

# ЭКОЛОГИЯ

промышленного  
производства



МЕЖОТРАСЛЕВОЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

Выпуск 3  
Москва 2023



## Все новейшие достижения и современные разработки предприятий оборонного комплекса — в научно-технических журналах ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас» является издателем следующих научных журналов:



Межотраслевой научно-технический журнал  
**Оборонный комплекс — научно-техническому прогрессу России**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **79379**  
**Издается с 1984 года**



Межотраслевой научно-технический журнал  
**Конструкции из композиционных материалов**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **80089**  
**Издается с 1981 года**



Научно-технический журнал  
**Информационные технологии в проектировании и производстве**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **79378**  
**Издается с 1976 года**



Межотраслевой научно-практический журнал  
**Экология промышленного производства**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **80090**  
**Издается с 1993 года**



Научно-практический журнал  
**Вопросы защиты информации**  
(4 выпуска)  
Подписной индекс **79187**  
**Издается с 1974 года**

Все издания ФГУП «Научно-технический центр оборонного комплекса «Компас»:

✓ включены решением ВАК Министерства науки и высшего образования России в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук;

✓ метаданные выпусков включены в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Более подробную информацию об изданиях, подписке, дополнительных услугах можно получить по тел.: 8 (495) 491-43-17, 8 (495) 491-77-67, 8 (495) 491-77-20 (подписка);  
факс: 8 (495) 491-44-80.  
E-mail: [izdanie@ntckompas.ru](mailto:izdanie@ntckompas.ru)



# ЭКОЛОГИЯ

## промышленного

## производства

МЕЖОТРАСЛЕВОЙ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

Выпуск 3 (123)

Издается с 1993 г.

Москва 2023

### СОДЕРЖАНИЕ

#### ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ, УТИЛИЗАЦИЯ И ПЕРЕРАБОТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ И БЫТОВЫХ ОТХОДОВ

- Акимова А. С., Филиппова Л. С., Пикалов Е. С.* Теплоизоляционный материал с пониженным водопоглощением на основе древесных и полимерных отходов ..... 2
- Гаевая Е. В.* Геоэкологическая оценка буровых шламов и способ их утилизации ..... 8
- Шумилов О. И., Касаткина Е. А., Кирцидели И. Ю., Макаров Д. В.* К вопросу об использовании микроскопических грибов для оценки токсичности и извлечения редкоземельных металлов из отходов производства лопаритовых руд ..... 13

#### ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДООЧИСТКА

- Русанова К. Р., Ксенофонтов Б. С., Бондаренко А. В.* Очистка сточных вод от микропластика с исследованием природы и свойств загрязнений ..... 19
- Масленников А. А., Демидова С. А., Яхьяева М. Х., Новикова О. Н.* Характеристика негативных проявлений нитроглицерина при содержании в воде водоёмов ..... 28
- Беляева О. В., Гора Н. В., Горелкина А. К., Голубева Н. С., Иванова Л. А.* Анализ процесса выщелачивания вскрышных пород как дополнительного источника поступления некоторых ионов в карьерные сточные воды ..... 33

#### ЧРЕЗВЫЧАЙНЫЕ СИТУАЦИИ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

- Пакина А. А., Цымбал М. Н., Шландакова С. Д.* Эколого-экономические аспекты закрытия полигона "Красный Бор" в контексте экономики замкнутого цикла ..... 37

#### ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

- Булаева Н. М., Бекмурзаева Р. Х., Гаджиханов А. С.* Региональная система учета и контроля парниковых газов на основе геоинформационных технологий на карбоновом полигоне ЧГУ им. А. А. Кадырова ..... 43
- Демидюк В. В.* Теория и практика экологического мониторинга промышленных предприятий. Современный взгляд ..... 48
- Старостин И. А., Овчинников Е. В., Ещин А. В.* Анализ мировых тенденций снижения экологической нагрузки при использовании мобильных энергетических средств в коммунальном, дорожно-строительном и сельском хозяйстве ..... 54
- Розенталь О. М., Федотов В. Х.* Методы нечеткой логики на службе водно-экологических исследований ..... 61

#### Главный редактор

**М. В. Слипенчук**, д-р экон. наук, проф., зав. кафедрой рационального природопользования географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова

#### Заместители главного редактора:

**В. Ф. Гракович**, д-р техн. наук, проф., Национальный фонд содействия устойчивому развитию регионов;  
**А. Г. Ишков**, д-р хим. наук, проф., ПАО «Газпром»;  
**Н. П. Кузнецов**, д-р техн. наук, проф., ИжГТУ им. М. Т. Калашникова

**Ответственный секретарь К. В. Трыкина**, начальник отдела научных и информационных изданий ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»

#### Редакционный совет:

**М. Ч. Залиханов**, акад. РАН, проф., РАН; **И. Н. Мешков**, акад. РАН, проф., Объединенный институт ядерных исследований; **Н. П. Тарасова**, чл.-кор. РАН, д-р хим. наук, проф., Институт проблем устойчивого развития РХТУ им. Д. И. Менделеева

#### Редакционная коллегия:

**А. М. Амирханов**, канд. биол. наук, Федеральная служба по надзору в сфере природопользования; **С. С. Бабкина**, д-р хим. наук, проф., Институт тонких химических технологий им. М. В. Ломоносова РТУ МИРЭА; **Я. И. Вайсман**, д-р мед. наук, проф., Пермский национальный исследовательский политехнический университет; **В. А. Девислов**, д-р тех. наук, МГТУ им. Н. Э. Баумана; **О. Д. Доронина**, д-р биол. наук, проф., Академия труда и социальных отношений; **Е. Ю. Дорохина**, д-р экон. наук, проф. РЭУ им. Г. В. Плеханова; **М. Н. Дадашев**, д-р техн. наук, проф., РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина; **А. П. Глинушкин**, акад. РАН, ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас»; **В. Г. Исаков**, д-р техн. наук, проф., ИжГТУ им. М. Т. Калашникова; **М. А. Корепанов**, д-р техн. наук, ИжГТУ им. М. Т. Калашникова; **Б. С. Ксенофонтов**, д-р техн. наук, проф., МГТУ им. Н. Э. Баумана; **В. Н. Ложкин**, д-р тех. наук, проф., Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России; **В. Ю. Мелешко**, д-р техн. наук, проф., Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН; **В. Ф. Меньшиков**, канд. техн. наук, Госкорпорация «Росатом»; **Н. Г. Рыбальский**, д-р биол. наук, проф., НИА «Природные ресурсы»; **И. Ш. Сайфуллин**, д-р хим. наук, проф., НИИ инновационного развития промышленности РЭУ им. Г. В. Плеханова; **А. А. Соловьянов**, д-р хим. наук, проф., Центр научных исследований и разработок ФГБУ «ВНИИ «Экология»; **В. А. Тенев**, д-р физ.-мат. наук, проф., ИжГТУ им. М. Т. Калашникова; **В. В. Тетельмин**, д-р техн. наук, проф., Общественный совет при Минэнерго РФ; **Ю. В. Трофименко**, д-р техн. наук, проф., НИИ энергетических проблем автотранспортного комплекса при МАДИ; **Б. С. Федоров**, д-р техн. наук, проф., ООО «Концерн ЭКОМАШ»; **С. Г. Харченко**, д-р физ.-мат. наук, проф., РУДН; **С. С. Чеботарев**, д-р экон. наук, проф., АО «ЦНИИ экономики, информатики и систем управления»



# Обезвреживание, утилизация и переработка промышленных и бытовых отходов

УДК 678

DOI: 10.52190/2073-2589\_2023\_3\_2

EDN: LZRJIO

## Теплоизоляционный материал с пониженным водопоглощением на основе древесных и полимерных отходов

А. С. АКИМОВА, Л. С. ФИЛИППОВА, Е. С. ПИКАЛОВ, канд. техн. наук  
Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых,  
г. Владимир, Россия

*Представлены результаты исследования возможности снижения водопоглощения древесно-полимерных материалов, изготовленных на основе отходов, за счет пропитки древесного наполнителя техническим льняным маслом. Наполнителем в исследуемом материале являются отходы мягких сортов древесины, а связующее получают в результате растворения отходов изделий из пенополистирола в метиленхлориде. Образцы материала были получены в результате перемешивания предварительно пропитанного техническим льняным маслом наполнителя с раствором связующего, холодного прессования сырьевой смеси с последующей термообработкой для удаления растворителя. Установлены объемы древесного наполнителя и добавок, при которых возможно максимальное снижение водопоглощения при сохранении остальных свойств на уровне нормативных требований для древесноволокнистых плит.*

**Ключевые слова:** древесные отходы, полимерные отходы, утилизация отходов, композиционный материал, теплоизоляционный материал, энергоэффективность.

Теплоизоляционные материалы являются одной из самых распространенных групп материалов. За счет низкого коэффициента теплопроводности они обеспечивают комфортный температурный режим, энергоэффективность обслуживания зданий и проведения технологических процессов при их использовании в строительной и технической разновидностях теплоизоляции, а также при теплоизоляции транспортных средств.

