. ред. С. П. Кундаса. – Минск : МГЭУ им. А. Д. Сахарова, 2011. – 160 с.
9. Energy 21 the Danish government's action plan for energy // Danish Ministry of Environment and Energy, Copenhagen, 1996. – 125 р.
10. Сельское хозяйство Республики Беларусь, 2019 : стат. сб. / Нац. стат. ком. Респ. Беларусь ; редкол.: И. В. Медведева [и др.]. – Минск : Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2019. – 212 с.
11. Босак, В. Н. Органические удобрения / В. Н. Босак // Полес. гос. ун-т. – Пинск : ПолесГУ, 2009. – 255 с.
12. Отходы древесные. Общие технические условия = Адходы драўняныя. Агульныя тэхнічныя ўмовы : СТБ 1867-2017. – Введ. 01.10.2017. – Минск : Госстандарт, 2017. – 7 с.
13. Об утверждении, введении в действие общегосударственного классификатора Республики Беларусь [Электронный ресурс] : Постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь, 9 сент. 2019 г., № 3-Т // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: https://pravo.by/upload/docs/op/W21934631p_1569531600.pdf. – Дата доступа: 01.03.2021.
14. Федоренчик, А. С. Энергетическое использование низкокачественной древесины и древесных отходов / А. С. Федоренчик, А. В. Ледницкий. – Минск : БГТУ, 2010. – 446 с.
15. Объем заготовки древесины к 2020 году в Беларуси планируется увеличить вдвое [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.belta.by/economics/view/objem-zagotovki-drevesiny-k-2020-godu-v-belorussi-planiruetsja-uvelichit-vdvoe-198322-2016>. – Дата доступа: 1.03.2021.
16. Use of biomass from wet peatland for energy purpose / S. Kundas, W. Wichtman, A. Rodzkin, V. Pashinsky // International and renewable energy sources as alternative primary energy sources in the region: 8 Int. sci. conf., Lviv, April 2–3, 2015. – Lviv, 2015. – Р. 77–81.
17. Штукин, С. Как создавать и выращивать энергетические плантации / С. Штукин, Д. Подошвель // Лес. и охотничье хоз-во. – 2004. – № 3. – С. 14–17.
18. Reviewing wood biomass potentials for energy in Europe: the role of forests and fast growing plantations / B. Mola-Yudego [et al.] // Biofuels. – 2017. – Vol. 8, № 4. – Р. 401–410.
19. Родькин, О. И. Производство возобновляемого биотоплива в аграрных ландшафтах: экологические и технологические аспекты / О. И. Родькин. – Минск : МГЭУ, 2011. – 210 с.
20. Высококалорийные топливные брикеты из композиционного материала на основе древесных отходов (варианты) : пат. 2653513 Российская Федерация / А. А. Пекарец. – Опубл. 10.05.2018. Бюл. № 13.
21. Мясоедова, В. В. Резервные твердотопливные изделия: композиты на основе биомассы, торфа и биоугля [Электронный ресурс] / В. В. Мясоедова // Журнал С.О.К. – 2016. – № 6. – Режим доступа: <https://www.s-o-k.ru/articles/rezervnye-tverdotoplivnye-izdeliya-kompozity-na-osnove-biomassы-torfa-i-biouglya>. – Дата доступа: 01.03.2021.
22. Study of briquetted biomass co-firing mode in power plants / Yuanyi Liu, Xuebin Wang, Yingying Xiong, Houzhang Tan, Yanqing Niu // Applied Thermal Engineering. – 2014. – № 63. – Р. 266–271.
23. Blended feedstocks for thermochemical conversion: biomass characterization and bio-oil production from switchgrass-pine residues blends / K. V. Edmunds, E. A. Rejes Molina, N. Andre, S. Gamil'ton, S. Park, O. Fasina, S. Adhikari, S. S. Kelli, Dzh. S. Tumuluru, T. G. Rials, N. Labbe // Front. Energy Res. – 2018. – Vol. 6, no. 79. – doi:10.3389/fenrg.2018.00079.
24. Майерз, Майкл. Пеллеты и брикеты из спрессованной биомассы : пат. 2510660 Российская Федерация / Майкл Майерз, Б. Худ, Дж. Джей. – Опубл. 10.04.2014. – Бюл. № 10.
25. Передерий, С. Микспеллеты и пеллеты из недревесного сырья / С. Передерий // ЛесПромИнформ. – 2017. – № 3 (125). – С. 170–176.
26. Торф. Методы определения влаги и зольности = Торф. Методы визначення вільгаці і зольнасці : СТБ 2042-2010. – Введ. 01.07.2010. – Минск : Госстандарт, 2010. – 14 с.

27. Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания = Паліва цвёрдае мінеральнае. Вyzначэнне вышэйшай цеплыні згарання і разлік ніжэйшай цеплыні згарання : ГОСТ 147-2013 (ISO 1928:2009). – Введ. 01.09.2016. – Минск : Госстандарт, 2016 – 44 с.
28. Топливо твердое минеральное. Определение общей серы. Метод Эшка = Паліва цвёрдае мінеральнае. Вyzначэнне агульной серы. Метад Эшка : ГОСТ 8606-2015 (ISO 334:2013). – Введ. 01.09.2017. – Минск : Госстандарт, 2017. – 16 с.
29. Охрана окружающей среды и природопользование. Атмосферный воздух. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Порядок расчета выбросов с отработавшими газами дизельных двигателей при строительстве и восстановлении скважин для добычи нефти и газа = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Атмасферна паветра. Выкіды забруджвальных рэчываў у атмасферна паветра. Парадак разліку выкідаў з адпрацаванымі газамі дызельных рухавікоў пры будаўніцтве і аднаўленні свідравін для здабычы нафты і газу : ТКП 17.08-18-2016 (33140). – Введ. 01.03.2016. – Минск : Минприроды, 2016. – 44 с.
30. Охрана окружающей среды и природопользование. Климат. Выбросы и поглощение парниковых газов. Правила расчета выбросов парниковых газов в основных секторах экономики Республики Беларусь = Ахова навакольнага асяроддзя і прыродакарыстанне. Клімат. Выкіды і паглынанні парніковых газаў. Правілы разліку выкідаў парніковых газаў у асноўных сектарах эканомікі Рэспублікі Беларусь : ТКП 17.09-05-2013 (02120). – Введ. 01.04.2013. – Минск : Минприроды, 2013. – 46 с.
31. Об утверждении Отраслевых норм выработки и норм расхода топлива на механизированные работы в сельском хозяйстве [Электронный ресурс] : приказ Министерства сельского хозяйства и продовольствия Респ. Беларусь, 15 янв. 2018 г., № 15 // Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://www.mshp.gov.by/documents/meh/d9a106c47454c630.html>. – Дата доступа: 30.11.2020.
32. Об утверждении правил автомобильных перевозок грузов [Электронный ресурс] : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 30 июня 2008 г., № 970 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=C20800970>. – Дата доступа: 30.11.2020.
33. Об установлении норм расхода топлива в области транспортной деятельности [Электронный ресурс] : постановление Министерства транспорта и коммуникаций Респ. Беларусь, 6 янв. 2012 г., № 3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=W21226157>. – Дата доступа: 30.11.2020.
34. Организационно-технологические нормативы возделывания сельскохозяйственных культур : сб. отраслевых регламентов. – Минск : Институт аграрной экономики НАН Беларуси, 2005. – 460 с.
35. Организационно-технологические нормативы возделывания зерновых, зернобобовых, крупынных культур : сб. отраслевых регламентов / Нац. акад. наук Беларуси, НПЦ НАН Беларуси по земледелию ; рук. разраб. : Ф. И. Привалов [и др.]. – Минск : Беларус. наука, 2012. – 288 с.
36. Ann, Kristin. A comparison of avoided greenhouse gas emissions when using different kinds of wood energy / Kristin Ann, Raymer Petersen // Biomass and Bioenergy. – 2006. – № 30. – Р. 605–617.
37. The assessment of cost of biomass from post-mining peaty lands for pellet fabrication / A. Rodzkin, S. Kundas, Y. Charnenak, B. Khroustalev, W. Wichtmann // Environmental and Climate Technologies. – 2018. – Vol. 22, no. 1. – Р. 118–131.
38. Родькин, О. И. Перспективы производства биотоплива на основе энергетических культур. Экономические и экологические аспекты / О. И Родькин, Е. В Черненок, К. Ф. Саевич // Научный журнал НИУ ИТМО. Сер. Экономика и экологический менеджмент. – 2019. – № 1 (36). – С. 33–44.
39. Bustan, A. Are Peat and Sawdust Truly Improve Quality of Briquettes as Fuel Alternative? / A. Bustan, M. Arsy // Journal of Sustainable Development. – 2017. – Vol. 10, no. 5. – Р. 61–70.

References

1. O razvitiu torfyanoy promyshlennosti GPO «Beltopgaz» [About the development of the peat industry of GPO Beltopgaz]. Available at: http://www.topgas.by/content/sobytiya/novosti/156_o_razvitiu_torfyanoy_promyshlennosti_gpo_beltopgaz/ (accessed 1 March 2021). (in Russian)
2. Pervichnyj analiz torfyanoy promyshlennosti Belarusi [Primary analysis of the peat industry in Belarus]. Available at: <https://bahna.land/ru/bolota/pervichnyj-analiz-torfyanoy-promyshlennosti-belarusi> (accessed 1 March 2021). (in Russian)
3. Tomson A. E., Naumova G. V. Torf i produkty ego pererabotki [Peat and products of its processing]. NAS Belarusi, Institute of Nature Management. Minsk, 2009, 328 p. (in Russian)
4. Otnoshenie ob'ema proizvodstva (dobychi) pervichnoj energii iz vozobnovlyaemyh istochnikov energii k ob'emu valovogo potrebleniya TER (procent) [The ratio of the volume of production (extraction) of primary energy from renewable energy sources to the volume of gross fuel and energy consumption (percent)]. Available at: <http://sdgplatform.belstat.gov.by/sites/belstatfront/index-info.html?indicator=7.2.1.1> (accessed 1 March 2021). (in Russian)
5. Biotoplivо. perspektivy, riski i vozmozhnosti [Biofuels. Perspectives, risks and opportunities]. Available at: <http://www.fao.org/3/i0100r/i0100r00.htm> (accessed 1 March 2021). (in Russian)
6. Straw for energy production. Technology – Environment – Economy. The center for biomass technology. 1998, 53 p.

7. Vap Doorn J., Vruun R., Vermeij R. Combined Combustion of Biomass, Municipal Sewage Sludge and Coal in an Atmospheric Fluidised Bed Installation. Proc. of the 9th Europ. Bioenergy Conf. Copenhagen, Denmark, June 24–27, 2006. Pergamon, 2006, vol. 2, pp. 1007–1012.
8. Rod'kin O. I., Kuchinskij O. A., Matveenko I. I., Kundas S. P., Vajcekhovich N. N., Poznyak S. S. *Energosberenzhenie i vozobnovlyaemye istochniki energii: uchebno-metodicheskoe posobie* [Energy-saving and renewable energy sources: a training manual]. Ed. S. P. Kundasa. Minsk, 2011, 160 p. (in Russian)
9. Energy 21 the Danish government's action plan for energy. Danish Ministry of Environment and Energy, Copenhagen, 1996, 125 p.
10. Sel'skoe hozyajstvo Respubliki Belarus' 2019. *Statisticheskii sbornik* [Agriculture of the Republic of Belarus' 2019: stat. coll.]. Nacionalnyi statisticheskii komitet Resp. Belarus' [National Statistical Committee. Rep. Belarus]. Ed. board I. V. Medvedeva [et al.]. Minsk, 2019, 212 p. (in Russian)
11. Bosak V. N. *Organicheskie udobreniya* [Organic fertilizers]. Polessky State University. Pinsk, 2009, 255 p. (in Russian)
12. STB 1867-2017. *Othody drevesnye. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State standard 1867-2017 Wood waste. General technical conditions]. Minsk, 2017. 7 p. (in Russian)
13. *Ob utverzhdenii, vvedenii v deystvie obshchegosudarstvennogo klassifikatora Respubliki Belarus'* [About the approval and introduction of the national classifier of the Republic of Belarus]. Available at: https://pravo.by/upload/docs/op/W21934631p_1569531600.pdf (accessed 1 Mars 2021). (in Russian)
14. Fedorenchik A. S., Lednickij A. V. *Energeticheskoe ispol'zovanie nizkokachestvennoj drevesiny i drevesnyh othodov* [Energy use of low-quality wood and wood waste]. Minsk, 2010, 446 p. (in Russian)
15. *Ob'em zagotovki drevesiny k 2020 godu v Belarusi planiruetsya uvelichit' vdvoe* [The volume of wood harvesting in Belarus is planned to double by 2020]. Available at: <https://www.belta.by/economics/view/objem-zagotovki-drevesiny-k-2020-godu-v-belarusi-planiruetsja-uvelichit-vdvoe-198322-2016> (accessed 1 Mars 2021). (in Russian)
16. Kundas S., Wichtman W., Rodzkin A., Pashinsky V. Use of biomass from wet peatland for energy purpose. International and renewable energy sources as alternative primary energy sources in the region: 8 Int. sci. conf., Lviv, April 2–3, 2015, 2015, pp. 77–81.
17. Shtukin S., Podoshvelev D. *Kak sozdavat' i vyrashchivat' energeticheskie plantacii* [How to create and grow energy plantations]. Lesnoe i ohotnick'e hozyastvo = Forestry and hunting, 2004, no. 3, pp. 14–17. (in Russian)
18. Mola-Yudego B. [et al.] Reviewing wood biomass potentials for energy in Europe: the role of forests and fast growing plantations. *Biofuels*, 2017, vol. 8, no. 4, pp. 401–410.
19. Rod'kin O. I. *Proizvodstvo vozobnovlyayemogo biotopliva v agrarnykh landshaftah: ekologicheskie i tekhnologicheskie aspekty* [Production of renewable biofuels in agricultural landscapes: environmental and technological aspects]. Minsk, 2011, 210 p. (in Russian)
20. Pekarec A. A. *Vysokokalorijnye toplivnye brikety iz kompozicionnogo materiala na osnove drevesnyh othodov (varianty)* [High-calorie fuel briquettes made of composite material based on wood waste (options)]. Patent RF, no. 2653513, 2018. (in Russian)
21. Myasoedova V. V. *Rezervnye tverdotoplivnye izdeliya: kompozity na osnove biomassy, torfa i biouglya* [Reserve solid fuel products: composites based on biomass, peat and biochar]. Zhurnal S.O.K. = Plumbing, Heating, Air Conditioning Magazine, no. 6, 2016. Available at: <https://www.c-o-k.ru/articles/rezervnye-tverdotoplivnye-izdeliya-kompozity-na-osnove-biomassy-torfa-i-biouglya/> (accessed 1 March 2021). (in Russian)
22. Yuanyi Liu, Xuebin Wang, Yingying Xiong, Houzhang Tan, Yanqing Niu. Study of briquetted biomass co-firing mode in power plants. *Applied Thermal Engineering* 63, 2014, pp. 266–271.
23. Edmunds K. V., Rejes Molina E. A., Andre N., Gamil'ton S., Park S., Fasina O., Adhikari S., Kelli S. S., Tumuluru Dzh. S., Rials T. G., Labbe N. Blended feedstocks for thermochemical conversion: biomass characterization and bio-oil production from switchgrass-pine residues blends, *Front. Energy Res.*, 2018, vol. 6, no. 79. doi:10.3389/fenrg.2018.00079.
24. Majerz, Majkl B., Hud, Dzhej, Dzh. *Pellety i brikety iz spressochnoj biomassy* [Pellets and briquettes made from compressed biomass]. Patent RF, no. 2510660, 2014. (in Russian)
25. Perederiy S. *Mikspellety i pellety iz nedrevesnogo syr'ja* [Mix Pellets and Pellets from Non-Timber Raw Materials]. *LesPromInform*, 2017, no. 3 (125), pp. 170–176. (in Russian)
26. STB 2042-2010. *Torf. Metody opredeleniya vлаги i zol'nosti* [State Standard STB 2042-2010. Peat. Methods for determining moisture and ash content]. Minsk, 2010, 14 p. (in Russian)
27. GOST 147-2013 (ISO 1928:2009). *Toplivo tverdoe mineral'noe. Opredelenie vysshei teploty sgoraniya i raschet nizshej teploty sgoraniya* [State Standard 147-2013 (ISO 1928:2009). Solid mineral fuel. Determination of the highest calorific value and calculation of the lowest calorific value]. Minsk, 2015, 44 p. (in Russian)
28. GOST 8606-2015 (ISO 334:2013). *Toplivo tverdoe mineral'noe. Opredelenie obshchej sery. Metod Eshka* [State Standard 8606-2015 (ISO 334:2013) Solid mineral fuel. Determination of total sulfur. The method of Ashka]. Minsk, 2017, 16 p. (in Russian)
29. TKP 17.08-18-2016 (33140). *Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Atmosfernij vozduh. Vybrosy zagryaznyayushchih veshchestv v atmosfernyj vozduh*. [Technical code of established practice 17.08-18-2016 (33140). Environmental protection and nature management. Atmospheric air. Emissions of pollutants into the atmospheric air]. *Poryadok rascheta vybrosov s otrabotavshymi gazami dizel'nyh dvigatelej pri stroitel'stve i vostanovlenii skvazhin dlya dobychi nefti i gaza* [Procedure for calculating emissions from diesel engine exhaust gases during the construction and restoration of wells for oil and gas production]. Available at: http://ecoinv.by/images/pdf/tkp_fond/izm/17.08-18.pdf. (accessed 30 November 2020). (in Russian)