Как и в большинстве сфер человеческой деятельности наибольшими перспективами и эксплуатационными преимуществами обладают композиционные

материалы, которые позволяют комбинировать и усиливать преимущества, уменьшать недостатки наполнителей и связующих. Использование отходов в качестве компонентов сырьевых смесей для получения композиционных материалов позволяет уменьшить антропогенную нагрузку на окружающую среду и понизить стоимость производственного цикла. При этом важно, чтобы применение отходов обеспечивало сохранение качества продукции, сохраняло экологическую безопасность продукции и технологического цикла, а процесс переработки, по возможности, позволял бы, утилизировать большое количество отходов, отличался высокой производительностью и низкой энергоемкостью.

Наиболее актуальными и перспективными являются возможности совместной переработки различных отходов в одном процессе, использования отходов в качестве основных компонентов сырьевых смесей и применение отходов не как инертного заполнителя для снижения стоимости продукции, а в качестве компонентов, оказывающих положительное влияние на технологические свойства сырьевых смесей и эксплуатационные свойства продукции.

---

**Акимова Анастасия Сергеевна**, студентка кафедры "Химия".

E-mail: anastas.akimova2002@gmail.com

**Филиппова Любовь Сергеевна**, студентка кафедры "Химия".

E-mail: fil.gasdertyu5@gmail.com

**Пикалов Евгений Сергеевич**, доцент кафедры "Химические технологии".

E-mail: evgeniy-pikalov@mail.ru

---

Статья поступила в редакцию 28 февраля 2023 г.

---

© Акимова А. С., Филиппова Л. С., Пикалов Е. С., 2023

К одному из основных сырьевых материалов, применяемых для получения теплоизоляционных материалов и материалов с повышенной энергоэффективностью, относится древесина, в т. ч. древесные отходы [1—3]. Применение древесины способствует экологичности, позволяет уменьшить плотность и теплопроводность материалов и изделий при достаточно высоких показателях прочности [1, 4, 5]. Однако при этом уменьшаются их биостойкость и водостойкость, повышаются горючесть и водопоглощение, что особенно важно для теплоизоляционных материалов, т. к. в насыщенном водой состоянии их плотность и теплопроводность могут значительно повышаться. Для усиления указанных выше преимуществ и уменьшения перечисленных недостатков проводится обработка древесины, а также подбор связующего, функциональных добавок и технологических параметров [5—7].

Одним из авторов данной работы ранее был получен теплоизоляционный композиционный материал со степенью наполнения 58,6 масс. % на основе древесных и полимерных отходов. По плотности и прочности материал являлся аналогом полутвердых древесноволокнистых плит (ДВП) и соответствовал мягким ДВП по теплопроводности [8, 9]. Водопоглощение полученного материала было ниже, чем у мягких ДВП, однако его снижение представляется перспективной задачей для повышения эффективности применения материала.

Цель данной работы добиться уменьшения водопоглощения древесно-полимерного материала на основе отходов при сохранении основных физико-механических свойств на уровне, соответствующем нормативным требованиям для ДВП.

### Сырьевые материалы и методы исследования

Для получения наполнителя в данной работе применяли мелкокусковые древесные отходы в виде опилок, стружки, щепы или коры мягких сортов древесины хвойных (сосна, лиственница, кедр и ель) и лиственных (ольха, липа, осина и береза) пород с различными исходными влажностью и размерами частиц. Источниками перечисленных отходов могут являться лесозаготовка, лесопиление, деревообработка, очистная и санитарная рубка в процессе ухода за зелеными насаждениями на улицах, парках, скверах, лесопарках и т. п., а также отходы при работе с пиломатериалами при ремонте зданий и помещений, выбывшие из употребления деревянные изделия, тара и мебель, выделяемые при сортировке твердых бытовых отходов. Выбранные древесные отходы являются маловостребованными в других технологиях утилизации из-за низкого качества, следовательно, их применение в составе разрабатываемой сырьевой смеси обосновано [8]. Для получения наполнителя древесные отходы высушивали до постоянной массы при температуре 110 °С, измельчали до получения фракции с размером не более 2 мм, а затем фракции из разных источников перемешивали для усреднения состава.

Для получения связующего применяли отходы потребления изделий из пенополистирола, в частности

отработанные элементы упаковки для бытовой техники, оборудования и т. п. различного размера и состояния, отобранные из общей массы отходов бытового потребления. Выбор обоснован тем, что отходы бытового потребления практически не находят применения при рециклинге в производство полимерных изделий из-за достаточно высокой степени деструкции [10, 11]. Кроме того, отходы пенополистирола отличаются высокими темпами накопления, практически не востребованы в различных технологиях утилизации из-за малой плотности, что осложняет их транспортировку и хранение, а также низкой стоимости производства пенополистирола, которая делает экономически невыгодным переработку отходов [12]. Перед использованием полимерные отходы, как и древесные отходы, высушивали до постоянной массы, измельчали до размера частиц не более 6 см, а затем частицы из разных источников перемешивали для усреднения состава.

Для растворения отходов пенополистирола с получением раствора связующего применяли метиленхлористый технический первого сорта по ГОСТ 9968-86. Выбор метилхлорида обусловлен тем, что по сравнению с большинством других растворителей он обладает низкой токсичностью (IV класс опасности), относится к труднгорючим жидкостям и характеризуется низкой взрывоопасностью. Данный растворитель отличается хорошей проникающей способностью, что позволяет быстро растворять отходы пенополистирола, а его высокая летучесть и низкая температура кипения (40,1 °С) позволяют быстро удалять его при термообработке заготовок изделий.

Для модификации древесного наполнителя применяли техническое льняное масло нерафинированное второго сорта по ГОСТ 5791-81 (далее — техническое льняное масло). Выбор технического льняного масла обусловлен тем, что оно является экологически безопасным, хорошо впитывается в древесину, что позволяет проводить объемную модификацию, не повышает воспламеняемости древесины, т. к. окисляется на воздухе, и в отличие от пищевого льняного масла высыхает значительно быстрее.

Для получения образцов разрабатываемого материала предварительно подготовленные полимерные отходы растворяли в метилхлориде при соотношении полимер : растворитель = 1 : 2,3 до получения однородного раствора связующего, а подготовленный древесный наполнитель перемешивали с техническим льняным маслом до получения однородной древесно-масляной смеси, которую оставляли не менее чем на 30 мин для впитывания и подсыхания технического льняного масла. После этого древесно-масляную смесь и раствор связующего в заданных экспериментом пропорциях перемешивали до получения однородной сырьевой смеси. При этом растворитель и техническое льняное масло вводили в состав сырьевой смеси сверху 100 масс. %. Из полученной смеси одностадийным холодным прессованием при давлении 8,2 МПа [8] с выдержкой под давлением не менее 10 мин формировали образцы с их последующей термообработкой при температуре не менее 40 °С в течение не менее 180 мин для удаления метилхлорида. Для исследования свойств для

каждого из рассмотренных в работе составов сырьевой смеси готовили серии по пять образцов с последующим определением средних арифметических значений исследуемых показателей.

У серий образцов по стандартным для строительных материалов методикам определяли плотность ( $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>), прочность на изгиб ( $\sigma_{изг}$ , МПа), водопоглощение ( $B$ , %) и теплопроводность ( $\lambda$ , Вт/(м·°С)). При этом выбор количества компонентов основывался на требованиях ГОСТ 4598-2018 для полутвердых и мягких древесноволокнистых плит, которые по составу, структуре, свойствам и областям применения являются наиболее близким аналогом разрабатываемого композиционного материала.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

На предварительном этапе экспериментальных исследований было установлено, что введение технического льняного масла в количестве меньше 1 масс. % не оказывает заметного влияния на свойства получаемого материала, а введение свыше 6 масс. % данной добавки приводит к излишней вязкости древесно-масляной смеси, затрудняющей перемешивание, формование и создание контакта между частицами наполнителя и связующим. В связи с этим техническое льняное масло вводили в количестве от 1 до 6 % от суммарной массы древесного наполнителя и полимерных отходов.

В результате проведенных экспериментов было установлено, что плотность материала уменьшается с увеличением количества древесного наполнителя и уменьшением содержания технического льняного масла (см. рис. 1).

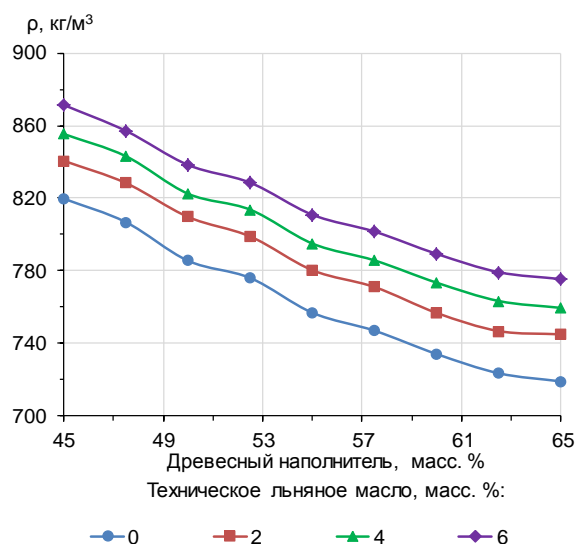


Рис. 1. Влияние древесного наполнителя и технического льняного масла на плотность исследуемого материала

Из полученных данных видно, что влияние древесного наполнителя более существенное. Это связано с тем, что древесный наполнитель представляет собой частицы волокнисто-пористого строения и чем больше количество наполнителя, тем меньше связующего, а значит больше пустот в объеме материала.

Также стоит отметить, что плотность древесины (в среднем 1540 кг/м<sup>3</sup>) и полистирола (около 1040 кг/м<sup>3</sup>) являются средними для строительных материалов, поэтому получение плотности материала в пределах 718,8—871,4 кг/м<sup>3</sup> свидетельствует о высокой пористости разрабатываемого материала, которая обеспечивает низкие показатели плотности.

Техническое льняное масло пропитывает частицы древесного наполнителя, заполняя поры и пустоты в них, что приводит к повышению плотности материала. Кроме того, при проведении эксперимента было отмечено, что пропитывание частиц древесного наполнителя техническим льняным маслом приводит к повышению однородности и пластичности сырьевой смеси на стадии перемешивания и прессования, приводит к адгезии между частицами древесного наполнителя через пленки масла на их поверхностях, а также способствует уплотнению материала при прессовании. Повышение плотности также связано с тем, что плотность технического льняного масла (около 926 кг/м<sup>3</sup>) достаточно высока и приводит к повышению плотности частиц древесного наполнителя в результате пропитывания.

На рис. 2 представлены зависимости прочности на изгиб разрабатываемого материала от количества вводимых добавок, откуда следует, что древесный наполнитель существенно снижает прочность на изгиб, а техническое льняное масло уменьшает ее незначительно.

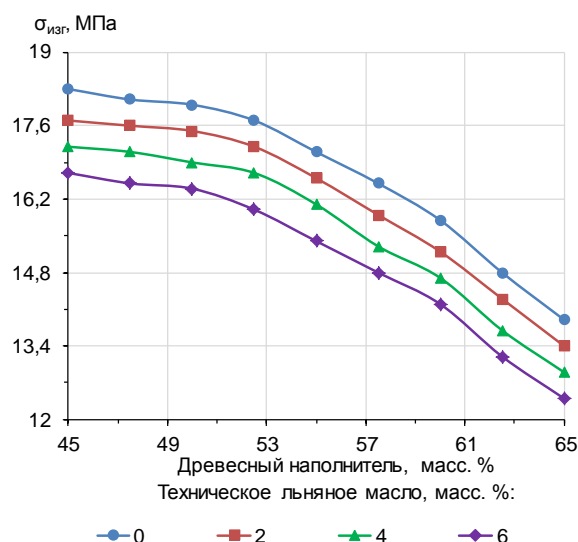


Рис. 2. Влияние древесного наполнителя и технического льняного масла на прочность на изгиб исследуемого материала

Снижение прочности связано с тем, что при росте количества наполнителя содержания связующего становится недостаточно для образования в объеме материала прочного каркаса из частиц наполнителя, связанных между собой через слои связующего. При этом с уменьшением количества связующего уменьшается не только толщина его слоев, но и снижается площадь контакта между связующим и частицами наполнителя, что снижает прочность связи между ними и между частицами наполнителя.

В то же время в результате пропитывания частиц древесного наполнителя техническим льняным маслом происходит ухудшение адгезии связующего к поверхности частиц наполнителя. Это, в свою очередь, понижает прочность контакта между связующим и частицами наполнителя, что и проявляется в снижении прочности материала.

На рис. 3 показаны зависимости водопоглощения от количества вводимых добавок, откуда следует, что введение древесного наполнителя повышает данное свойство, а добавка технического льняного масла — снижает.

Как упоминалось ранее, введение древесного наполнителя повышает пористость материала, и сам наполнитель отличается волокнисто-пористым строением, что облегчает проникновение влаги в материал и насыщение материала влагой. В результате пропитки частиц наполнителя на их поверхности образуется водоотталкивающая пленка из технического льняного масла, что приводит к снижению водопоглощения частиц древесного наполнителя и материала в целом. При этом водопоглощение материала в основном становится связано с проникновением воды в поры и пустоты между частицами наполнителя и слоями связующего.

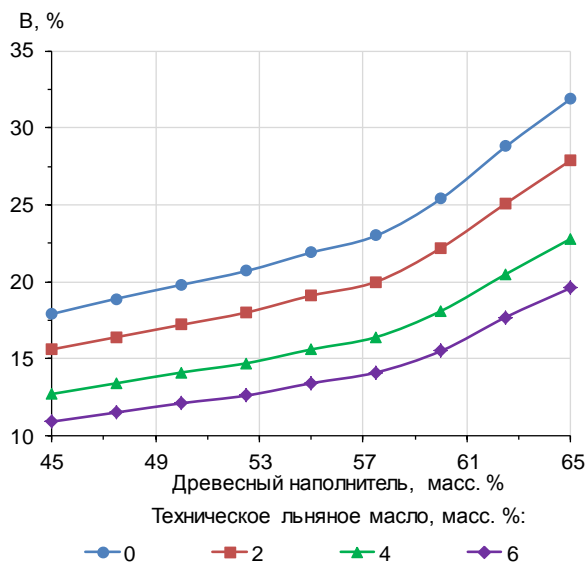


Рис. 3. Влияние древесного наполнителя и технического льняного масла на водопоглощение исследуемого материала

На рис. 4 показаны зависимости теплопроводности от количества вводимых добавок, которые заключаются в снижении данного свойства за счет древесного наполнителя и повышение за счет технического льняного масла. При этом влияние древесного наполнителя более выражено.

Характер зависимостей связан с упомянутым выше влиянием рассматриваемых добавок на пористость материала. В свою очередь, поры и пустоты в объеме материала снижают его теплопроводность, т. к. воздух отличается очень низким коэффициентом теплопроводности ( $0,0259 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ ), поэтому повышение их количества способствует повышению теплоизоляционных характеристик материала. Также стоит отметить, что теплопроводность, как древеси-

ны (в среднем  $0,13 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ ), так и полистирола (в пределах  $0,082\text{—}0,093 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ ) сравнительно низки, что способствует хорошим теплоизоляционным показателям материала. В тоже время для обеспечения низкой теплопроводности полистирола должно быть меньше, т.к. связующее при прессовании заполняет пустоты и крупные поры в объеме материала, что способствует повышению теплопроводности.

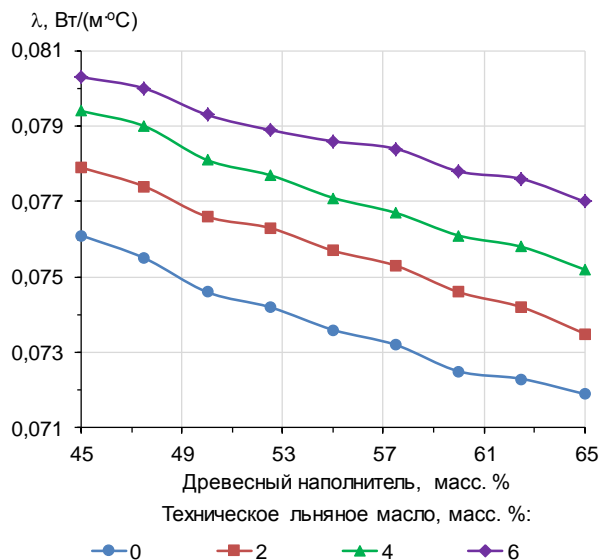


Рис. 4. Влияние древесного наполнителя и технического льняного масла на теплопроводность исследуемого материала

Однако при низком количестве связующего его оказывается недостаточно для образования в объеме материала каркаса из частиц наполнителя, связанного через слои связующего, что приводит не только к снижению прочности (см. рис. 2), но и проявляется в осыпании образца на гранях и на поверхности. Кроме того, при недостатке связующего наблюдается уменьшение толщины слоев полистирола в объеме материала, что способствует повышению доли открытых пор и увеличению среднего диаметра пор. В свою очередь, это приводит к увеличению водопоглощения (см. рис. 3), что негативно сказывается и на теплопроводности, т. к. вода, заполняющая поры, обладает более высокой теплопроводностью, чем воздух ( $0,599 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ ).

Также следует отметить, что теплопроводность технического льняного масла (около  $0,177 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}$ ) выше, чем у древесного наполнителя и полимерного связующего.

Исходя из того, что для соблюдения требований ГОСТ 4598-2018 необходимо обеспечить соответствующую прочность материала на изгиб, а также максимально снизить теплопроводность и водопоглощение, было принято решение выбрать в качестве наиболее соответствующих цели работы 57,5 масс. % древесного наполнителя и 4 масс. % для технического льняного масла в составе сырьевой смеси. В таблице представлено сравнение нормативных требований и результатов предыдущего эксперимента [8, 9] с полученными в данной работе результатами.