30. TKP 17.09-05-2013 (02120). Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Klimat. Vybrosy i pogloshcheniya parnikovyh gazov. [Technical code of established practice 17.09-05-2013 (02120). Environmental protection and nature management. Climate. Greenhouse gas emissions and removals]. Pravila rascheta vybrosov parnikovyh gazov v osnovnyh sektorah ekonomiki Respubliki Belarus [Rules for calculating greenhouse gas emissions in the main sectors of the economy of the Republic of Belarus]. Available at: http://ecoinv.by/images/pdf/tkp_fond/_17.09-05-2013.pdf. (accessed 30 November 2020). (in Russian)
31. Ob utverzhdenii otrraslevykh norm vyrabotki i raskhoda topliva na mekhanizirovannye raboty v sel'skom hozyajstve [About the approval of Industry standards of production and standards of fuel consumption for mechanized work in agriculture]. Available at: <https://www.mshp.gov.by/documents/meh/d9a106c47454c630.html> (accessed 30 November 2020). (in Russian)
32. Ob utverzhdenii pravil avtomobil'nyh perevozok gruzov [On the approval of the rules of road transport of goods]. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=C20800970> (accessed 30 November 2020). (in Russian)
33. Ob ustanovenii norm raskhoda topliva v oblasti transportnoj deyatelnosti [On the establishment of fuel consumption standards in the field of transport activities]. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3961&p0=W21226157> (accessed 30 November 2020). (in Russian)
34. Organizacionno-tehnologicheskie normativy vozdel'yvaniya sel'skohozyajstvennyh kul'tur: Sbornik otrraslevykh re-glamentov [Organizational and technological standards for the cultivation of agricultural crops: collection of industry regulations]. Minsk, Institute of Agricultural Economy of the NAS of Belarus, 2005, 460 p. (in Russian)
35. Organizacionno-tehnologicheskie normativy vozdel'yvaniya zernovyh, zernobobovyyh, krupyanyyh kul'tur: sb. otrraslevykh re-glamentov [Organizational and technological standards for the cultivation of cereals, legumes, cereals: collection of industry regulations]. Development manager F. I. Privalov [et al.]. NAS of Belarus, National Agricultural Research Center of the NAS of Belarus. Minsk, 2012, 288 p. (in Russian)
36. Ann Kristin, Petersen Raymer. A comparison of avoided greenhouse gas emissions when using different kinds of wood energy. *Biomass and Bioenergy*, 2006, no. 30, pp. 605–617.
37. Rodzkin A., Kundas S., Charnenak Y., Khroustalev B., Wichtmann W. The assessment of cost of biomass from post-mining peaty lands for pellet fabrication. *Environmental and Climate Technologies*, 2018, vol. 22, no. 1, pp. 118–131.
38. Rod'kin O. I., Chernonenok E. V., Saevich K. F. Perspektivy proizvodstva biotopliva na osnove energeticheskikh kul'tur. Ekonomicheskie i ekologicheskie aspekty [Prospects for the production of biofuels based on energy crops. Economic and environmental aspects]. Nauchnyj zhurnal NIU ITMO. Seriya "Ekonomika i ekologicheskij menedzhment" = Scientific Journal of the National Research University ITMO. Series "Economics and Environmental Management", 2019, no. 1(36), pp. 33-44. (in Russian)
39. Bustan A., Arsy M. Are Peat and Sawdust Truly Improve Quality of Briquettes as Fuel Alternative? *Journal of Sustainable Development*, vol. 10, no. 5; 2017, pp. 61–70.

Информация об авторах

Родькин Олег Иванович – кандидат биологических наук, доцент, заведующий кафедрой «Инженерная экология», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь). E-mail: aleh.rodzkin@rambler.ru

Черненок Евгения Вячеславовна – аспирант, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь). E-mail: e.v.chernenok@gmail.com

Сивко Василий Михайлович – главный инженер ОАО «Торфобрикетный завод Усяж» (ул. Промышленная, 16, 222212 пос. Усяж, Смолевичский р-н, Минская обл., Беларусь). E-mail: sivko.vm@mail.ru

Ракович Вячеслав Александрович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией биогеохимии и агрэкологии, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: mire4@tut.by

Information about the authors

Aleh I. Rodzkin – Ph. D. (Biology), Docent, Head of Engineering Ecology Chair, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Belarus). E-mail: aleh.rodzkin@rambler.ru

Evgenija V. Chernonenok – Post graduate student, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Belarus). E-mail: e.v.chernenok@gmail.com

Vasilij M. Sivko – Chief Engineer, OJSC "Peat production Factory Usiazh" (16, Promyshlennaya Str., 222212, Usyazh village, Smolevichi district, Minsk region, Belarus). E-mail: sivko.vm@mail.ru

Viatcheslav A. Rakovich – Ph. D. (Technical), Head of Lab. of the Biogeochemistry and agroecology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: mire4@tut.by

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2021-1-221-228>

УДК 582.284:66.081.3

Поступила в редакцию 06.03.2021

Received 06.03.2021

СОРБЦИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПЛЕСНЕВЫМ ГРИБОМ *ASPERGILLUS CARBONARIUS*, МЕЛАНИЗИРУЮЩИМ КАРТОН

**А. Э. Томсон¹, И. А. Гончарова², А. М. Тригубович³, Т. В. Соколова¹,
Н. Е. Сосновская¹, Ю. Ю. Навоша¹, В. С. Пехтерева¹**

¹Институт природопользования НАН Беларусь, Минск, Беларусь;

²Белорусский научно-исследовательский институт

документоведения и архивного дела, Минск, Беларусь;

³Институт микробиологии НАН Беларусь, Минск, Беларусь

Аннотация. Показано, что плесневой гриб *Aspergillus carbonarius*, синтезирующий внеклеточный меланин, способен развиваться за счет расщепления целлюлозы внутри картона в условиях низкой доступности воды. Максимальный выход меланина отмечен в слабощелочной среде, но в присутствии ионов меди высокий уровень пигментации среды наблюдается и при низких значениях pH. Меланизированный мицелий и экзомеланин характеризуются высокой сорбционной способностью по отношению к ионам тяжелых металлов, присутствующих в типографских пигментах макулатуры. В процессе роста *A. carbonarius* снижает кислотность с нейтральных значений до pH 2,8–3,1, повышает подвижность иммобилизованных на волокнах целлюлозы тяжелых металлов и связывает их функциональными группами по ионному или хелатному пути. Сорбционная емкость биомассы по отношению к ионам меди, цинка и никеля возрастала в ряду жизнеспособный мицелий < инактивированный мицелий < экзомеланин. Ионы свинца наиболее активно связывались инактивированным мицелием. Внеклеточный пигмент акумулировал медь лучше, чем другие металлы, коэффициент распределения в системе меланин – Cu²⁺ достигал 1390 мл/г.

Ключевые слова: меланин; инактивированный мицелий; сорбция; биомасса.

Для цитирования. Томсон А. Э., Гончарова И. А., Тригубович А. М., Соколова Т. В., Сосновская Н. Е., Навоша Ю. Ю., Пехтерева В. С. Сорбция тяжелых металлов плесневым грибом *Aspergillus carbonarius*, меланизирующим картон // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 221–228.

SORPTION OF HEAVY METALS BY MOLD FUNGUS *ASPERGILLUS CARBONARIUS* MELANIZING CARDBOARD

**A. E. Tomson¹, I. A. Gontcharova², A. M. Trigubovich³, T. V. Sokolova¹,
N. E. Sosnovskaya¹, Yu. Yu. Navosha¹, V. S. Pekhtereva¹**

¹Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus;

²Belarusian Research Institute of Records Management and Archival Studies, Minsk, Belarus;

³Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. It has been shown that the mould fungus *Aspergillus carbonarius*, which synthesizes extracellular melanin, is able to develop due to the degradation of cellulose inside the cardboard under conditions of low water availability. The maximum yield of melanin was noted in a slightly alkaline medium, but in the presence of copper ions, a high level of pigmentation of the medium is also observed at low pH values. Melanized mycelium and exomelanin are characterized by a high sorption capacity in relation to heavy metal ions present in printing pigments of waste paper. In the process of growth *A. carbonarius* decreases acidity from neutral values to pH 2.8–3.1, increases the mobility of heavy metals immobilized on cellulose fibers and binds them by functional groups via ionic or chelating pathways. The sorption capacity of biomass with respect to copper, zinc, and nickel ions increased in the order of viable mycelium < inactivated mycelium < exomelanin. Lead ions were most actively bound by inactivated mycelium. The extracellular pigment accumulated copper better than other metals. The distribution coefficient in the system melanin – Cu²⁺ reached 1390 ml/g.

Keywords: melanin; inactivated mycelium; sorption; biomass.

For citation. Thomson A. E., Gontcharova I. A., Trigubovich A. M., Sokolova T. V., Navosha Yu. Yu., Sosnovskaya N. E., Pekhtereva V. S. Sorption of heavy metals by mold fungus *Aspergillus carbonarius* melanizing cardboard. *Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 221–228.

Введение. Бумага и картон, отличающийся от бумаги только большей толщиной и массой, составляют весомую долю производства промышленных материалов на основе природных биополимеров. Сфера применения картона широка и разнообразна: упаковка, полиграфия, строительство и т. д. [1]. Картон входит в число перспективных современных материалов благодаря ряду преимуществ: он экологичен, изготавливается из возобновляемого сырья, подходит для вторичной переработки. Постоянно увеличивается доля макулатурного картона, что связано с увеличением доли перерабатываемого вторичного сырья и ужесточением экологических стандартов.

Макулатура, пригодная для повторного использования, состоит из различных видов продукции бумажного производства, включая информационные бумажные носители: офисную документацию, газеты, журналы, печатные рекламные материалы. Экологичность такого сырья не всегда бывает на приемлемом уровне. Типографские краски, содержащие тяжелые металлы, до недавнего времени применялись повсеместно, не исключены они и в наши дни, особенно в цветных красителях. В зеленых пигментах обычно присутствует никель, в белых – цинк и свинец, в красных и синих – медь [2]. По данным изучения наличия тяжелых металлов во вторичной упаковке пищевых товаров в Турции содержание меди в тарном картоне из макулатуры достигало 25,4 мг/кг, количество цинка, свинца и никеля было на порядок ниже – 2,8, 2,6 и 1,8 мг/кг, соответственно [3]. Индийские исследователи выявили в бумажной и картонной упаковке пищевых продуктов 14 тяжелых металлов [4].