Оценка результатов эксперимента

Показатель	Требования ГОСТ 4598-2018		Разработанный материал с разным содержанием технического льняного масла	
	полутвердые плиты	мягкие плиты	0 масс. %	4 масс. %
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	≥ 600	100—400	750,6	785,6
Прочность на изгиб, МПа	≥ 15	≥ 0,4—1,8	16,3	15,3
Разбухание по толщине за 24 ч, %	≤ 30	—	4,3	5,8 за 48 ч
Водопоглощение, %	—	34 за 2 ч	23,5 за 24 ч	16,4 за 48 ч
Теплопроводность, Вт/(м·°C)	—	0,05—0,09	0,073	0,077

Из полученных данных видно, что полученный материал по плотности, прочности и разбуханию по толщине соответствует требованиям для полутвердых плит, а по водопоглощению и теплопроводности — требованиям для мягких плит, т. е. может являться для них альтернативным вариантом. В тоже время техническое льняное масло позволило значительно снизить водопоглощение при сохранении степени наполнения (57,5 масс. % в данной работе по сравнению с 58,6 масс. % в предыдущей работе) и других свойств на схожем уровне, соответствующем нормативным требованиям.

### Заключение

В результате проведенных исследований было обосновано применение технического льняного масла в количестве 4 масс. % для снижения водопоглощения теплоизоляционного композиционного материала на основе древесных и полимерных отходов со степенью наполнения 57,5 масс. %. Данные количества компонентов позволяют максимально снизить водопоглощение при сохранении прочности на изгиб на уровне, соответствующем нормативным требованиям.

Установлено, что наличие волокнисто-пористых частиц древесного наполнителя в составе разрабатываемого композиционного материала приводит к снижению теплопроводности и плотности при увеличении водопоглощения и снижении прочности. В свою очередь наличие технического льняного масла способствует объемной гидрофобизации частиц древесного наполнителя в результате их пропитки с образованием пленки на их поверхности. Полученная пленка позволяет снизить водопоглощение при увеличении теплопроводности, снижении прочности и повышении плотности. Также установлено, что пропитка древесных частиц льняным маслом позволяет улучшить однородность и пластичность смеси при перемешивании и прессовании, хотя и уменьшает адгезию связующего к частицам наполнителя. Это ограничивает количество технического льняного масла в составе сырьевой смеси.

Практическое применение разработанного материала позволит перерабатывать крупнотоннажные и

маловостребованные в промышленности отходы мягких сортов древесины и изделий из пенополистирола для получения теплоизоляционного и отделочного композиционного материала строительного назначения с пониженным водопоглощением.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сафин Р. Г., Степанов В. В., Хайруллина Э. Р., Гайнуллина А. А., Степанова Т. О. Современные строительные композиционные материалы на основе древесных отходов // Вестник Казанского технологического университета. 2014. № 20. С. 123—128.
2. Степанова Т. О., Степанов В. В. Технологическая схема получения теплоизоляционных материалов из древесных отходов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2015. № 2—1. С. 443—447.
3. Данилов В. Е., Айзенштадт А. М., Махова Т. А. Конструкционная теплоизоляция на основе отходов деревообрабатывающей и горной промышленности // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 1. С. 97—100.
4. Саттарова З. Г., Сафин Р. Г., Фахрутдинов Р. Р., Байгильдеева Е. И. Теплоизоляционный древесно-полимерный композиционный материал // Деревообрабатывающая промышленность. 2020. № 4. С. 46—54.
5. Селезнёва О. И., Радаев С. С. Биостойкость древесного наполнителя в силикатных строительных системах // Вестник Ангарского государственного технического университета. 2015. № 9. С. 182—186.
6. Ярцев В. П., Киселева О. А., Лотц Н. С. Водостойкие эпоксиднодревесные композиты с добавлением отходов промышленности // Изв. вузов. Строительство. 2007. № 2 (578). С. 33—35.
7. Воскобойников И. В., Кондратьев В. А., Щелоков В. М., Константинова С. А., Поляков М. Н. Разработка базовых технологических процессов получения древесно-полимерных композиционных материалов // Вестник Московского государственного университета леса — Лесной вестник. 2012. № 8. С. 146—152.
8. Колосова А. С., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Теплоизоляционный композиционный материал на основе древесных и полимерных отходов // Экология и промышленность России. 2020. № 2. С. 28—33.
9. Колосова А. С., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Применение древесных отходов для получения теплоизоляционного композиционного материала на основе вторичного полимерного связующего // Экология промышленного производства. 2020. № 2. С. 6—10.
10. Пикалов Е. С. Теплоизоляционный строительный материал на основе древесной золы и полимерных отходов // Экология промышленного производства. 2022. № 4. С. 2—7.
11. Перовская К. А., Петрина Д. Е., Пикалов Е. С., Селиванов О. Г. Применение полимерных отходов для повышения энергоэффективности стеновой керамики // Экология промышленного производства. 2019. № 1. С. 7—11.
12. Пикалов Е. С. Полимерстеклянный строительный материал на основе отходов // Экология промышленного производства. 2022. № 1. С. 7—12.



## Impact of wood ash and polymer waste on the properties of thermal insulation composite material

A. S. AKIMOVA, L. S. FILIPPOVA, E. S. PIKALOV

Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletovs, Vladimir, Russia

*This article presents the results of a study of the possibility of reducing the water absorption of wood-polymer material based on waste due to impregnation of wood filler with technical linseed oil. The filler in the studied material is waste of soft wood varieties, and the binder is obtained as a result of dissolving waste products from expanded polystyrene in methylene chloride. The material samples were obtained by mixing a filler pre-impregnated with technical linseed oil with a binder solution, cold pressing of the raw mixture and subsequent heat treatment to remove the solvent. The quantities of wood filler and additives have been established, at which the maximum reduction of water absorption is possible while maintaining the remaining properties at the level of regulatory requirements for fiberboard.*

**Keywords:** wood waste, polymer waste, recycling of wastes, composite material, thermal insulation material, energy efficiency.

Bibliography — 12 references.

*Received February 28, 2023*

УДК 504.054 : 502.37

DOI: 10.52190/2073-2589\_2023\_3\_8

EDN: MJQVGR

## Геоэкологическая оценка буровых шламов и способ их утилизации

Е. В. ГАЕВАЯ, канд. биол. наук

Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

*Представлены результаты химических и токсикологических исследований бурового шлама, оказывающего негативное воздействие на окружающую природную среду (IV класс опасности). Выявлено, что полученные почвогрунты в процессе утилизации положительно влияют на морфометрические показатели растений семейства злаковых (*Festuca rubra* L., *Bromus inermis* Leyss.) и могут быть применены для биологического этапа рекультивации нарушенных земель.*

**Ключевые слова:** буровой шлам, утилизация, почвогрунт, растения злаковых культур, рекультивация.

Строительство нефтяных скважин является важным этапом в разработке и освоении месторождений. В результате происходит создание инфраструктурных комплексов нефтедобывающих комплексов. Техногенное воздействие оказывается на все объекты природной среды: атмосферный воздух, водные объекты, почва, животный и растительный мир, а также геологическая среда [1—3].

Промышленные отходы, которые образуются при бурении, обслуживании и подготовке скважин, а также в процессе сбора продуктов добычи и первичного приготовления нефти оказывают негативное воздействие на окружающую среду. При бурении скважин значительную опасность представляют буровые отходы, загрязнённые химическими реагентами буровых растворов [4—6].

Буровые отходы отрицательно воздействуют на атмосферный воздух при испарении легких фракций нефти с поверхности шламового амбара. Буровые отходы могут воздействовать на грунтовую и подземную воду при нарушении гидроизоляции дна и стенок шламового амбара при отсутствии обвалования и несанкционированном размещении их на площадке куста скважин. К снижению биопродуктивности почвенных ресурсов приводит разрушение гидроизоляционного материала, при этом загрязняются поверхностные и грунтовые воды [7].

Шламы буровые представляют собой выбуренную горную породу, пропитанную буровым раствором, который оказывает наибольшее воздействие на природные экосистемы. Образующиеся значительные объемы бурового шлама свидетельствуют о необходимости разработки способов утилизации, а также возвращения отходов в виде грунтов для биологической рекультивации нарушенных территорий [8].

Использование активных микробных штаммов-деструкторов является эффективным биотехнологическим методом ликвидации буровых отходов [9].

Положительными сторонами биологической нейтрализации буровых шламов являются одновременные процессы утилизации и обезвреживания загрязняющих веществ, отсутствие необходимости подготовки к разделению твердой и жидкой фазы, отверждению и нейтрализации отходов. Это позволяет нейтрализовать (обезвреживать) буровые шламы на месте (*in situ*) [10].

Важной предпосылкой для проведения биологической рекультивации земель является экологическая и токсикологическая оценка буровых шламов [11—13].

Цель исследования — геоэкологическая оценка буровых шламов и создание почвогрунтов на их основе для проведения биологической рекультивации нарушенных территорий.

Задачи исследования:

- Изучение химико-токсикологических свойств бурового шлама и определение класса опасности его для окружающей среды.
- Изучение влияния почвогрунтов на морфометрические характеристики растений злаковых культур (овсяница красная (*Festuca rubra* L.), кострец безостый (*Bromus inermis* Leyss.)).
- Создание составов почвогрунтов для проведения биологической рекультивации нарушенных территорий.

### Методы исследования

Отбор бурового шлама осуществляли на нефтяном месторождении ХМАО-Югры. Для создания почвогрунтов использовали следующие компоненты: гипс, глауконит, торф и гуминовый препарат "Росток".

Исследования химико-токсикологических показателей бурового шлама и почвогрунтов проводили в испытательной лаборатории в соответствии с методиками, внесенными в федеральный реестр аттестованных методик выполнения измерений.

Гаевая Елена Викторовна, профессор.

E-mail: gaevajae@tyuiu.ru

Статья поступила в редакцию 14 мая 2023 г.

© Гаевая Е. В., 2023

Оценку степени токсического действия на окружающую среду бурового шлама и почвогрунтов проводили на гидробионтах (*Daphnia magna* Straus и *Chlorella vulgaris* Beijer).

Вегетационные опыты морфометрических показателей проводили с использованием многолетних растений семейства злаковых (*Festuca rubra* L., *Bromus inermis* Leyss.). Гуминовый препарат "Росток" использовали согласно инструкции по применению (10 мл 0,1 %-го препарата на 1 л воды).

Биологическую активность определяли в агаризованной среде для количества различных физиологических групп (общее число микрофлоры, численность сапрофитной микрофлоры, актиномицетов, микромицетов и бактерий).

Варианты компонентного состава почвогрунтов:

- буровой шлам (контроль);
- почвогрунт (буровой шлам + гипс + глауконит);
- почвогрунт (буровой шлам + гипс + глауконит + торф + гуминовый препарат "Росток").

### Результаты исследований

Буровой шлам представляет собой значительный фактор загрязнения окружающей среды, так как обладает токсическим действием. Хлорид-ионы и сульфат-ионы в буровом шламе оказывают токсическое воздействие на компоненты природной среды. Водорастворимые хлориды играют довольно важную роль, сульфаты — в меньшей степени. Сульфаты обладают наименьшей подвижностью и закрепляются в твердой фазе бурового шлама. Хлориды являются наиболее подвижной водорастворимой формой анионов, что обуславливает способность к миграции. Результаты исследования химического состава бурового шлама представлены в табл. 1.

По типу засоления буровой шлам относился к хлоридному. По степени засоления буровой шлам был средnezасоленный. Отмечается высокое содержание хлорид-ионов — 6568 мг/кг. По уровню водородного показателя среды буровой шлам можно отнести к сла-

бощелочной среде — 8,7 ед. pH. Остаточное содержание нефтепродуктов составило 9600 мг/кг.

Таблица 1

Исследования химического состава бурового шлама

Наименование показателя	Буровой шлам
Сульфат-ионы, мг/кг	93,0 ± 14,0
Хлорид-ионы, мг/кг	6568,0 ± 985,0
Плотный остаток водной вытяжки, %	2,5 ± 0,2
pH, ед. pH	8,7 ± 0,10
Нефтепродукты, мг/кг	9600,0 ± 4032,0

Значения валового содержания тяжелых металлов зависят от объема бентонитов в составе буровых растворов и свойств горных пород. Наибольшая концентрация отмечена по марганцу и составила 625,0 мг/кг (см. рис. 1).

Валовое содержание тяжелых металлов представлено следующим рядом: Mn > Zn > Pb > Cu > Co > As. Сравнение кларка литосферного и концентрации тяжелых металлов выявили превышение по мышьяку (при норме не более 1,3 мг/кг) и свинцу (при норме не более 20,0 мг/кг). Результаты токсикологического воздействия на тест-объектах (*Daphnia magna* Straus, *Chlorella vulgaris* Beijer) позволили отнести буровой шлам к IV классу опасности для окружающей среды.

Способ обращения с буровым шламом основан на физико-химическом методе, который улучшает химические и токсикологические свойства полученных почвогрунтов. Создание почвогрунтов включает следующие компоненты: гипс, глауконит, торф, гуминовый препарат "Росток". Были приняты следующие объемные доли внесения: гипс — 10 %, глауконит — 10 %; торф — 40 %. Гуминовый препарат "Росток" использовали для снижения негативного воздействия отрицательных факторов, для стимулирования роста растений и адаптации к условиям окружающей среды.

Исследования химического состава почвогрунтов при внесении гипса, глауконита, торфа и гуминового препарата "Росток" представлены в табл. 2, валовое содержание тяжелых металлов на рис. 2.

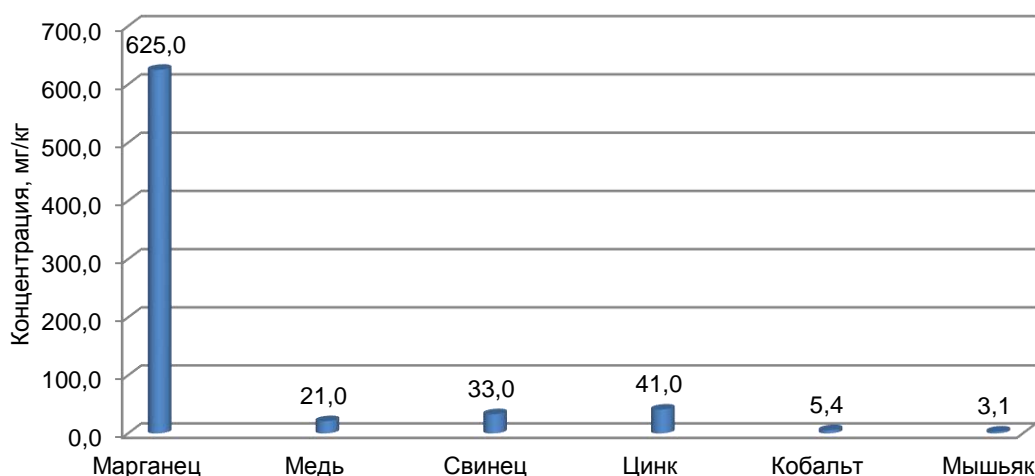


Рис. 1. Валовое содержание тяжелых металлов в буровом шламе

Таблица 2

Результаты исследований химического состава образцов почвогрунтов

Наименование определяемого показателя	Почвогрунт (буровой шлам + гипс + глауконит)	Почвогрунт (буровой шлам + гипс + глауконит + торф + гуминовый препарат Росток)	ПДК (ОДК)
pH, ед.рН	8,3 ± 0,1	7,7 ± 0,1	5,5—8,4
Нефтепродукты, мг/кг	367,0 ± 139,0	169,0 ± 64,0	500,0
Сульфат-ион, мг/кг	159,0 ± 24,0	135,0 ± 20,25	не нормируются
Хлорид-ион, мг/кг	2236,0 ± 157,0	1963,0 ± 137,0	не нормируются
Плотный остаток водной вытяжки, %	0,56 ± 0,06	0,49 ± 0,05	<2

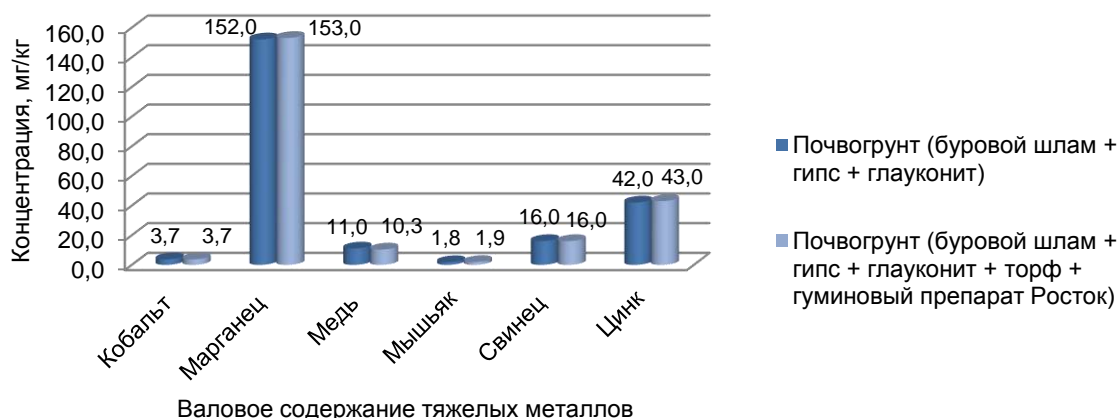


Рис. 2. Валовое содержание тяжелых металлов в почвогрунтах

Уровень водородного показателя почвогрунтов при внесении гипса и глауконита был 8,2 ед. рН (слабощелочная среда), содержание хлорид-иона и сульфат-иона составило 2236,0 и 159,0 мг/кг, соответственно. Понижение содержания хлорид-иона обусловлено добавлением гипса и связанной с этим реакцией ионного обмена. Остаточное содержание нефтепродуктов находилось на уровне 367,0 мг/кг.

Снижение уровня водородного показателя до 7,7 ед. рН происходит при внесении смеси компонентов (гипс, глауконит, торф) и гуминового препарата "Росток". Содержание сульфат-ионов и хлорид-ионов

составляет 135,0 и 1963,0 мг/кг, соответственно. Остаточное содержание нефтепродуктов в почвогрунтах было 169,0 мг/кг.