Целлюлозные волокна являются легкодоступным источником углеродного питания для многих микроорганизмов, в первую очередь микроскопических (плесневых) грибов. Однако картон, благодаря разветвленной капиллярно-пористой структуре, способен стабилизировать влажность воздуха в замкнутых емкостях и подвержен плесневому поражению только в исключительных случаях. Так, в помещении, где относительная влажность воздуха выше 70 % сохранялась в течение длительного времени, колонии микроскопических грибов выявлены на поверхности только тех картонных коробок для фазовой консервации архивных документов, которые были сверху оклеены цветной бумагой. Все изоляты грибов – агентов плесневого поражения коробок, проявили ксерофильность, предпочитая условия низкой влажности субстрата. На внутренней неоклеенной поверхности коробок и на находящихся в коробках документах плесневые грибы отсутствовали [5].

Микроскопические грибы, как правило, нуждаются в высоком уровне аэрации, поэтому плесневое поражение начинается с поверхностного слоя. В современном производстве картона в процессе сушки используют высокие температуры и токи высокой частоты, создающие экстремальные условия для выживания микроорганизмов. Однако даже в таких условиях в толще листового картона темноокрашенные грибы могут сохранять свою жизнеспособность. Известно, что грибы, синтезирующие черно-коричневые пигменты – меланины, отличаются повышенной устойчивостью ко многим факторам внешней среды. Меланины грибов защищают их от экстремальных факторов внешней среды: высоких и низких температур, интенсивной инсолиации, тяжелых металлов и др. Доказано, что меланиновый пигмент участвует в защите грибной клетки от высыхания [6].

Присутствие в картоне меланинсintéзирующих грибов, способных развиваться в условиях низкой аэрации, вначале (от нескольких месяцев до 1 года) никак не проявляется, а затем наблюдается появление округлых темных пятен. Постепенно темный пигмент распространяется не только по картону, но и на соседствующие с ним предметы. Этот процесс не останавливается даже при строгом соблюдении норм температурно-влажностного режима в архивах. Выделение таких контаминаントов в чистую культуру – довольно сложная задача, положительных результатов удается достичнуть только при моделировании условий, в которых они развиваются: низкая активность воды и ограниченный доступ кислорода [7].

Известно, что микроскопические грибы отличаются высокой устойчивостью к токсическому действию ионов тяжелых металлов и способны аккумулировать их в значительных количествах. В живом мицелии работают два различных механизма: адсорбция металлов клеточной стенкой и энергозависимое внутриклеточное связывание. В нежизнеспособной биомассе наблюдаются только физико-химические процессы сорбции металлов поверхностными структурами. В темноокрашенных структурах грибов особая роль в связывании ионов тяжелых металлов принадлежит меланинам [8].

Методы исследования. Основой для культивирования *Aspergillus carbonarius* служила модифицированная среда Сабуро с натриевой солью карбоксиметилцеллюлозы в качестве основного источника углерода. При изучении влияния внешних факторов на меланизацию среды гриб выращивали в стационарных условиях в колбах Эрленмейера при температуре 15 °C в течение трех недель. Мицелий отделяли от культуральной жидкости фильтрованием, промывали дистиллированной водой и использовали для выделения меланина. Экстракцию пигмента проводили 2%-ным раствором NaOH с коэффициентом разбавления 1 : 10 в течение 2 ч на кипящей водяной бане. Полученный экстракт охлаждали, подкисляли до pH 2,0 концентрированной HCl и сконденсировавший пигмент отделяли центрифугированием при 6000 г в течение 15 мин, трижды промывая дистиллированной водой.

Содержание меланина в среде определяли по оптической плотности при длине волны 490 нм с последующим пересчетом с использованием калибровочного графика.

В качестве сорбентов исследовали жизнеспособную биомассу после фильтрования, инактивированную биомассу после 15 мин кипячения и выделенный из питательной среды меланин. Сорбцию тяжелых металлов грибной биомассой и меланином оценивали по статической обменной емкости (СОЕ) из растворов сернокислых солей меди, никеля, свинца и цинка. Содержание ионов металлов в пробах до и после сорбции анализировали методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Исходная влажность сорбента составляла 40–50 %, для расчета сорбционной емкости навеску сорбента пересчитывали на абсолютно сухую массу.

Для характеристики и сравнительного анализа сорбционной способности микроскопических грибов использовали следующие величины:

– сорбционную емкость, мг/г,

$$S = \frac{(C_{\text{исх.}} - C_{\text{равн.}})V_{\text{раст.}}}{m_{\text{сорб.}}},$$

где $C_{\text{исх.}}$ и $C_{\text{равн.}}$ – исходная и равновесная концентрации соответственно, мг/мл; $V_{\text{раст.}}$ – объем раствора, мл; $m_{\text{сорб.}}$ – масса сорбента, г;

– K_d – коэффициент распределения, мл/г, показывающий соотношение концентраций извлекаемого элемента в сорбенте и растворе:

$$K_d = \frac{S}{C_{\text{равн.}}}.$$

ИК-спектры поглощения меланина до и после взаимодействия с ионами меди изучали на «Specord M-80» (Carl Zeiss Jena, Германия) в диапазоне 3800–400 см⁻¹ с разрешением 0,5 см⁻¹. Образцы для получения спектров готовили в виде таблеток прессованием с KBr при нагрузке 7 атм в течение 30 с.

Результаты и их обсуждение. Из фрагментов картона архивных коробок с черными пигментными пятнами без видимых следов развития мицелия или спороношения нами был выделен гриб, идентифицированный как *Aspergillus carbonarius*, который формировал медленно растущие колонии с обильным темно-коричневым экссудатом. В поверхностной культуре *A. carbonarius* интенсивно пигментировал опытные образцы картона при подсыхании. Потребность грибов в воде можно количественно выразить в виде значений активности воды (a_w), которая характеризует степень связанности ее молекул и тем самым доступность для процессов обмена веществ. Для воды $a_w = 1$, при растворении в воде различных веществ она уменьшается. Микромицеты-ксерофилы хорошо растут только на субстратах с низким содержанием воды, a_w порядка 0,80–0,87, ксеротолерантные виды способны развиваться не только при относительно низкой влажности, но и в более широком диапазоне a_w . Активность воды можно регулировать внесением в среду различных добавок, наиболее просто это сделать с помощью хлорида натрия. *A. carbonarius* проявил ксеротолерантные свойства, но интенсивно пигментировал бумагу и картон только на агаризованной среде с 12–17 % NaCl (рис. 1).

В жидкой питательной среде Сабуро гриб проявил способность к росту в широком диапазоне активности воды, но максимальный выход биомассы наблюдался при добавлении в среду 8 % NaCl, дальнейшее повышение концентрации соли снижало выход мицелия, но увеличивало количество внеклеточного (экзо-)меланина (рис. 2).

Термин «меланин» не несет информации о химической структуре пигmenta за исключением той, где он представляет собой полимер с различной молекулярной массой, макромолекулы которого состоят главным образом из ароматических фрагментов. Эти фрагменты соединены различными типами связей: простыми и двойными углерод-углеродными, в том числе сопряженными; эфирными и сложноэфирными. Кроме ароматических фрагментов, в макромолекулах обнаруживаются линейные углеводные и аминокислотные радикалы [9]. Среда Сабуро, в которой минеральные источники азота, фосфора и калия заменены пептоном, основным компонентом которого являются пептиды и аминокислоты, содержит тирозин и другие предшественники меланиногенеза, что ускоряет синтез пигmenta.

Наиболее значительная пигментация среды *A. carbonarius* наблюдалась в нейтральной или слабощелочной среде. Причиной этого может быть как повышенный синтез и выделение меланина, так и усиление интенсивности окраски пигmenta. Следует отметить, что в первую неделю культивирования в жидкой среде вначале гриб регулировал начальную кислотность среды до значений pH 4,0–5,5, а затем, как правило, происходило ее постепенное подкисление до pH 3,0 и ниже. Добавление в среду сульфата меди, изменило влияние кислотности на рост и пигmentообразование. Снижение pH среды не только не снижало, но даже способствовало увеличению содержания меланина в культуральной жидкости (рис. 3) в диапазоне pH от 6,5 до 4,5.



Fig. 1. Mold damage to cardboard by the fungus *Aspergillus carbonarius*, which synthesizes dark exopigments: a – localization of the fungus in the thickness of the cardboard; b – release of dark exudate on the medium with cellulose; c – increased pigmentation of cardboard with reduced water activity by adding 12 % NaCl

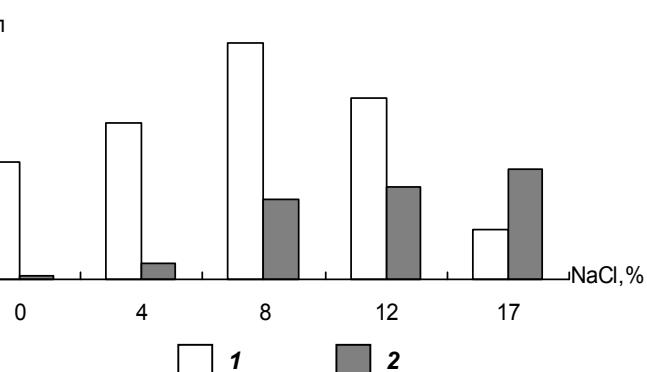


Рис. 2. Выход биомассы (1) и экзомеланина (2) после трех недель культивирования *A. carbonarius* на жидкой среде Сабуро с добавлением различных концентраций хлорида натрия

Fig. 2. Yield of biomass (1) and exomelanin (2) after three weeks of *A. carbonarius* cultivation on Saburo liquid medium with the addition of various concentrations of sodium chloride

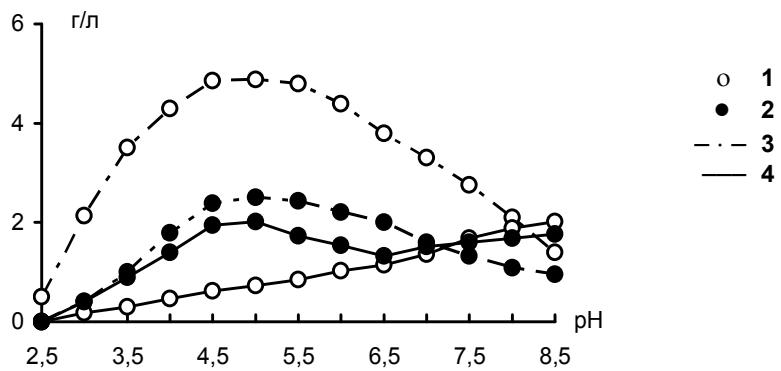


Рис. 3. Влияние pH среды (1) и ионов меди (2) на концентрацию биомассы (3) и экзомеланина (4) *A. carbonarius* (концентрация иона Cu^{2+} – 1 ммоль)

Fig. 3. Effect of the pH of the medium (1) and copper ions (2) on the concentration of biomass (3) and exomelanin (4) of *A. carbonarius* (concentration of the Cu^{2+} ion – 1 mmol)

Известно, что при подкислении среды подвижность ионов меди повышается, следствием чего является усиление токсичности соединений меди. Повышение концентрации катионов меди в питательных средах в сочетании с понижением pH усиливало ингибицию роста грибов и синтез меланиновых пигментов. Внесение в среду солей цинка и никеля оказывало аналогичное влияние, но менее выраженное, ионы свинца видимого воздействия не оказали.

Сравнительное исследование сорбционной активности нативной биомассы и экзомеланина *A. carbonarius* по отношению к тяжелым металлам показало, что при снижении концентрации ионов металлов сорбционная емкость снижалась, а коэффициент распределения K_d возрастал, стабилизируясь в растворах с высокой степенью разбавления (5–25 мг/л). В состоянии динамического равновесия внеклеточный меланин *A. carbonarius* активно удерживал ионы меди. По отношению к никелю K_d был ниже примерно в 2 раза, к свинцу – в 4 раза. Сорбционная активность биомассы по отношению к ионам тяжелых металлов при исходной концентрации от 5 до 25 мг/л была примерно одинаковой (см. таблицу).

Коэффициенты распределения в системах биомасса / экзомеланин *A. carbonarius* – ионы тяжелых металлов

Distribution coefficients in *A. carbonarius* biomass / exomelanin systems – heavy metal ions

Концентрация иона, мг/л	K_d – коэффициент распределения, мл/г					
	Cu^{2+}		Pb^{2+}		Ni^{2+}	
	биомасса	экзомеланин	биомасса	экзомеланин	биомасса	экзомеланин
100	185	327	654	235	152	136
75	299	479	586	254	188	256
50	401	625	475	286	205	359
25	467	870	440	300	343	589
10	490	1390	461	316	394	594
5	488	1385	456	308	383	590

Многие тяжелые металлы в малых количествах необходимы организму в качестве микроэлементов, однако в повышенных концентрациях они оказывают токсический эффект. Грибные споры и фрагменты мицелия всегда присутствуют в воздухе закрытых помещений в составе витающей пыли. Попадая в организм с пылевидными частицами, токсичные металлы представляют особую опасность для органов дыхания. Оценка сорбционной активности биомассы и меланина по отношению к ионам тяжелых металлов, преимущественно содержащихся в макулатуре (медь, свинец, цинк, никель), показала, что нежизнеспособный мицелий сорбирует свинца больше, чем чистый пигмент, хотя по другим металлам наблюдается обратная закономерность. Вероятно, в сорбции свинца значительную роль играет не только химическое связывание с разнообразными функциональными группами меланина, но и физические процессы поглощения разветвленными капиллярами клеточной стенки гриба (рис. 4).

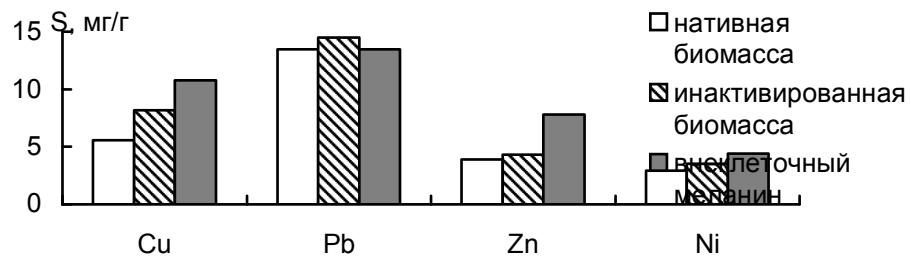


Рис. 4. Сорбционная емкость биомассы и внеклеточного меланина *A. carbonarius* по отношению к ионам тяжелых металлов (концентрация исходного раствора – 100 мг/л)

Fig. 4. Sorption capacity of *A. carbonarius* biomass and extracellular melanin in relation to heavy metal ions (initial solution concentration – 100 mg/l)

Пересчет сорбционной емкости на мг-экв/г показал, что, хотя ряд предпочтительности сорбции металлов инактивированной биомассой ($Cu^{2+} > Pb^{2+} > Zn^{2+} > Ni^{2+}$) отличается от ряда сорбируемости внеклеточного меланина ($Cu^{2+} > Zn^{2+} > Ni^{2+} > Pb^{2+}$), преобладающее связывание ионов меди при этом сохраняется (рис. 5).