Исследования по химическому составу показали, что гипс и глауконит, а также торф могут быть применимы в качестве компонентов создания почвогрунтов для рекультивации нарушенных территорий.

Вегетационные эксперименты проводили для определения влияния почвогрунтов на морфологические параметры злаковых растений в зависимости от нормы внесения компонентов (рис. 3).

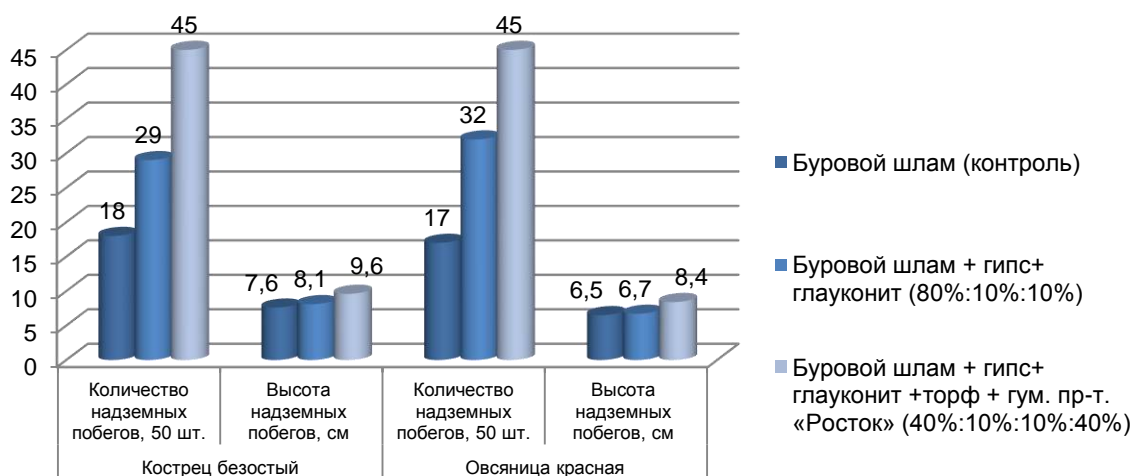


Рис. 3. Результаты морфометрических показателей растений злаковых культур



Результаты исследований почвогрунтов с внесением гипса и глауконита, показали, что всхожесть костреца безостого составила 58 %, высота надземных побегов достигала 8,1 см. При использовании торфа и гуминового препарата всхожесть побегов увеличилась до 92 %, а высота надземной части — до 9,6 см. Исследования почвогрунта с внесением гипса, глауконита, торфа и гуминового препарата "Росток" показали, что всхожесть овсяницы красной достигала до 92 % с высотой надземных побегов до 8,4 см.

Внесение в буровой шлам смеси компонентов способствует прорастанию семян, росту и развитию злаковых растений. Торф и гуминовый препарат "Росток" способствуют формированию жизнеспособного фитоценоза (всхожесть до 92 %, высота надземных побегов 9,6 см).

Важную роль играет биологическая и биохимическая активность почвы, а также ее химический состав. Потребность почвы в плодородии можно оценить по биомассе микроорганизмов, ферментативным свойствам (ФА) и биохимической активности (ФА). Общая численность микробной флоры, взятой из образцов, колеблется в диапазоне 60—270 млн КОЕ/г почвогрунтов.

Число сапрофитов в контрольном образце составляло 0,1 млн КОЕ/г, при внесении торфа наблюдалось наибольшее значение до 62,0 млн КОЕ/г. Доля микроорганизмов была минимальной в контрольной пробе — 0,05 млн КОЕ/г, в других образцах колебалось 31,9—57,8 млн КОЕ/г. В буровом шламе не обнаружены актиномицеты, наибольшее значение было в образцах с торфом (4,9—7,3 млн КОЕ/г). Результаты микробиологических исследований бурового шлама и почвогрунтов представлены на рис. 4.

Минимальное количество сапрофитов и бактерий, растущих на КАА наблюдалось в буровом шламе. Во всех образцах содержание микромицетов было значительно ниже, чем содержание бактерий. Число микромицетов (на КАА) было сходным во всех пробах.

Рост разнообразия микробиоценоза почвогрунтов указывает на снижение содержания поллютантов в сравнении с буровым шламом, а также о присутствии дополнительных источников — торфа и гуминового препарата "Росток".

### Заключение

Результаты исследований показали, что буровой шлам относится к IV классу опасности для окружающей среды. Валовое содержание тяжелых металлов превышало кларки по мышьяку и свинцу. Отмечается повышенное содержание хлорид-ионов (6568 мг/кг) и нефтепродуктов (9600 мг/кг).

Почвогрунты с внесением гипса, глауконита, торфа и препарата "Росток" положительно влияли на морфометрические показатели растений семейства злаковых. Результаты исследований почвогрунтов на основе буровых шламов указывают на возможность использования их для рекультивации нарушенных земель.

На основании проведенных исследований рекомендован следующий состав почвогрунтов: буровой шлам + глауконит + гипс + торф + гуминовый препарат "Росток" (40 %:10 %:10 %:40 %). Для проведения биологического этапа рекультивации рекомендуется посев семян в составе: костреца безостый — 70 кг/га и овсяница красная — 50 кг/га.

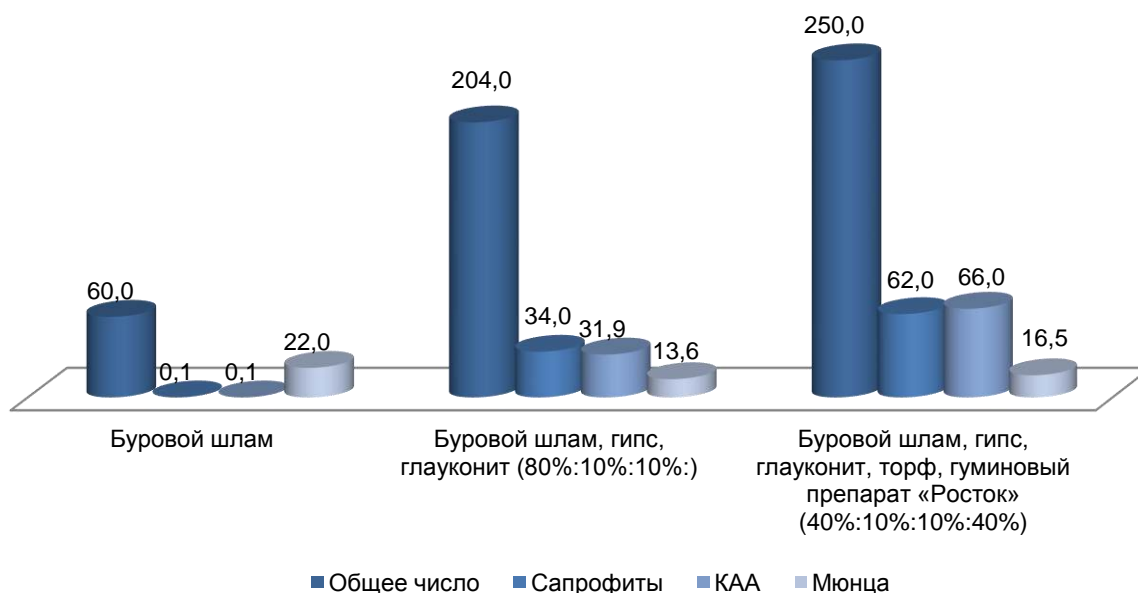


Рис. 4. Численность микрофлоры, млн КОЕ/г

## ЛИТЕРАТУРА

1. Булатов А. И., Макаренко П. П., Шеметов В. Ю. Охрана окружающей среды в нефтегазовой промышленности. — М.: Недра, 1997. — 483 с.
2. Балаба В. И., Колесов А. И., Коновалов Е. А. Проблемы экологической безопасности использования веществ и материалов бурения. Сер. Охрана человека и окружающей среды в газовой промышленности. — М.: ИРЦ "Газпром", 2001. — 32 с.
3. Тетельмин В. В., Язев В. А. Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. — Долгопрудный: Изд. дом "Интеллект", 2009. — 352 с.
4. Мазлова Е. А., Меньшикова И. А. Шламовые отходы нефтегазовых компаний // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2010. № 1. С. 22—21.
5. Соромотин А. В. Воздействие добычи нефти на таежные экосистемы Западной Сибири: монография. — Тюмень: Изд-во тюменского государственного университета, 2010. — 320 с.
6. Голубев Е. В., Соромотин А. В., Вепренцева Н. А., Микушина Н. Б. Состав и свойства буровых отходов Западной Сибири // Мир науки, культуры, образования. 2010. № 6—2(25). С. 319—320.
7. Пичугин Е. А. Оценка воздействия бурового шлама на окружающую природную среду // Молодой ученый. 2013. № 9. С. 122—123.
8. Узбеков Ф. М., Молотилова Л. В., Мохов А. Е. и др. Детоксикация отработанных буровых растворов и буровых шламов и их утилизация в качестве мелиорантов при рекультивации нарушенных почв // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2003. № 5. С. 15—19.
9. Ягафарова Г. Г., Рахматуллин Д. В., Инсапов А. Н., Кузнецова Г. М., Мирсаитов Н. Р. Современные методы утилизации буровых отходов // Нефтегазовое дело. 2018. Т. 2. № 2. С. 123—129.
10. Гасымлы Л. Э., Ибадов Н. А., Касомов Ф. К. и др. Биоремедиация бурового шлама в процессе химической фиксации // Альтернативная энергетика и экология. 2005. № 4. С. 86—90.
11. Гаевая Е. В., Богайчук Я. Э., Тарасова С. С. и др. Возможности утилизации отходов бурения при формировании почвоподобной среды // Изв. вузов. Нефть и газ. 2017. № 2. С. 82—89.
12. Скипин Л. Н., Петухова В. С., Ерёмин Д. И. Влияние мелиорантов на гранулометрический состав бурового шлама: мат. XVIII Междунар. науч.-практ. конф. "Водосбережение, мелиорация и гидротехнические сооружения как основа формирования агрокультурных кластеров России в XXI веке". — Тюмень, 2016. С. 154—160.
13. Скипин Л. Н., Скипин Д. Л., Петухова В. С., Кустышева И. Н. Эффективность влияния коагулянтов на физические свойства буровых шламов // Вестник Кемеровского государственного университета. 2015. № 4—3(64). С. 88—92.