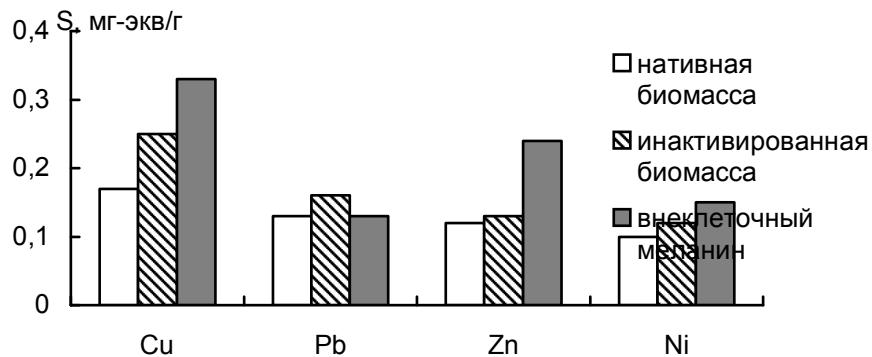


Рис. 5. Предпочтительность связывания ионов тяжелых металлов биомассой и внеклеточным меланином *A. carbonarius* (концентрация исходного раствора – 100 мг/л)

Fig. 5. Preference for binding of heavy metal ions by biomass and extracellular melanin of *A. carbonarius* (initial solution concentration – 100 mg/l)

Меланины характеризуются большим разнообразием функциональных групп (карбонильные, карбоксильные, метоксильные, фенольные, гидроксильные, аминогруппы и др.), способных вступать во взаимодействие с катионами металлов. ИК-спектроскопия экзомеланина *A. carbonarius* до и после взаимодействия с ионами меди показала, что связывание металла идет как с образованием хелатных комплексов, так и посредством ионного обмена с кислородсодержащимися функциональными группами. ИК-спектр Н-формы меланина характеризовался наличием интенсивных полос поглощения в области 1650–1600 cm^{-1} , вызванных валентными колебаниями сопряженных двойных связей полифенолов, а также пиками поглощения карбоксильных групп в области около 1720 cm^{-1} . Отличительной особенностью ИК-спектра экзомеланина было присутствие группы полос в интервале 1280–950 cm^{-1} , характерных для гидроксильных групп индивидуальных соединений единого комплекса углеводной природы, что позволяет отнести данный пигмент к гликомеланинам. В ИК-спектре Си-формы меланина наблюдалось изменение положения полос поглощения, характерное для образования металлогорганических соединений: уменьшение интенсивности полос поглощения валентных колебаний карбоксильных групп и увеличение поглощения в области 1600 и 1400 cm^{-1} , что свидетельствует о присутствии карбоксимат-иона, образующегося при замещении ионов водорода карбоксильных групп ионами металлов. Появление полос поглощения в области 1570–1510 и 1270 cm^{-1} характерно для координационной связи металлов с гидроксильными и другими кислородсодержащими функциональными группами (рис. 6).

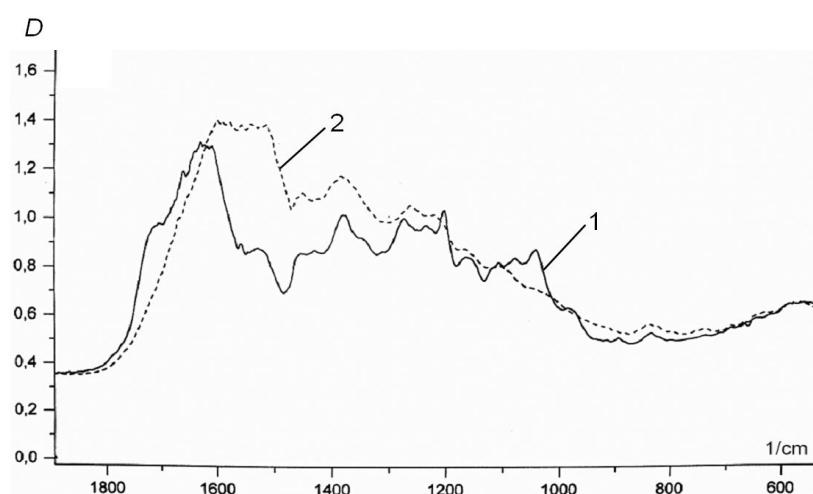


Рис. 6. ИК-спектры внеклеточного меланина *A. carbonarius* до и после сорбции ионов меди:
1 – Н-форма; 2 – Си-форма

Fig. 6. IR spectr of extracellular melanin of *A. carbonarius* before and after copper ion sorption:
1 – H-shape; 2 – Cu-shape

Связывание ионов меди по ионному типу характерно и для целлюлозных волокон. В связи с этим отходы бумажной промышленности предлагается использовать для очистки сточных вод от данного металла [9]. За период роспуска макулатуры при производстве картона целлюлозные волокна накапливают тяжелые металлы, перешедшие в воду из посторонних включений, которые затем удаляются из бумажной пульпы. После удаления воды и высушивания тяжелые металлы остаются в картоне.

Заключение. Таким образом, установлено, что меланизированный мицелий и экзомеланин обладают высокой сорбционной способностью по отношению к ионам, содержавшимся в пигментах типографских красок. Сорбционная емкость биомассы по отношению к ионам меди, цинка и никеля возрастает в ряду жизнеспособный мицелий < инактивированный мицелий < экзомеланин. *A. carbonarius* в процессе жизнедеятельности разрушает целлюлозные волокна. Попадание пылевидных частиц пигментированного грибом картона в дыхательные пути представляет серьезную опасность для здоровья человека вследствие высокой вероятности контаминации токсичными металлами.

Список использованных источников

- Перспективы использования влагопрочного картона и гофрокартона на рынке упаковочных материалов / О. А. Мишурина [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 6 (2). – С. 203–205.
- Mertoglu-Elmas, G. The effect of colorants on the content of heavy metals in recycled corrugated board papers / G. Mertoglu-Elmas, G. Cinar // BioResources. – 2017. – Vol. 12, № 2. – P. 2690–2698.
- Mertoglu-Elmas, G. Toxic Metals in Paper and Paperboard Food Packagings BioResources / G. Mertoglu-Elmas // BioResources. – 2017. – Vol. 13, № 4. – P. 7560–7580.
- Sood, S. Levels of Selected Heavy Metals in Food Packaging Papers and Paperboards Used in India / S. Sood, C. Sharma // Journal of Environmental Protection. – 2019. – № 10. – P. 360–368.
- Тригубович, А. М. Рост микромицетов, выделенных из очагов плесневого поражения архивохранилища, при пониженной температуре и влажности / А. М. Тригубович, И. А. Гончарова, А. А. Арашкова // Микробные биотехнологии: фундаментальные и прикладные аспекты : сб. науч. тр. – Минск : Беларусская наука, 2019. – Т. 11. – С. 189–199.
- Рост микромицетов и синтез пигментов на средах, содержащих фунгициды и ингибиторы пигментообразования / В. И. Сухаревич [и др.] // Микол. и фитопатол. – 2000. – Т. 42, № 3.– С. 43–47.
- Микологический анализ промышленных материалов, контаминированных микроскопическими грибами / И. А. Гончарова [и др.] // Труды БГТУ. – 2020. – Сер. 2, № 2. – С. 163–168.
- Gessler, N. N. Melanin pigments of fungi under extreme environmental conditions (review) / N. N. Gessler, A. S. Egorova, T. A. Belozerskaya // Applied Biochemistry and Microbiology. – 2014. – Т. 50, № 2. – С. 105–113.
- Adsorbent materials from paper industry waste materials and their use in Cu(II) removal from water / A. Mendez [et al.] // Journal of Hazardous Materials. – 2009. – Vol. 165 (1–3). – P. 736–743.

References

- Mishurina O. A., Mullina E. R., Zheryakova K. V., Kornienko N. D., Fyodorova Yu. S. Perspektivy ispol'zovaniya vlagoprochnogo kartona i gofrokartona na rynke upakovochnyh materialov [Перспективы использования влагопрочного картона и гофрокартона на рынке упаковочных материалов]. Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij = International Journal of Applied and Fundamental Research, 2015, no. 6 (2), pp. 203–205. (in Russian)
- Mertoglu-Elmas G., Sinar G. The effect of colorants on the content of heavy metals in recycled corrugated board papers. BioResources, 2017, vol. 12, no 2, pp. 2690–2698.
- Mertoglu-Elmas G. Toxic. Metals in Paper and Paperboard Food Packagings. BioResources, 2017, vol. 13, no. 4, pp. 7560–7580.
- Sood S., Sharma C. Levels of Selected Heavy Metals in Food Packaging Papers and Paperboards Used in India. Journal of Environmental Protection, 2019, no. 10, pp. 360–368.
- Trigubovich A. M., Goncharova I. A., Arashkova A. A. Rost mikromicetov, vydelennyh iz ochagov plesnevogo porazheniya arhivohranilishcha, pri ponizhennoj temperaturre i vlazhnosti [Growth of micromycetes isolated from the foci of mold damage in the archive storage at low temperature and humidity]. Mikrobnye biotekhnologii: fundamental'nye i prikladnye aspekty : sb. nauch. tr. [Microbial biotechnologies: fundamental and applied aspects : collection of scientific works]. Minsk, 2019, vol. 11, pp. 189–199. (in Russian)
- Suharevich V. I., Kuzikova I. L., Medvedeva N. G., Gridneva Y. U. [etc.]. Rost mikromicetov i sintez pigmentov na sredah, soderzhashchih fungicidy i ingibitory pigmentoobrazovaniya [Growth of micromycetes and synthesis of pigments on media containing fungicides and inhibitors of pigment formation]. Mikol. i fitopatol. = Mikol. and Phytopathol., 2000, vol. 42, no. 3, pp. 43–47. (in Russian)

7. Goncharova A., Sabadaha E. N., Trigubovich A. M., Chernaya N. V. *Mikologicheskij analiz promyshlennyh materialov, kontaminirovannyh mikroskopicheskimi gribami* [Mycological analysis of industrial materials contaminated with microscopic fungi]. *Trudy BGTU = Proc. of BSTU*, 2020, seriya 2, no. 2, pp. 163–168. (in Russian)
8. Gessler N. N., Egorova A. S., Belozerskaya T. A. Melanin pigments of fungi under extreme environmental conditions (review). *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2014, vol. 50, no. 2, pp. 105–113.
9. Mendez A., Barriga S., Fidalgo J. M., Gasco G. Adsorbent materials from paper industry waste materials and their use in Cu(II) removal from water. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 165(1–3), pp. 736–743.

Информация об авторах

Томсон Алексей Эммануилович – кандидат химических наук, доцент, заместитель директора по научной работе, заведующий Центром по торфу и сапропелем, заведующий лабораторией экотехнологий, Институт природопользования НАН Беларусь, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: altom@nature-nas.by

Гончарова Инесса Адамовна – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник, Белорусский научно-исследовательский институт документоведения и архивного дела (ул. Кропоткина, 55, 220002, г. Минск, Беларусь). E-mail: gontcharova.mould@gmail.com

Тригубович Андрей Михайлович – научный сотрудник, Институт микробиологии НАН Беларусь (ул. Купревича, 2, 220141, г. Минск, Беларусь). E-mail: trigubovich777@gmail.com

Соколова Тамара Владимировна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: tomsok49@tut.by

Навоша Юльян Юльянович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: navoscha@tut.by

Сосновская Наталья Евгеньевна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: natalisosnov@mail.ru

Пехтерева Виктория Станиславовна – научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларусь, (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: pehvik@yandex.ru

Information about the authors

Alexey E. Tomson – Ph. D. (Chemistry), Assistant Professor, Deputy Director, Head of the Center of Peat and Sapropel, Head of Lab. of Ecotechnology, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: altom@nature-nas.by

Inessa A. Gontcharova – Ph. D. (Biological), Leading Researcher, Institute of Microbiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus (55, F. Kropotkina Str., 220002, Minsk, Belarus). E-mail: gontcharova.mould@gmail.com

Andrei M. Trigubovich – Researcher, Institute of Microbiology of National Academy of Sciences of Belarus (2, Kuprevich Str. 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: trigubovich777@gmail.com

Tamara V. Sokolova – Ph. D. (Technical), Assistant Professor, Senior Researcher Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: tomsok49@tut.by

Julian Yu. Navosha – Ph. D. (Physical and Mathematical), Leading Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: navoscha@tut.by

Nataliya E. Sosnovskaya – Ph. D (Technical), Senior Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: natalisosnov@mail.ru

Victoriya S. Pehtereva – Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: pehvik@yandex.ru

ХРОНИКА CHRONICS

ПОЛУВЕКОВОЙ ЮБИЛЕЙ ПЕРВОГО ГЕОГРАФИЧЕСКОГО АКАДЕМИЧЕСКОГО СТРУКТУРНОГО ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ В БЕЛАРУСИ: РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ *SEMI-CENTRAL ANNIVERSARY OF THE FIRST GEOGRAPHIC ACADEMIC STRUCTURAL UNIT IN BELARUS: RESULTS AND PROSPECTS OF RESEARCH*

В начале 2021 г. исполнилось 50 лет со дня образования Института геохимии и геофизики Академии наук БССР, а в его составе первого академического структурного подразделения географической направленности – лаборатории геохимии ландшафтов. Лаборатория была создана для изучения закономерностей организации природной среды на территории Беларуси, анализа, оценки и прогнозирования влияния хозяйственной деятельности человека на природную среду.

Несмотря на то, что за прошедшие 50 лет трижды менялись название и месторасположение лаборатории¹, она успешно развивалась, готовила научные кадры, расширялась. В итоге сформировался коллектив географов-единомышленников со своими научными подходами и традициями, что позволило им не только получить важные научные результаты, реализованные в практике природопользования, но и стать ядром сформировавшейся в НАН Беларуси эколого-географической научной школы.

Цель данной статьи – проследить становление и развитие эколого-географических исследований в лаборатории оптимизации геосистем Института природопользования НАН Беларуси за полувековой период.

Историческая справка. 12 февраля 1971 г. директор только что образованного Института геохимии и геофизики АН БССР академик К. И. Лукашев подписал приказ о создании лаборатории геохимии ландшафтов, организованной для развития географических исследований в Академии наук БССР. Заведующим лабораторией был избран сотрудник института, геохимик и лимнолог, кандидат географических наук Александр Александрович Хомич, под руководством которого развивались пионерные для 1970–80-х годов научные и научно-прикладные исследования, касающиеся различных аспектов воздействия человека на природные комплексы Беларуси.



Кандидат географических наук А. А. Хомич – организатор и заведующий лабораторией в 1971–1994 гг.

Ph. D. A. A. Khomich – organizer and head of the laboratory in 1971–1994

¹ Лаборатория геохимии ландшафтов (1971–1978 гг.), лаборатория рационального природопользования (1978–1990 гг.) в Институте геохимии и геофизики АН БССР; лаборатория оптимизации геосистем и организации территории (1990–1994 гг.), лаборатория оптимизации геосистем (с 1994 г.) в Институте проблем использования природных ресурсов и экологии НАН Беларуси (с 2008 г. – Институт природопользования НАН Беларуси).

С начала существования научная тематика лаборатории была ориентирована на физико-географическое и геохимическое изучение трансформации природной среды Беларуси под влиянием природных и техногенных факторов. Большое внимание при этом уделялось методологии и выбору объектов исследований. Уже при выполнении первой трехлетней бюджетной темы была выдвинута идея о природно-техногенных комплексах, в которых были объединены представления об особенностях природной обстановки, характере антропогенного (техногенного) воздействия и последствиях этого воздействия. Было предложено использовать элементарные ландшафты в качестве основной территориальной единицы анализа взаимодействия природных и техногенных процессов. Эти идеи получили развитие в исследованиях горнопромышленных ландшафтов, сформировавшихся при добыче различных видов минерального сырья, при исследовании городов и промышленных комплексов, полигонов промышленных и бытовых отходов, других объектов.

В конце 1970-х годов возникла необходимость расширения географических исследований в институте с перспективой создания самостоятельной географической структуры в АН БССР. Для этих целей было выделено дополнительное финансирование. Лаборатория была переименована в лабораторию рационального природопользования (1978 г.). Для подготовки научных кадров группа молодых специалистов была направлена в целевую аспирантуру ведущих географических научных учреждений Советского Союза: Института географии АН СССР (г. Москва – М. И. Струк, В. А. Бакарасов, С. А. Хомич), Института географии Сибири и Дальнего Востока (г. Иркутск – С. В. Какарека), географического факультета МГУ (г. Москва – С. Л. Романов, В. В. Коляда). В это же время в Институт были приглашены доктор геолого-минералогических наук А. В. Матвеев, кандидат географических наук Г. И. Сачок, кандидат сельскохозяйственных наук А. М. Максимович и др. В 1979 г. из лаборатории выделилась группа под руководством А. В. Матвеева и на ее основе была организована лаборатория динамики ландшафтов.



Одна из первых фотографий сотрудников лаборатории вместе с коллегами по Институту геохимии и геофизики АН БССР. 1974 г.

One of the first photos of the laboratory staff together with colleagues from the Institute of Geochemistry and Geophysics of the Academy of Sciences of the BSSR. 1974

Росту научного потенциала лаборатории способствовала подготовка и защита кандидатских диссертаций. В период с 1982 по 1992 г. сотрудниками лаборатории было защищено 11 кандидатских диссертаций (В. А. Прокопеня, О. В. Кадацкая, В. С. Хомич, М. И. Струк, А. В. Кожаринов, С. В. Какарека, С. А. Хомич, В. П. Мацко, Т. И. Кухарчик, С. Л. Романов, В. А. Бакарасов).

Исследования 1980-х годов были направлены на выявление физико-географических и геохимических закономерностей естественно-техногенных трансформаций природной среды Беларуси. Изучение трансформаций природной среды осуществлялось применительно к локальным природно-территориальным комплексам (горнопромышленным, городским, мелиоративным, сельскохозяйственным, сансирующим). Объектами исследований являлись карьеры и карьерные водоемы, оставшиеся после добычи полезных ископаемых, большие и малые реки Беларуси, бассейны рек, города и город-

ские ландшафты, пригородные зоны, геотехнические системы, природно-техногенные комплексы, верховые болота, геохимические поля и др.

В 1990 г. в связи с организацией на базе Института торфа АН БССР Института проблем использования природных ресурсов и экологии НАН Беларуси (ИПИПРиЭ) лаборатория рационального природопользования вместе с другими географами (около 30 человек) была переведена в новый институт. Вследствие реорганизации структуры института под новые задачи лаборатория рационального природопользования была переименована в лабораторию оптимизации геосистем и организации территории. В целях реализации перспективной структуры ИПИПРиЭ в 1991 г. из лаборатории выделилась группа под руководством кандидата географических наук В. С. Хомича, на базе которой была организована лаборатория экологии городов.

В 1994 г. в связи с реорганизацией структуры Института и просьбой А. А. Хомича об освобождении от занимаемой должности заведующего лабораторией оптимизации геосистем и организации территории произошло объединение двух географических структур: в лабораторию вернулись сотрудники лаборатории экологии городов, а название научного подразделения стало более лаконичным – лаборатория оптимизации геосистем. Заведующим лабораторией был избран кандидат географических наук Валерий Степанович Хомич.



Доктор географических наук В. С. Хомич – заведующий лабораторией в 1994–2017 гг.

Dr. V. S. Khomich – Head of the laboratory in 1994–2017

В 1990-е годы исследования лаборатории были связаны с разработкой геоэкологических основ проектирования региональных природно-технических систем и экологически оптимального их размещения на территории Беларуси. С середины 1990-х по предложению Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь, при поддержке директора Института академика И. И. Лиштвана и заместителя директора доктора географических наук В. Ф. Логинова в лаборатории начались исследования эмиссионных факторов тяжелых металлов и стойких органических загрязнителей в качестве национального вклада «in-kind» Республики Беларусь в Программу ЕМЕП (Совместная программа наблюдений и оценки переноса на большие расстояния загрязняющих веществ в Европе). В процессе работы по данной тематике кандидат географических наук С. В. Какарека создал научно-методическую группу по трансграничному загрязнению, на основе которой и коллектива лаборатории климатологии в 2007 г. была создана лаборатория трансграничного загрязнения и климатологии под руководством доктора географических наук С. В. Какарека.

Начало 2000-х годов ознаменовалось всплеском творческой активности нового поколения и опытных исследователей. В период с 2000 по 2009 г. в лаборатории были защищены 6 кандидатских (Н. В. Ковалчик, Л. А. Кравчук, Е. В. Санец, Е. П. Овчарова, Н. К. Быкова, В. А. Рыжиков) и 3 докторских (С. В. Какарека, В. С. Хомич, Т. И. Кухарчик) диссертации.

Исследования лаборатории в 2000-х годах были связаны с развитием теории и разработкой методов геоэкологической оценки и управления обеспечением устойчивого развития урбанизированных территорий. В этот период проводились масштабные работы по эколого-геохимическому картографированию и оценке состояния окружающей среды в зонах интенсивного техногенного воздействия (городов, промкомплексов, полигонов коммунальных и производственных отходов, АЗС и др.).

В последние годы исследования лаборатории связаны с геоэкологическим обоснованием организации природных каркасов урбанизированных территорий, оценками выполняемых ими средоформирующих функций, разработкой мер по оптимизации природных комплексов и устойчивому их функционированию в процессе городского развития. С 2017 г. лабораторию возглавляет кандидат географических наук Елена Васильевна Санец.



Кандидат географических наук Е. В. Санец – заведующая лабораторией с 2017 г.

Ph. D. E. V. Sanets – Head of the laboratory since 2017

Комплексные научные проекты. Лаборатория оптимизации геосистем как географическое структурное подразделение ориентирована на комплексное изучение природных и природно-техногенных систем и проблем природопользования. В этой связи ею выполняются (и ранее выполнялись) функции координатора работ, а Институтом – функции головной организации по комплексному изучению ряда крупных и сложных объектов, в том числе:

– разработка Прогноза возможных изменений в биосфере в результате развития отраслей народного хозяйства Белорусской ССР на перспективу до 2000 года, 1974–1975 гг. (Головная организация-исполнитель – Институт геохимии и геофизики АН БССР, организации-соисполнители: Управление гидрометеослужбы БССР, БелНИГРИ, Институт торфа АН БССР, БелНИИ почвоведения и агрохимии МСХ БССР, ГосНИИ земельных ресурсов, ЦНИИКИВР, БелНИИ мелиорации и водного хозяйства, ИЭБ АН БССР, Отдел зоологии и паразитологии АН БССР, БелНИИ рыбного хозяйства, ЦБС АН БССР), научный руководитель – академик К. И. Лукашев, ответственный исполнитель – кандидат географических наук А. А. Хомич;

– подготовка 23 выпусков ежегодного информационно-аналитического издания «Состояние природной среды Беларуси», 1992–2015 гг. (совместно с лабораториями трансграничного загрязнения и климатологии при участии специалистов из более чем 15 учреждений страны); научный руководитель – доктор географических наук В. Ф. Логинов, ответственные исполнители в разные годы – кандидат физико-математических наук В. Ф. Иконников, кандидат географических наук В. С. Хомич, кандидат географических наук В. А. Прокопеня, кандидат географических наук О. В. Кадацкая, кандидат географических наук Е. В. Санец;

– подготовка четырех Национальных докладов о состоянии окружающей среды в Республике Беларусь, 1995, 1998, 2000 и 2010 г. (совместно со специалистами ИЭБ НАН Беларуси, Института зоологии НАН Беларуси, БГУ, БелНИЦ «Экология», ЦНИИКИВР, Белгидромета, РНПЦ гигиены и эпидемиологии и др.); научные руководители – доктор географических наук В. Ф. Логинов, кандидат географических наук О. В. Кадацкая;

– задание «Оценить эмиссионные факторы по тяжелым металлам, характерные для стран СНГ (Россия, Украина, Беларусь, Казахстан) – ртуть, свинец, кадмий, никель, медь, цинк», 1996–1998 гг. (совместно со специалистами БГПА, БГТУ, Института геологических наук, БелНИПИЭнергопрома); научные руководители – доктор географических наук В. Ф. Логинов, кандидат географических наук В. С. Хомич;

– задание «Изучить спектральный состав и распределение тяжелых металлов по размерам несущих частиц аэрозольных эмиссий промышленных производств, характерных для стран СНГ (Россия, Украина, Беларусь, Казахстан), 1996–1998 гг. (совместно со специалистами БНТУ, БГТУ, Института геологических наук, БелНИПИЭнергопрома); научные руководители – доктор географических наук В. Ф. Логинов, кандидат географических наук С. В. Какарека;

– разработка Прогноза изменения окружающей среды Беларуси на 2010–2020 годы, 2003–2004 гг. (совместно со специалистами Института зоологии НАН Беларуси, ИЭБ НАН Беларуси, ИГН НАН Беларуси, Института леса НАН Беларуси, БелНИИ мелиорации и луговодства, Отдела проблем Полесья НАН Беларуси, БелНИЦ «Экология», БелНИГРИ, ЦНИИКИВР, НИЭИ Минэкономики, РНПЦ гигиены, РЦРКМ, БелНИЦзем); научный руководитель – академик В. Ф. Логинов, ответственный исполнитель – кандидат географических наук М. И. Струк;

– экологические изыскания на конкурентных пунктах и площадках для размещения БелАЭС по ландшафтным и биоэкологическим критериям и Разработка раздела ОВОС планируемого строительства Белорусской АЭС «Ландшафты, растительный мир, животный мир», 2005–2009 гг. (совместно с ИЭБ и НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам); науч. рук. – кандидат географических наук М. И. Струк;

- разработка Схемы охраны окружающей среды г. Минска, 2006–2007 гг. (совместно с ИЭБ; ЦНИИКИВР, БелНИЦ «Экология», РНПЦ гигиены и эпидемиологии, Минским городским центром гигиены и эпидемиологии, УП «Минскградо»); научный руководитель – доктор географических наук В. С. Хомич;
- научное обеспечение выполнения Государственной программы «Припятское Полесье», 2009–2015 гг. (совместно с ИЭБ, НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам, Институтом мелиорации, ПАЭИ НАН Беларуси); научные руководители – академик А. К. Карабанов, академик И. И. Лиштван, доктор географических наук В. С. Хомич;
- инженерно-экологические изыскания в составе разработки проекта строительства Белорусской АЭС, 2012–2013 гг. (совместно с ИЭБ, НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам, Институтом социологии НАН Беларуси, РЦРКМ); научный руководитель – доктор географических наук В. С. Хомич;
- разработка Программы комплексного экологического мониторинга Белорусской АЭС, 2014–2015 гг. (совместно с ИЭБ, НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам, РЦРКМ); научный руководитель – доктор географических наук В. С. Хомич;
- разработка концепции и научное обоснование Схемы экологических коридоров г. Минска, 2017–2019 гг. (совместно с НИЦ МО БГУ и УП «Минскградо»); научный руководитель – кандидат географических наук Л. А. Кравчук;
- ландшафтно-экологические исследования для разработки схемы градостроительного развития водно-зеленого диаметра г. Минска, 2019 г. (совместно с УП «Минскградо»); научный руководитель – кандидат географических наук Е. В. Санец;
- разработка прогноза состояния окружающей среды Беларуси на период до 2035 года, 2019–2021 гг. (совместно с центром климатологии, лабораториями трансграничного загрязнения, гидрогеологии и гидроэкологии, ИЭБ НАН Беларуси, НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам, ЦНИИКИВР, БелНИЦ «Экология», Белгидрометом, РЦАК); научный руководитель – доктор географических наук В. С. Хомич, ответственные исполнители – кандидат географических наук Е. В. Санец, кандидат географических наук М. И. Струк.