## Geoeological assessment of drill cuttings and method of their disposal

E. V. GAEVAYA

Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

*The article presents the results of chemical and toxicological studies of drill cuttings that have a negative impact on the environment (hazard class IV). It was revealed that the obtained soils in the process of utilization have a positive effect on the morphometric parameters of plants of the cereal family (*Festuca rubra* L., *Bromus inermis* Leyss.) and can be used for the biological stage of reclamation of disturbed lands.*

**Keywords:** drill cuttings, disposal, soil, cereal plants, reclamation.

**Bibliography** — 13 references.

*Received May 14, 2023*

УДК 579.66 663.18 550.72  
DOI: 10.52190/2073-2589\_2023\_3\_13  
EDN: MORTUY

## К вопросу об использовании микроскопических грибов для оценки токсичности и извлечения редкоземельных металлов из отходов производства лопаритовых руд

<sup>1</sup>О. И. ШУМИЛОВ, д-р физ.-мат. наук; <sup>1</sup>Е. А. КАСАТКИНА, д-р физ.-мат. наук;

<sup>2</sup>И. Ю. КИРЦИДЕЛИ, д-р биол. наук; <sup>1</sup>Д. В. МАКАРОВ, д-р техн. наук

<sup>1</sup>Институт проблем промышленной экологии Севера, Кольский научный центр РАН, г. Апатиты, Россия

<sup>2</sup>Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург, Россия

*В результате проведенного морфологического и молекулярного анализа впервые выявлены и идентифицированы комплексы микроскопических грибов из хвостов обогащения лопаритовых руд Ловозерского ГОК (Мурманская область, Россия). Исследованы уровни толерантности/резистентности выделенных штаммов к воздействию основных редкоземельных металлов (РЗМ), содержащихся в хвостах, с целью их перспективного применения при создании новых природоподобных технологий, связанных с процессами биовыщелачивания.*

**Ключевые слова:** микромицеты, редкоземельные металлы, хвосты обогащения лопаритовых руд, биовыщелачивание, Ловозерский ГОК.

В последнее время значительно выросло применение редкоземельных металлов (РЗМ) в различных отраслях промышленности, связанных с высокотехнологичными производствами (например, в ядерных и медицинских технологиях, а также в производстве сверхпроводников, космических аппаратов, мобильных телефонов, солнечных панелей, лазеров, телевизоров, аккумуляторных сплавов, керамики, стекла и искусственных алмазов) [1]. Кроме того, РЗМ, включая лантаноиды (лантан (La), церий (Ce), диспрозий (Dy), эрбий (Er), европий (Eu), гадолиний (Gd), гольмий (Ho), лютеций (Lu), неодим (Nd), прометий (Pm), празеодим (Pr), самарий (Sm), тербий (Tb), тулий (Tm) и иттербий (Yb)). Кроме того, РЗМ используют в производстве минеральных удобрений [1, 2]. Сфера применения редкоземельных элементов постоянно расширяется, и мировое потребление РЗЭ растет. Загрязнение окружающей среды редкоземельными металлами в результате развития горнодобывающей и перерабатывающей промышленности, а также роста использования минеральных удобрений, содержащих лантаноиды, вызывает обеспокоенность исследователей [2]. В связи с этим продолжается

изучение уровня безопасности широкого распространения РЗМ в окружающей среде и их возможного накопления в живых организмах [2, 3]. Биотестирование является одним из современных методов диагностики токсичности редкоземельных металлов [3, 4].

В Мурманской области находятся крупнейшие предприятия минерально-сырьевого комплекса Российской Федерации. Стоимость общих запасов РЗМ на территории Кольского полуострова оценили почти в 700 млрд долл. [5]. Здесь же находится единственное, разрабатываемое в России, месторождение лопаритовых руд [6]. Добычу и переработку лопарита осуществляют на горнорудном предприятии ООО "Ловозерский ГОК". Получаемый на предприятии товарный продукт, лопаритовый концентрат, является комплексным материалом для дальнейшего производства ниобия, тантала, титана и РЗМ цериевой группы [6]. Отходы переработки полезных ископаемых поступают в хвостохранилище, которое состоит из двух полей. За период эксплуатации первого поля (1951—1985 гг.) объем накопленных предприятием отходов обогащения составил 6,7 млн т [6]. С 1985 г. сброс отходов осуществляется на второе поле хвостохранилища, примерный объем отходов которого составляет 11 млн т с ежегодным приращением в 400—450 тыс. т [6]. Действующее и отработанное хвостохранилища, с одной стороны, представляют собой источник загрязнения окружающих территорий, с другой, — источник ценных редкоземельных элементов: Zr, Ce, Nb, Pr, Sr и Ti [6].

Традиционные методы извлечения РЗМ из руды предполагают использование опасных химических веществ (азотной и серной кислот) и высоких температур, что приводит к высоким эксплуатационным

Шумилов Олег Иванович, главный научный сотрудник.

E-mail: o.shumilov@ksc.ru

Касаткина Елена Алексеевна, старший научный сотрудник.

E-mail: e.kasatki@yandex.ru

Кирцидели Ирина Юрьевна, ведущий научный сотрудник.

E-mail: microfungi@mail.ru

Макаров Дмитрий Викторович, директор.

E-mail: d.makarov@ksc.ru

Статья поступила в редакцию 23 мая 2023 г.

© Шумилов О. И., Касаткина Е. А., Кирцидели И. Ю., Макаров Д. В., 2023

расходам и негативному воздействию на окружающую среду [1]. Растет интерес к разработке природоподобных технологий, то есть технологий, имитирующих естественные процессы в различных областях промышленного производства [7]. Природоподобные методы биоремедиации и биовыщелачивания обычно рассматривают как экологически чистую альтернативу с более высокой эффективностью и безопасностью, а также с более низкими эксплуатационными расходами и энергопотреблением [8, 9]. Биологическое выщелачивание осуществляется различными микроорганизмами (бактериями и микроскопическими грибами) из-за их способности выделять органические кислоты и восстанавливать металлы, а иногда даже накапливать некоторые металлы [8]. В различных исследованиях было задокументировано выщелачивание различных металлов из отходов переработки руд, промышленных и электронных отходов с помощью микрогрибов (в основном виды из родов *Aspergillus* и *Penicillium*) [8]. Только в некоторых исследованиях сообщалось о взаимодействии различных видов микроскопических грибов с РЗМ [9].

Цель данного исследования — оценить уровень токсичности РЗМ, характерных для хвостов обогащения лопаритовых руд. Для осуществления поставленной задачи выделены и идентифицированы на молекулярном уровне основные штаммы микромицет, содержащихся в хвостах обогащения Ловозерского ГОК. Исследована толерантность выделенных штаммов к воздействию РЗМ в целях их возможного использования в процессах биовыщелачивания.

### Методы исследования

Отбор образцов производили на двух хвостохранилищах ООО "Ловозерский ГОК" (67°53'35" с.ш., 34°36'51" в. д.) и на контрольном участке (67°55'0" с. ш., 34°36'38" в. д.). По гранулометрическому составу хвосты обогащения лопаритовых руд на двух участках можно отнести к среднезернистым пескам с преобладающими фракциями 0,25—0,5 мм, в которых отчетливо видны отдельные зерна щелочных алюмосиликатов, темно-зеленые призмы эгирина и редкие зерна розовато-красного эвдиалита (рис. 1) [6]. Образцы контрольного участка по своему составу аналогичны составу зональных почв.