Важнейшие результаты научных исследований лаборатории. Обоснована идея использования элементарных геохимических ландшафтов и природно-техногенных комплексов для изучения и оценки изменений природной среды под влиянием техногенного воздействия. Построена карта элементарных геохимических ландшафтов Беларуси.

Выявлены закономерности естественно-техногенной трансформации природной среды в зонах воздействия карьерно-отвальных и индустриально-селитебных комплексов, водно-мелиоративных осушительных геотехсистем, полигонов коммунальных и производственных отходов. Разработаны подходы и рекомендации по обеспечению устойчивого функционирования природно-техногенных комплексов, рекультивации карьерно-отвальных ландшафтов [1], принципы охраны ландшафтов пригородных зон больших городов равнинных лесных территорий.

Изучены условия и особенности функционирования малонарушенных природных геосистем на территории Беларуси и юге Центральной Сибири [2–4].

Изучены и оценены с использованием гидрохимических и других геохимических показателей состояние и изменение водосборных пространств в условиях разнофакторного техногенного воздействия [5], геосистемы верховых болот [6] и болот урбанизированных территорий [7], структуры педогеохимических полей азота, фосфора и калия в разнотипных ландшафтных системах Беларуси [8]. Установлены пространственно-временные закономерности формирования химического состава воды поверхностного стока с городской территории на примере г. Минска [9]. Выявлены закономерности трансформации природного гидрохимического фона территории Беларуси в природно-техногенный [10].

Разработаны методические основы и схема классификации городских ландшафтов. Выявлена и оценена роль природных и техногенных факторов в формировании структуры и состояния городских ландшафтов. Разработана и апробирована на примере городов Минска, Гомеля, Мозыря и Пинска классификация и методика оценки устойчивости ландшафтов к техногенным химическим нагрузкам [11]. В результате детальных эколого-географических исследований городов созданы серии крупномасштабных карт состояния городской среды и ореолов рассеяния загрязняющих веществ, выявлены закономерности трансформации природной среды, формирования и развития геохимических аномалий в городах, в зонах их влияния и в зонах воздействия локальных источников (полигонов коммунальных и производственных отходов, промплощадок, шламохранилищ). Выявлены особенности распределения тяжелых металлов в городских почвах в зависимости от функционального использования территорий и факторы, их обуславливающие [11, 12].

Выполнена оценка эмиссионных факторов (удельных показателей выбросов) тяжелых металлов и стойких органических загрязнителей (бенз(а)пирена, диоксинов/фуранов, полихлорированных бифенилов и др.) для стран бывшего СССР с целью обеспечения работ по моделированию трансграничного переноса загрязняющих веществ и его последствий [13–15]. Изучен дис-

персный и химический состав промышленных аэрозолей и выявлены особенности распределения тяжелых металлов по размерам несущих частиц с учетом производственной специфики стран бывшего СССР [16]. Выполнен анализ и подготовлено монографическое описание процедур выявления и инвентаризации источников выбросов стойких органических загрязнителей, впервые получены экспериментальные данные о выбросах полициклических ароматических углеводородов и полихлорированных бифенилов (ПХБ) в атмосферу от источников на территории Беларуси, выполнена инвентаризация ПХБ на территории Беларуси [15, 17].

Выполнен анализ и дана оценка состояния окружающей среды в Республике Беларусь за 1991–2014 гг. Подготовлены 23 выпуска ежегодного экологического бюллетеня «Состояние природной среды Беларуси», Национальные доклады о состоянии окружающей среды Республики Беларусь (1995, 1998, 2000 и 2010 г.) (совместно с лабораторией климатологии, учеными и специалистами других учреждений НАН Беларуси, Минприроды, Минздрава, Министерства образования) [18–22].

Разработан комплексный прогноз изменения окружающей природной среды Беларуси на перспективу до 2010–2020 гг. (совместно с лабораторией климатологии, учеными и специалистами других учреждений НАН Беларуси, Минприроды, Минздрава, Министерства образования) [23].

Разработаны методологические основы регионального экологического анализа, позволившие выявить региональные различия в устойчивости природной среды к внешним воздействиям, особенности эволюции расселения и трансформации пространственной структуры природопользования, естественно-географические предпосылки формирования экологической ситуации в Беларуси. Проведено районирование территории Беларуси по условиям размещения экологоопасных производств и объектов [24].

Разработана методика комплексной оценки состояния городской среды, предназначенная для крупномасштабного картографирования и пространственного анализа экологической ситуации на территории города, на основе которой выполнена комплексная оценка состояния окружающей среды Минска и Светлогорска. Разработан комплекс мероприятий по улучшению состояния среды в зонах с напряженной экологической ситуацией в составе Генплана г. Минска [12, 25].

Разработаны методика, инструкция и обоснованы первоочередные объекты по ведению локального мониторинга земель (введены в действие Минприроды). Разработаны предложения по совершенствованию нормативно-методического обеспечения выявления загрязненных почв. Определен перечень приоритетных загрязняющих веществ в почвах различных функциональных зон городов Беларуси, детализированный для почв промплощадок с учетом специализации промышленных предприятий и специфики поступления загрязняющих веществ.

Разработаны методология и информационно-моделирующая система оценки уровня структурно-функциональной организации ландшафтно-рекреационных территорий в городах, включающие методику оценки и картографирования состояния и структурной устойчивости зеленых насаждений городов, алгоритмы оценки рекреационного и экологического потенциала природного комплекса городов [26].

Разработан Проект ОВОС Гарлыкского горно-химического комбината (Туркменистан; совместно с Белгорхимпромом). Выполнены инженерно-экологические изыскания и разработана Программа комплексного экологического мониторинга в зоне наблюдения Белорусской АЭС (совместно с ИЭБ, НПЦ НАН Беларуси по биоресурсам, РЦРКМ).

Выполнена оценка систем природопользования Беларуси и Украины в пределах единого в природном отношении трансграничного Полесского региона, выявлены природные и социально-экономические предпосылки возникновения трансграничных проблем природопользования в Белорусском и Украинском Полесье, что предопределяет необходимость разработки согласованной ландшафтно-планировочной концепции экологической оптимизации пространственной структуры природопользования в трансграничном Полесском регионе с учетом социально-экономических особенностей сопредельных стран [27].

Разработана Концептуальная схема организации природного каркаса урбанизированной территории как составной части ее градостроительной структуры и типовые модели организации природных каркасов для городов различной величины и функционального типа, определяющиеся структурой и положением долинных комплексов рек, озер, водохранилищ, лесных и парковых массивов по отношению к городской застройке. Для крупных и больших многофункциональных, а также промышленных городов, рекомендована к реализации многоуровневая система ядер и экологических коридоров. Разработаны опытные модели организации природных каркасов городов различной величины – Минска (использованы при разработке генплана города), Гродно и Несвижа. Разработана Концептуальная схема организации природного каркаса пригородной территории г. Минска [28].

Разработаны методические подходы к экологической реабилитации техногенно-нарушенных территорий природного комплекса в городах. Подготовлено и издано Руководство «Порядок и прави-

ла экологической реабилитации техногенно-нарушенных природных комплексов на урбанизированных территориях» [29].

Международные конференции и семинары. Одним из показателей успешности функционирования научных организаций и их структурных подразделений является проведение ими международных конференций и семинаров по изучаемым проблемам. Лабораторией в рассматриваемый период было организовано и проведено более 10 международных конференций и семинаров. Среди них:

– Всесоюзная конференция по устойчивости геосистем, 1979 г., г. Минск (при организационной поддержке Института географии РАН);

– Международный семинар по инвентаризации выбросов загрязняющих веществ в атмосферу и использованию справочного руководства EMEP/CORINAIR, 1–2 июня 1997 г., Минск – Раубичи (при организационной поддержке МСЦ «Восток»);

– Международная научная конференция и II Сессия Объединенного научного совета по фундаментальным географическим проблемам при Международной ассоциации академий наук (МААН) на тему «Геоинформационные и геоэкологические исследования в странах СНГ», 1999 г., Минск – Раубичи (при организационной поддержке Института географии РАН);

– Международный семинар «Европейское Полесье – хозяйственная значимость и экологические риски», 19–21 июня 2007 г., аг. Лясковичи (при организационной поддержке ЦЕИ и Национального парка «Припятский»);

– Международная научная конференция и XIII Сессия Объединенного научного совета по фундаментальным географическим проблемам при Международной ассоциации академий наук (МААН) на тему «Глобальные и региональные угрозы и риски устойчивого развития стран и регионов СНГ», 1–4 июня 2009 г., г. Минск (при организационной поддержке Института географии РАН и БГУ);

– Международная научная конференция «Природопользование: экология, экономика, технологии», 6–8 октября 2010 г., г. Минск;

– Научно-практический семинар «Рациональное использование пойменных земель», 19–21 июня 2013 г., аг. Лясковичи (при организационной поддержке Национального парка «Припятский»);

– Международная научно-практическая конференция «Природные ресурсы Полесья: оценка, использование, охрана», 8–11 июня 2015 г., г. Пинск (при организационной поддержке Полесского государственного университета);

– Международная научная конференция «Проблемы рационального использования природных ресурсов и устойчивое развитие Полесья», 14–17 сентября 2016 г., г. Минск;

– Международный научный семинар и XXIII сессия Объединенного научного совета по фундаментальным географическим проблемам при Международной ассоциации академий наук (МААН) на тему «Эколого-географические проблемы перехода к зеленой экономике в странах и регионах СНГ», 5–7 июня 2019 г., г. Гродно (при организационной поддержке Института географии РАН и Гродненского дома науки и техники).

Состав лаборатории и перспективы развития. В юбилейные дни в составе лаборатории насчитывается 13 сотрудников, в том числе заведующая лабораторией кандидат географических наук Е. В. Санец, доктор географических наук В. С. Хомич, кандидат географических наук Л. А. Кравчук, кандидат географических наук М. И. Струк, кандидат геолого-минералогических наук С. В. Савченко, кандидат географических наук Е. П. Овчарова, кандидат географических наук Н. К. Быкова, кандидат географических наук В. А. Рыжиков, научный сотрудник Н. М. Баженова, научный сотрудник Г. М. Бокая, научный сотрудник С. Г. Живнач, научный сотрудник Ю. А. Романкевич, младший научный сотрудник А. Н. Гайшун.

Значительный вклад в развитие исследований лаборатории в разные годы внесли кандидат географических наук А. А. Хомич (руководитель лаборатории в 1971–1994 гг.), кандидат географических наук О. В. Кадацкая, кандидат географических наук В. А. Прокопеня, доктор технических наук С. В. Какарека, доктор географических наук Т. И. Кухарчик, доктор географических наук В. А. Бакарасов, кандидат географических наук Н. В. Ковальчик, кандидат географических наук С. Л. Романов, кандидат биологических наук И. К. Вадковская, доктор географических наук В. Б. Кадацкий, доктор географических наук А. В. Кожаринов, доктор географических наук Г. И. Сачок, доктор геолого-минералогических наук М. П. Оношко, кандидат сельскохозяйственных наук А. М. Максимович, кандидат географических наук В. П. Мацко, кандидат географических наук И. П. Самсоненко, научные сотрудники Е. П. Красуцкая, Е. С. Макаева и др.



Лаборатория оптимизации геосистем. 2017 г.

Geosystem Optimization Laboratory. 2017

В ближайшие годы исследования лаборатории будут связаны с изучением и оценкой пространственно-временной организации природных и природно-техногенных геосистем на урбанизированных территориях и возможностей их ландшафтно-планировочной оптимизации с применением инструментов ландшафтного планирования, эколого-геохимических и дистанционных методов исследований.

Планируется завершение разработки Прогноза состояния окружающей среды Беларуси на период до 2035 года и Стратегии в области охраны окружающей среды Республики Беларусь на период до 2035 года.

Запланированы прикладные исследования для задач научного обеспечения градостроительного проектирования, геоэкологических обоснований объектов нового строительства и реконструируемых объектов, локального мониторинга и др.

В ближайшие годы планируется активизировать работы по подготовке сотрудниками лаборатории докторских и кандидатских диссертаций.

**Доктор географических наук В. С. Хомич,
кандидат географических наук Е. В. Санец**

Список использованных источников

1. Прокопеня, В. А. Основные направления рекультивации карьерно-отвальных ландшафтов. Сер. Сельское хозяйство / В. А. Прокопеня, А. М. Максимович, А. А. Хомич. – Минск, 1981. – 48 с.
2. Сачок, Г. И. Пространственно-временная структура гидрометеорологического режима Белоруссии и сопредельных территорий / Г. И. Сачок. – Минск : Наука и техника, 1980. – 222 с.
3. Кожаринов, А. В. Климато-хорологический анализ популяций лесных растений Белоруссии / А. В. Кожаринов. – Минск : Наука и техника, 1989. – 176 с.
4. Геосистемы контакта тайги и степи: юг Центральной Сибири / Е. П. Бессолицына, С. В. Какарека, А. А. Крауклис, Л. К. Кремер. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1991. – 216 с.
5. Кадацкая, О. В. Гидрохимическая индикация ландшафтной обстановки водосборов / О. В. Кадацкая. – Минск : Наука и техника, 1987. – 134 с.
6. Кухарчик, Т. И. Верховые болота Беларуси: трансформация, проблемы использования / Т. И. Кухарчик. – Минск : Навука і тэхніка, 1996. – 135 с.
7. Быкова, Н. К. Функционирование и трансформация болотных комплексов на урбанизированных территориях (на примере г. Минска) : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.36 / Н. К. Быкова ; Институт природопользования НАН Беларуси. – Минск, 2009. – 22 с.
8. Романов, С. Л. Закономерности структуры педохимических полей азота, фосфора и калия в ландшафтных системах Белоруссии : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.01 / С. Л. Романов ; Московский государственный университет. – М., 1991. – 20 с.
9. Овчарова, Е. П. Эколо-геохимическая оценка поверхностного стока с городской территории (на примере г. Минска) : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.36 / Е. П. Овчарова ; Институт проблем использования природных ресурсов и экологии НАН Беларуси. – Минск, 2006. – 22 с.

10. Ландшафтные воды в условиях техногенеза / О. В. Кадацкая [и др.]. – Минск : Беларуская наука, 2005. – 347 с.
11. Хомич, В. С. Экогеохимия городских ландшафтов Беларуси / В. С. Хомич, С. В. Какарека, Т. И. Кухарчик. – Минск : Минсктиппроект, 2004. – 260 с.
12. Городская среда: геоэкологические аспекты / В. С. Хомич [и др.]. – Минск : Беларуская наука, 2013. – 301 с.
13. Выбросы тяжелых металлов в атмосферу: опыт оценки удельных показателей / С. В. Какарека [и др.]. – Минск, 1998. – 154 с.
14. Heavy metals emission factors assesment for the CIS / S. Kakareka [et al.]. – Minsk, 1998. – 160 p.
15. Какарека, С. В. Стойкие органические загрязнители: источники и оценка выбросов / С. В. Какарека, Т. И. Кухарчик, В. С. Хомич. – Минск : Минсктиппроект, 2003. – 220 с.
16. Particulate matter emission study / S. Kakareka [et al.]. – Minsk, 1999. – 150 p.
17. Кухарчик, Т. И. Полихлорированные бифенилы в Беларуси / Т. И. Кухарчик. – Минск : Минсктиппроект, 2006. – 264 с.
18. Состояние природной среды Беларуси. Экологические бюллетени за 1991–2014 гг. / под ред. В. Ф. Логинова. – Минск, 1993–2015.
19. Государственный доклад о состоянии окружающей среды в Республике Беларусь / В. Ф. Логинов [и др.]. – Минск, 1995. – 147 с.
20. The national report on environment conditions in the Republic of Belarus / V. F. Loginov [et al.]. – Minsk, 1995. – 104 с.
21. The National Report on environmental conditions in the Republic of Belarus / V. F. Loginov [et al.]. – Denmark, 1998. – 40 p.
22. Состояние окружающей среды Республики Беларусь: нац. доклад / О. В. Кадацкая [и др.]. – Минск : Белтаможсервис, 2010. – 150 с.
23. Прогноз изменения окружающей природной среды Беларуси на 2010–2020 гг. / под ред. В. Ф. Логинова. – Минск, 2004. – 180 с.
24. Струк, М. И. Региональные особенности оптимизации окружающей среды Беларуси / М. И. Струк. – Минск, 2007.
25. Светлогорск: экологический анализ города / В. С. Хомич [и др.]. – Минск : Минсктиппроект, 2002. – 216 с.
26. Кравчук, Л. А. Структурно-функциональная организация ландшафтно-рекреационного комплекса в городах Беларуси / Л. А. Кравчук. – Минск, 2011. – 171 с.
27. Проблемы природопользования в трансграничном регионе Белорусского и Украинского Полесья / под ред. В. П. Палиенко, Л. Ю Сорокиной, В. С. Хомича ; Институт географии НАН Украины ; Институт природопользования НАН Беларуси. – Киев : Изд-во «Сталь», 2013. – 290 с.
28. Природно-экологический каркас как основа зеленой инфраструктуры урбанизированной территории / Л. А. Кравчук [и др.] // Эколого-географические проблемы перехода к зеленой экономике в странах и регионах СНГ. – Минск : СтройМедиаПроект, 2019. – С. 116–131.
29. Порядок и правила экологической реабилитации техногенно-нарушенных природных комплексов на урбанизированных территориях : руководство / Л. А. Кравчук [и др.]. – Минск, 2020. – 54 с.

ХРОНИКА
CHRONICS

**ИТОГИ МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ ОЧНО-ЗАОЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«РАЗВИТИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ В БЕЛАРУСИ В ХХ–ХХІ вв.»,
ПОСВЯЩЕННОЙ 100-ЛЕТИЮ БГУ, 60-ЛЕТИЮ КАФЕДРЫ ФИЗИЧЕСКОЙ ГЕОГРАФИИ
МИРА И ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И 100-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ
ПРОФЕССОРА О. Ф. ЯКУШКО**

**RESULTS OF THE INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE
"DEVELOPMENT OF GEOGRAPHICAL RESEARCH IN BELARUS IN THE XX–XXI CENTURIES",
DEDICATED TO THE 100th ANNIVERSARY OF BSU, THE 60th ANNIVERSARY
OF THE DEPARTMENT OF PHYSICAL GEOGRAPHY OF THE WORLD
AND EDUCATIONAL TECHNOLOGIES AND THE 100TH ANNIVERSARY
OF THE BIRTH OF PROFESSOR O. F. YAKUSHKO**

23–26 марта 2021 г. на факультете географии и геоинформатики Белорусского государственного университета состоялась Международная научно-практическая очно-заочная конференция «Развитие географических исследований в Беларуси в ХХ–ХХІ вв.», посвященная 100-летию БГУ, 60-летию кафедры физической географии мира и образовательных технологий и 100-летию со дня рождения профессора О. Ф. Якушко. Конференция была организована совместно с Министерством природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь и Национальной академией наук Беларуси. Информационным спонсором конференции выступило Белорусское географическое общество.

Цели конференции – раскрыть значение географических исследований в Республике Беларусь на протяжении ХХ и ХХІ вв. для достижения целей устойчивого развития, обменяться практическим и теоретическим опытом научных сотрудников и педагогов географического профиля, выработать рекомендации по научному и методическому обеспечению учебного процесса в учреждениях образования и интеграции науки, практики и образования.

Конференция была организована в комбинированном формате: наряду с заочным и очным участием, многие гости из Беларуси и зарубежных стран присутствовали на конференции в режиме онлайн.

Открыли работу конференции первый проректор Белорусского государственного университета Д. Г. Медведев и декан факультета географии и геоинформатики Д. М. Курлович. Гостей и участников конференции приветствовал председатель Белорусского географического общества А. Е. Яротов.



На пленарном заседании были представлены доклады ведущих специалистов Республики Беларусь в области гидрометеорологии, физической географии и смежных наук: академика НАН Беларуси В. Ф. Логинова, заместителя директора по науке Института экспериментальной ботаники имени В. Ф. Купревича Д. Г. Груммо, профессора кафедры общего землеведения и гидрометеорологии П. С. Лопуха, а также одного из ведущих специалистов в области мониторинга озоносферы А. Н. Красовского. С онлайн докладом выступил профессор кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы Института экологии и природопользования Казанского (Приволжского) федерального университета Ю. П. Переображенцев. В завершение пленарного заседания о роли профессора О. Ф. Якушко в формировании научных исследований и научной школы лимнологии в Беларуси выступил заведующий научно-исследовательской лабораторией озероведения профессор Б. П. Власов.

В работе конференции приняли участие около 250 представителей из восьми стран мира: Беларуси, России, Украины, Азербайджана, Молдовы, Литвы, Польши, Китая. Среди них – сотрудники научно-исследовательских учреждений и высших учебных заведений, учителя географии, аспиранты,магистранты.



Во время работы конференции на факультете географии и геоинформатики были организованы выставки научных, учебных и учебно-методических трудов сотрудников кафедры общего землеведения и гидрометеорологии, кафедры физической географии мира и образовательных технологий и работ Ольги Филипповны Якушко, а также опубликованы информационные материалы в сети Интернет по основным вопросам, обсуждаемым на конференции. К началу работы конференции был издан сборник материалов конференции: Развитие географических исследований в Беларуси в XX–XXI веках [Электронный ресурс] : материалы Междунар. науч.-практ. оч.-заоч. конф., посвящ. 100-летию Белорус. гос. ун-та, 60-летию каф. физ. географии и образоват. технологий, 100-летию со дня рожд. проф. О. Ф. Якушко, Минск, 24–26 марта 2021 г. / Белорус. гос. ун-т ; под общ. ред. П. С. Лопуха ; редкол.: П. С. Лопух (гл. ред.) [и др.]. – Минск : БГУ, 2021.

Доклады и материалы участников конференции были представлены на двух секциях: в рамках секции I работали диалоговые площадки по темам «Климатические риски и актуальные проблемы климатологии и метеорологии» и «Актуальные проблемы лимнологии и гидрологии», в рамках секции II – «Иновационные педагогические технологии и развитие географического образования» и «Теория и методология современных географических исследований».

В рамках конференции также состоялись Научные чтения, посвященные 100-летию со дня рождения профессора Ольги Филипповны Якушко, участниками которых были заслушаны сообщения «Ольга Филипповна Якушко – выдающийся деятель белорусской науки» академика НАН Беларуси В. Ф. Логинова и профессора П. С. Лопуха и «Вклад Ольги Филипповны Якушко в становление отечественной лимнологии» профессора Б. П. Власова, а также прозвучали приветственные обращения родственников и близких Ольги Филипповны (онлайн), воспоминания ее соратников-коллег и учеников, выпускников и сотрудников факультета географии и геоинформатики БГУ.

На Научных чтениях, посвященных 60-летию кафедры физической географии мира и образовательных технологий, после воспоминаний сотрудников и выпускников кафедры физической географии мира и образовательных технологий, гостей мероприятия «Долгий славный путь в высшем образовании и науке» прозвучали отражающие направления научной и методической деятельности кафедры научные доклады сотрудников кафедры-юбиляра доцента А. Е. Яротова «Развитие школы дендрохронологических и дендроклиматических исследований в БГУ», старшего преподавателя М. М. Ермолович «Развитие системы методической подготовки педагогов-географов в БГУ», доцента М. С. Кастроцкой «Основные направления научной и научно-инновационной деятельности плодоводства» и магистранта кафедры В. Рымарчук совместно с научным руководителем доцентом Е. Г. Колымаковой «Разработка электронного учебно-методического обеспечения по физической географии для 6 классов учреждений общего среднего образования».

Во время конференции также был проведен круглый стол «Наука и молодежь: роль научно-исследовательской работы студентов, магистрантов и аспирантов в развитии географической науки», целью которого явилось обсуждение актуальных проблем и новых форм организации научно-исследовательской работы студентов факультета географии и геоинформатики в условиях развития информационного общества. С установочным докладом «Международное сотрудничество в образовании и

науке: трудности и преимущества» выступила доцент кафедры общего землеведения и гидрометеорологии, ведущий научный сотрудник Института природопользования НАН Беларуси И. С. Данилович.

В мероприятии приняли активное участие около 40 увлеченных, мотивированных на достижение высоких результатов в научных изысканиях студентов, магистрантов и аспирантов факультета географии и геоинформатики.

Круглый стол «Адаптация к изменению климата в Беларуси: практики вовлечения общественности» был организован совместно с проектом «Ответственные исследования и инновации на пилотных территориях как метод поддержки инновационных действий в защиту климата (Territorial Responsible Research and Innovation fostering Innovative Climate Action – TeRRIFICА)», реализуемым в консорциуме международных партнеров Ассоциации «Образование для устойчивого развития в Беларуси». Предметом обсуждения экспертов проектов TeRRIFICА и Minsk Smart City, представителей «Международной инициативы Хартия Земли» и Центрального Совета МОО «ЭКОПРОЕКТ», а также многочисленных участников мероприятия были условия и возможности вовлечения общественности в разработку практик адаптации к климатическим изменениям на пилотной территории г. Минска.

Конференция показала, что на протяжении XX–XXI вв. географическая наука в Беларуси вышла на качественно новый уровень развития, обусловленный возросшим значением географии в понимании сложных природных и социальных процессов и явлений, происходящих на планете в целом и на территории нашей страны в частности, в оптимизации использования ее пространства и освоении ресурсов, в решении проблем взаимоотношения природы и деятельности людей, в осмысливании будущего Земли и возможности развития человеческого общества с его постоянно растущими запросами. Эти обстоятельства обусловили формирование в рамках географии целого ряда научных направлений, которые базируются на системном подходе, носят междисциплинарный характер и опираются на новейшие методы исследований. В современных сложившихся условиях особенно актуальными проблемами являются глобальное потепление климата и адаптация субъектов хозяйствования к неустойчивым климатическим условиям.

Проведенная конференция продемонстрировала необходимость и востребованность международных научных и учебных контактов среди организаций и физических лиц – представителей географической науки, практики и образования. Консолидация усилий географов и представителей смежных специальностей по изучению и популяризации знаний об особенностях природы, хозяйства и населения государств и регионов является непременным условием для достижения целей рационального природопользования и устойчивого развития.

По результатам конференции принято решение:

1. Считать актуальными направлениями исследования в области теории и методологии географических исследований в Беларуси и за рубежом:
 - изучение современных методов и технологий физико-географических исследований;
 - совершенствование теории и практики гидрометеорологических исследований, в том числе на междисциплинарной основе;
 - разработку практических рекомендаций по обеспечению устойчивого развития на региональном уровне, гидрометеорологической безопасности, рационального природопользования, а также по сохранению природного и культурного наследия;
 - совершенствование преподавания географии в средней и высшей школе на основе внедрения форм трансляции знаний через ступенчатое повышение квалификации;
 - активное вовлечение молодых ученых, студентов, магистрантов и аспирантов в выполнение научных исследовательских программ;
 - разработку практических рекомендаций по адаптации к изменениям климата в Беларуси и практики вовлечения общественности в их реализацию.
2. Консолидировать усилия географов и специалистов смежных специальностей по изучению и популяризации знаний об особенностях природы, хозяйства и населения государств и регионов для целей рационального природопользования и устойчивого развития.
3. Активизировать международные научные и учебные контакты среди организаций и физических лиц – представителей географической науки, практики и образования – под эгидой общественных организаций – национальных географических обществ, в том числе Белорусского географического общества.
4. В целях укрепления научных и производственных контактов между специалистами-географами на внутриреспубликанском и межгосударственном уровне ежегодно проводить научно-практическую конференцию «Развитие географических исследований в XXI в.» на базе факультета географии и геоинформатики БГУ.

П. С. Лопух, Ю. А. Гледко, Е. В. Матюшевская

ПАМЯТИ УЧЕНОГО
IN THE MEMORY OF A SCIENTIST

ПАМЯТИ ГЕРМАНА ИВАНОВИЧА КАРАТАЕВА
IN THE MEMORY OF GERMAN IVANOVICH KARATAEV

(03.10.1931–26.01.2021)



3 октября 1931 г. в г. Балаганске Иркутской области Российской Федерации родился известный ученый в области геофизики, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Института природопользования НАН Беларуси, академик Международной академии энергоинформационных наук Герман Иванович Каратаев. Воспитание в интеллигентной семье определило в характере Г. И. Каратаева такие черты, как целеустремлённость, аккуратность в решении житейских и научных задач, четкое видение проблем и путей их решения, любовь к культурным ценностям, в особенности к классической музыке и литературе.

В 1953 г. Герман Иванович окончил с красным дипломом Новосибирский институт инженеров геодезии, аэрофотосъемки и картографии, получив геофизическое образование под руководством известного геофизика-гравиметриста профессора А. К. Маловичко. Свою трудовую деятельность Г. И. Каратаев начал в Сибирском геофизическом тресте, одновременно преподавая в Новосибирском геологоразведочном техникуме. С 1955 по 1958 г. Герман Иванович

был ассистентом кафедры геофизических методов поисков и разведки месторождений полезных ископаемых Пермского университета, возглавляемой А. К. Маловичко, читал лекции и проводил лабораторные занятия, совмещая их с производственной деятельностью в конторе «Пермнефтегеофизика».

В 1958 г. Г. И. Каратаев возвратился в г. Новосибирск, где работал в Институте геологии и геофизики СО АН СССР в должности младшего, а затем старшего научного сотрудника и заведующего лабораторией.

В 1961 г. он защитил кандидатскую диссертацию «Гравитационное поле Пермского Прикамья», в которой наметилось его основное научное направление – комплексная геолого-геофизическая интерпретация потенциальных полей.

Это направление геофизических исследований привело Германа Ивановича к известному ученому, запожившему основы комплексной геологической интерпретации гравитационных и магнитных аномалий на Русской плите, члену-корреспонденту АН СССР Э. Э. Фотиади, в результате плодотворной работы с которым в Институте геологии и геофизики СО АН СССР (Академгородок, г. Новосибирск) Г. И. Каратаев создал теорию, методику и компьютерную технологию комплексного корреляционного геологического прогнозирования месторождений полезных ископаемых на основе геофизических полей.

В 1961 г. в Академгородке Герман Иванович организовал первую Всесоюзную школу по применению электронно-вычислительных машин в геофизических исследованиях.

В 1968 г. в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова Г. И. Каратаев защитил докторскую диссертацию на тему «Корреляционная схема интерпретации гравитационных и магнитных аномалий».

В период работы в Институте геологии и геофизики СО АН СССР у Германа Ивановича под влиянием Э. Э. Фотиади и академика А. Л. Яншина определились два ведущих научных направления: теория комплексирования геофизических полей в аспекте геологической интерпретации и изучение глубинного строения литосферы и тектонофизических процессов формирования земной коры и верхней мантии. Г. И. Каратаевым впервые для Сибири была построена карта мощности земной коры и создан Байкальский геодинамический полигон для изучения современных тектонофизических процессов.

В 1971 г. Герману Ивановичу Каратаеву было присвоено звание профессора.

Новый этап научно-исследовательской деятельности Германа Ивановича (с 1971 г.) связан с Беларусью. Здесь прежде всего были практически реализованы идеи корреляционного геологического прогнозирования месторождений полезных ископаемых на основе компьютерной интерпретации геофизических полей. В БелНИГРИ, где Г. И. Карапаев руководил отделом математических исследований в геологии и геофизике, была создана уникальная для того времени автоматизированная прогнозирующая система, которая получила серебряную медаль на Всесоюзной выставке достижений народного хозяйства СССР в г. Москве и широко применяется до настоящего времени в разных странах.

В 1987 г. Герман Иванович был приглашен в Институт геохимии и геофизики НАН Беларуси в качестве заведующего лабораторией физики Земли, где основным направлением исследований являлось изучение геофизическими методами глубинного строения литосферы и тектонофизических процессов. Геофизические и геотектонические исследования, которые Г. И. Карапаев проводил совместно с Р. Г. Гарецким, увенчались открытиями новых тектонических структур Восточно-Европейской платформы (Полоцко-Курземский пояс разломов, Слободской тектоно-геодинамический узел). Был составлен комплект карт глубинного строения земной коры Беларуси, путем физико-геологического моделирования изучена история формирования зоны сочленения Фенноскандинавского и Сарматского геосегментов платформы, создана и функционирует Белорусская система геодинамических полигонов для изучения современных тектонофизических процессов.

Очень важны исследования Германа Ивановича в области экологической геофизики и геологии. Им разработана специальная геолого-математическая модель эколого-тектонофизической среды Беларуси, способная по геолого-геофизическим материалам давать оценку экологического состояния на изучаемый период и сформулировать мероприятия по предотвращению возможных отрицательных влияний тектонофизического и космического факторов на состояние здоровья человека и объектов его жизнедеятельности.

С 2008 г. Г. И. Карапаев работал в лаборатории геодинамики и палеогеографии, а с 2017 г. – в лаборатории геотектоники и геофизики Института природопользования НАН Беларуси, продолжая геотектонические и геофизические изыскания: руководил заданием по геофизическим и геологическим исследованиям структурно-вещественных комплексов Беларуси, геофизическими работами для проектирования ответственных инженерных сооружений, исследованиями в Восточной Антарктиде, принимал участие в проектах «Космические исследования» и «Геологические модели», Eurobridge-95, -96, -97, Celebration-2000, Gerorift-2013.

Исследования глубинного строения недр Беларуси и Украины по проекту Георифт-2013, одним из авторов которого является Герман Иванович, вошли в ТОП-10 в области фундаментальных и прикладных исследований НАН Беларуси за 2018 год.

Результаты научных исследований Г. И. Карапаева (более 350 научных работ, в том числе 15 монографий) опубликованы в отечественных и зарубежных изданиях.

Наряду с научной деятельностью Герман Иванович более 15 лет читал лекции студентам-геологам на кафедре динамической геологии географического факультета Белорусского государственного университета.

Г. И. Карапаев обладал высоким профессионализмом в вопросах решения геолого-геофизических задач, способностью анализировать ситуации и принимать оптимальные решения, соответствующие современному уровню развития геологической и геофизической науки, обладал аналитическим мышлением, обязательностью, умением сохранять хорошие отношения с коллегами по работе.

Можно отметить, что Герман Иванович обладал уникальным сочетанием физико-математического, геофизического и геологического мышления для успешного познания недр Земли, за что мы ему благодарны и чего нам всем будет не хватать в будущем.

Геологическая наука потеряла известного ученого мирового уровня, но результаты трудовой и научной деятельности Германа Ивановича Карапаева еще долгое время будут служить следующим поколениям геофизиков, геологов, сейсмологов и являться базовой основой для дальнейшего геологического изучения недр Беларуси, смежных территорий Восточно-Европейской платформы и Антарктики.

Редакция журнала «Природопользование», коллеги

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Природопользование» просит авторов руководствоваться приведенными ниже правилами.

I. Статьи о результатах работ, проведенных в научных учреждениях, должны иметь разрешение на опубликование (сопроводительное письмо ректората или дирекции соответствующего института либо выписку из протокола заседания ученого совета, отдела или кафедры, а также акт экспертизы).

II. Статья предоставляется в редакцию на белорусском или русском языках; шрифт – Arial, кегль – 10 (в том числе в формулах); межстрочный интервал – одинарный. Занумерованные формулы выключаются в отдельную строку. В тексте не допускаются рукописные вставки и в克莱йки. Статья должна быть подписана всеми авторами.

III. Статья должна иметь следующую структуру:

1. Индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК);

инициалы и фамилии авторов;

название статьи;

полное наименование учреждений, где работают авторы, с указанием города и страны, адрес электронной почты каждого автора.

2. Аннотация (авторское резюме) объемом 150–250 слов должна кратко представлять результаты работы и быть понятной, в том числе и в отрыве от основного текста статьи; должна быть информативной, хорошо структурированной (один из вариантов написания аннотации – краткое повторение структуры статьи, включающее введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение или выводы).

3. Ключевые слова – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования; рекомендуемое количество ключевых слов 5–10.

4. Затем метатекстовые данные (все то, что предшествует основному тексту статьи) приводятся на английском языке, причем аннотация должна быть оригинальной (т. е. не являться дословным переводом русскоязычной аннотации). Если статья англоязычная – вышеуказанные данные приводятся на русском (белорусском) языке.

5. Основной текст статьи должен составлять 10–16 с. (т. е. около 40 тыс. знаков); в этот объем также входят таблицы и рисунки, число которых не должно превышать 10. Изложенный материал должен быть четко структурированным: введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы). В русско- и белорусскоязычных статьях рекомендуется делать подрисуночные подписи и надписи на самих иллюстрациях на двух языках – русском (белорусском) и английском.

6. Список использованной литературы (не более 40 ссылок) оформляется в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь (ГОСТ 7.1-2003). Цитированная литература приводится общим списком по мере упоминания, ссылки в тексте даются порядковым номером в квадратных скобках (напр., [1]); ссылки на неопубликованные работы не допускаются).

7. Затем приводится список цитированных источников в романском алфавите («References») со следующей структурой: авторы (транслитерация), название статьи в транслитерированном варианте [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках], название русскоязычного источника (транслитерация) [перевод названия источника на английский язык – парафраз (для журналов можно не делать)], выходные данные с обозначениями на английском языке.

7. Если присутствует информация о финансировании (поддержке грантами проектов и т. п.), ее следует

давать на русском (белорусском) и английском языках под заголовками «Благодарности» («Падзяка»), «Acknowledgements».

IV. Для подготовки метаданных (так называемый информационный лист) на отдельной странице следует указать на русском и английском языках для каждого автора: фамилию, имя и отчество (полностью), звание, должность, место работы с указанием адреса, контактную информацию (e-mail, телефоны).

V. Электронный вариант статьи предоставляется на диске, флэшке или присыпается по электронной почте в редакцию журнала – eco@ecology.basnet.by. Текст должен быть набран в Word под Windows, формулы – в редакторе MathType.

Правила оформления статьи:

параметры страницы – формат А4;
поля – верхнее и нижнее по 2,5 см, левое и правое по 2 см (**страницы не нумеровать!**);

текст набирается шрифтом Arial, кегль 10;
межстрочный интервал – одинарный;
абзацный отступ – 10 мм.

Собственным редактором формул версий Microsoft Office 2007 и выше пользоваться нельзя, так как в редакционно-издательском процессе он не поддерживается. Вставку символов выполнять через меню «Вставка\Символ». Выключку вверх и вниз (C², C₄) выполнять через меню «Формат\Шрифт\Верхний индекс», «Формат\Шрифт\Нижний индекс». Латинские буквы необходимо набирать курсивом, греческие – прямо (для набора греческих символов следует пользоваться гарнитурой Symbol). Обозначения математических функций (lim, sup, ln, sin, Re, Im и т. п.), символы химических элементов (N, C1) также набираются прямым шрифтом.

VI. Черно-белые и цветные рисунки вставляются в текст статьи (Word) после первого упоминания о них, а также даются в виде отдельных файлов в графическом формате (600 точек на дюйм). Фотографии, помещаемые в статье, должны иметь контрастное черно-белое или цветное изображение. Желательно предоставлять иллюстрации в формате оригинала (Corel, диаграммы в Excel и т. д.), т. е. в той программе, в которой они выполнены. Текст на рисунках набирается основной гарнитурой, причем начертание символов (греческое, латинское) должно соответствовать их начертанию в тексте. Размер кегля соизмерим с размером рисунка (желательно 9 пунктов). На обороте рисунков (если они даются отдельно) указываются фамилии авторов, название статьи. Фотографии предоставляются в виде файлов (tif, jpg, png, eps) и в распечатанном виде. Таблицы должны иметь названия на русском и английском языках и располагаться непосредственно по тексту. Не рекомендуется выполнять горизонтальные таблицы. Следует различать дефис «-» и тире «–». В тексте тире отделяется единичными пробелами, между цифрами и числами ставится без пробелов.

VII. Поступившая в редакцию статья направляется на рецензию, затем визируется членом редколлегии. Основным критерием целесообразности публикации является новизна и информативность статьи. Если по рекомендации рецензента статья возвращается автору на доработку, то переработанная рукопись вновь рассматривается редколлегией. Статьи не по профилю журнала возвращаются авторам после заключения редколлегии.

Материалы для публикации следует направлять по адресу: ул. Ф. Скорины, 10, комн. 202, редакция журнала «Природопользование», 220076, г. Минск, Республика Беларусь, либо по электронной почте: eco@nature-nas.by. Тел. для справок: +375 17 325 84 55.

Научное издание
Scientific publication

ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ
NATURE MANAGEMENT

№ 1, 2021

Редактор Н. Т. Гавриленко
Editor N. T. Gavrilenko

Компьютерная верстка Т. Н. Козловская
Computer page making T. N. Kozlovskaya

Подписано в печать 30.06.2021.
Format 60×90/8. Бумага офсетная.
Гарнитура Ариал. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 28,36.
Уч.-изд. л. 26,0.
Тираж 120 экз.
Заказ № 638.

*Signed into print 30.06.2021.
60×90/8 format. Office paper.
Arial garniture. Digital print.
Conditional printed sheets 28.36.
Conditional edited sheets 26.0.
Circulation 120 copies.
Order No. 638.*

Полиграфическое исполнение
Государственное предприятие
«СтройМедиаПроект».
Свидетельство о государственной
регистрации издателя,
изготовителя, распространителя
печатных изданий
№ 2/42 от 13.02.2014.
Ул. В. Хоружей, 13/61, 220123, г. Минск

*Polygraph execution
State Enterprise
‘StroiMediaProject’.
The Certificate of state registration
of the publisher, manufacturer,
distributor of
printed publications.
No. 2/42 from 13.02.2014.
13/61, V. Choruzhey Str., 220123, Minsk*