Рис. 1. Микроснимок образца хвостов обогащения лопаритовых руд, масштаб — 150 мкм

Микромицеты выделяли общепринятыми микробиологическими методами серийных разведений с последующей культивацией на средах Сабуро (SDA, декстрозный агар), Чапека и КГА (картофельно-глюкозный агар) в темноте при 20 и 5 °С в течение 14 дней [10]. Для подавления роста бактерий в питательную среду добавляли левомицетин (100 мг/л). Выделенные штаммы были идентифицированы на основе морфологических характеристик [11] и результатов молекулярных исследований. Для микроморфологического анализа использовали световой микроскоп Carl Zeiss Axiolmager A1. Для выделения ДНК из чистых культур грибов использовали набор DiamondDNA Plant kit (ABT, Барнаул, Россия). В качестве филогенетического маркера была использована региональная последовательность ITS [12]. Последовательность ITS1–5.8S–ITS2 амплифицировали с использованием праймеров ITS1 (5'-TCC-GTA-GGT-GAA-CCT-TGC-GG-3') и ITS4 (5'-TCC-TCC-GCT-TAT-TGA-TAT-GC-3'). По окончании амплификации детекцию образцов проводили электрофоретическим методом в 1,5%-м агарозном геле с GelRed. Секвенирование полученных фрагментов ДНК проводили с использованием оборудования ЦКП "Геномные технологии, протеомика и клеточная биология" ФГБНУ ВНИИСХМ методом Сэнгера. Последовательности были проверены и выровнены с использованием программы Mega7. Анализировали данные с помощью программы поиска BLAST в базе данных GenBank (<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>). Для универсального региона ITS были выбраны критерии идентичности Годиные [13]. Полученные нуклеотидные последовательности генов были депонированы в базе данных GenBank под номерами доступа.

Название и положение таксонов микроскопических грибов унифицировали с использованием базы данных CBS (<http://www.indexfungorum.org/names/Names.asp>).

Подсчет колоний проводили через 10—15 дней культивирования при 20 °С и через 30 дней при температуре 5 °С. Данные по общей численности микромицетов выражали в колониеобразующих единицах на 1 г абсолютно сухой почвы (субстрата) (КОЕ/г).

Для исследования токсичности РЗМ выбраны металлы, характерные для хвостов обогащения лопаритовых руд — Се и Nd. В качестве источников лантаноидов использовали гептагидрат хлорида церия  $\text{CeCl}_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  (99,5 %) и гексагидрат хлорида неодима  $\text{NdCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (99 %). Серию растворов с различными концентрациями (0—10000 мг/л) готовили путем разбавления исходных растворов Се и Nd стерилизованной водой. Значения pH (6,5—6,8) поддерживали с использованием молочной кислоты. Один миллилитр этих серий растворов смешивали с 9 мл среды Сабуро, затем изоляты инкубировали на среде тремя повторами. Все виды инкубировали в темноте при температуре 20 °С в течение 12 дней.

Уровень токсичности РЗМ определялся по степени толерантности/резистентности выделенных штаммов к РЗМ. Для этих целей измеряли биомассу грибов и скорость роста колоний при различных концентрациях РЗМ. Определение биомассы изолятов проводили методом люминесцентной микроскопии [14]. При учете грибной биомассы (мг/г субстрата) считали, что



плотность спор равна  $0,837 \text{ г/см}^3$ , а плотность мицелия —  $0,628 \text{ г/см}^3$  [15]. По результатам измерения биомассы для каждого штамма рассчитывали индекс толерантности  $IT$  (%):

$$IT = M_c/M_0 \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где  $M_c$  — биомасса штамма для соответствующей концентрации солей Се и Nd;

$M_0$  — биомасса контрольного штамма без добавления солей.

Диаметры колоний измеряли ежедневно в двух направлениях при различных концентрациях солей  $\text{CeCl}_3$  и  $\text{NdCl}_3$  (0-контроль, 12,5, 25, 50, 100, 250, 500 и 1000 мг/л). Каждую концентрацию тестировали в трех репликациях одновременно, затем вычисляли средние значения. По результатам измерений скорости роста вычисляли ингибирующий эффект различных концентраций солей Се и Nd. Коэффициенты ингибирования  $IH$  (%) рассчитывали по формуле [16]:

$$IH = (D_k - D_i) / (D_k - D_i) \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где  $D_k$  — диаметр контроля (см);

$D_i$  — диаметр колонии, подвергшейся воздействию  $\text{CeCl}_3$  или  $\text{NdCl}_3$  (см);

$D_i$  — диаметр инокулята (см).

Для сравнения характеристик роста выделенных штаммов применяли кластерный анализ. Для кластерного анализа результаты расчетов коэффициентов ингибирования роста и индексов толерантности для всех анализируемых штаммов были объединены и сопоставлены. Метод взвешенного попарного среднего и расстояние Чебышева использовали для объединения кластеров и построения дендрограммы. Дендрограмма содержала кластеры, группирующие штаммы со сходными характеристиками толерантности к РЗЭ. Статистическую обработку проводили с использованием пакета программ MATLAB.

### Результаты исследования

Численность изолятов в хвостах обогащения лопаритовой руды была очень низкой и уменьшалась с возрастом рудных хвостов. Таким образом, на эксплуатируемом участке С2 количество микромицет было на 50 % выше ( $12 \pm 4 \text{ КОЕ/г}$ ), чем на законсервированном участке С1 ( $8 \pm 2 \text{ КОЕ/г}$ ) хвостохранилища при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Примерно такое же соотношение поддерживалось при  $5^\circ\text{C}$ , но для гораздо более низких значений плотности ( $3\text{—}8 \text{ КОЕ/г}$ ). При этом в образцах почвы из контрольного участка количество микроскопических грибов достигало, в среднем, десятков тысяч КОЕ/г: 65 тыс. КОЕ/г при  $20^\circ\text{C}$  и 52 тыс. КОЕ/г при  $5^\circ\text{C}$ .

В общей сложности из двух участков хвостохранилищ лопаритовой руды Ловозерского ГОК было выделено более ста чистых культур микроскопических грибов (55 на участке С1 и 95 — на С2) и идентифицировано 15 видов микромицетов, представляющих 9 родов и 2 стерильных неопознанных штамма. Из фоновых почв выделено более 200 чистых культур,

относящихся к 20 видам и 15 родам. В целом, видовой состав и процент доминирующих видов на двух участках хвостохранилища остался практически неизменным, хотя общее количество изолятов уменьшилось почти в два раза в образцах С1 по отношению к С2. Доминирующими видами ( $\sim 20\%$ ) на двух участках были *Geomyces vinaceus* и *Penicillium simplicissimum*. При этом следует отметить, что относительное содержание *Umbelopsis isabellina* на законсервированном участке С1 (14 %) увеличилось по сравнению с С2 (5 %) почти в три раза и превышало фоновые значения (11 %). Четыре штамма были идентифицированы при помощи молекулярного анализа: *Aspergillus niveoglaucus*, *Geomyces vinaceus*, *Penicillium simplicissimum* и *Umbelopsis isabellina*.

Для анализа токсичности РЗМ четыре выделенных изолята и один контрольный штамм (не изолят) *Sydowia polyspora* были протестированы на их толерантность/резистентность к редкоземельным металлам Се и Nd.

Были отмечены макро- и микроморфологические изменения и высокая степень адаптации в ответ на стресс, вызванный повышенным содержанием РЗЭ. Низкие дозы солей РЗЭ вызывали незначительное увеличение скорости роста и размера колонии в лабораторных условиях, в то же время морфология колоний практически не изменялась при различных концентрациях солей РЗМ. Развитие колоний при высоком содержании РЗЭ вызывало стресс и изменения в морфологии. Например, при самых высоких дозах  $\text{CeCl}_3$  колонии *P. pannorum* утрачивали свою мицелиальную структуру и напоминали слизистые колонии дрожжевых форм грибов. Мицелий *U. isabellina*, первоначально стерильный и однородный, при высоких концентрациях хлорида церия становился неоднородным с начала формирования перегородок и образованием хламидоспор, заполненных липидным материалом. Интересно, что колонии *U. isabellina* при максимальной концентрации  $\text{CeCl}_3$  1000 мг/л начинали рост через месяц после инокуляции.

На рис. 2 приведены результаты ингибирующего действия Се и Nd на рост изолятов и контрольных штаммов. Различные штаммы по-разному реагировали на Се и Nd. Хорошо видно, что при 500 мг/л  $\text{CeCl}_3$  и  $\text{NdCl}_3$  почти все изолированные микромицеты прекратили свой рост, за исключением *P. simplicissimum* и *U. isabellina* (рис. 2, а, б). Рост *A. niveoglaucus* почти полностью был подавлен ( $IH = 87\%$ ) при 500 мг/л  $\text{CeCl}_3$ . Интересно, что скорость роста всех штаммов была одинаковой или немного выше при малых концентрациях РЗЭ (12,5—50 мг/л), что может указывать на стимулирующий характер малых доз редкоземельных элементов для роста микрогрибов. Биомасса всех штаммов при малых концентрациях РЗМ также изменялась незначительно по отношению к контрольной (рис. 2, в, г). По результатам измерения биомассы при максимальных концентрациях солей Се и Nd ( $> 500 \text{ мг/л}$ ) величина индекса толерантности  $IT$  была наибольшей для трех выделенных штаммов: *A. niveoglaucus*, *P. simplicissimum* и *U. isabellina* (рис. 2, в, г).

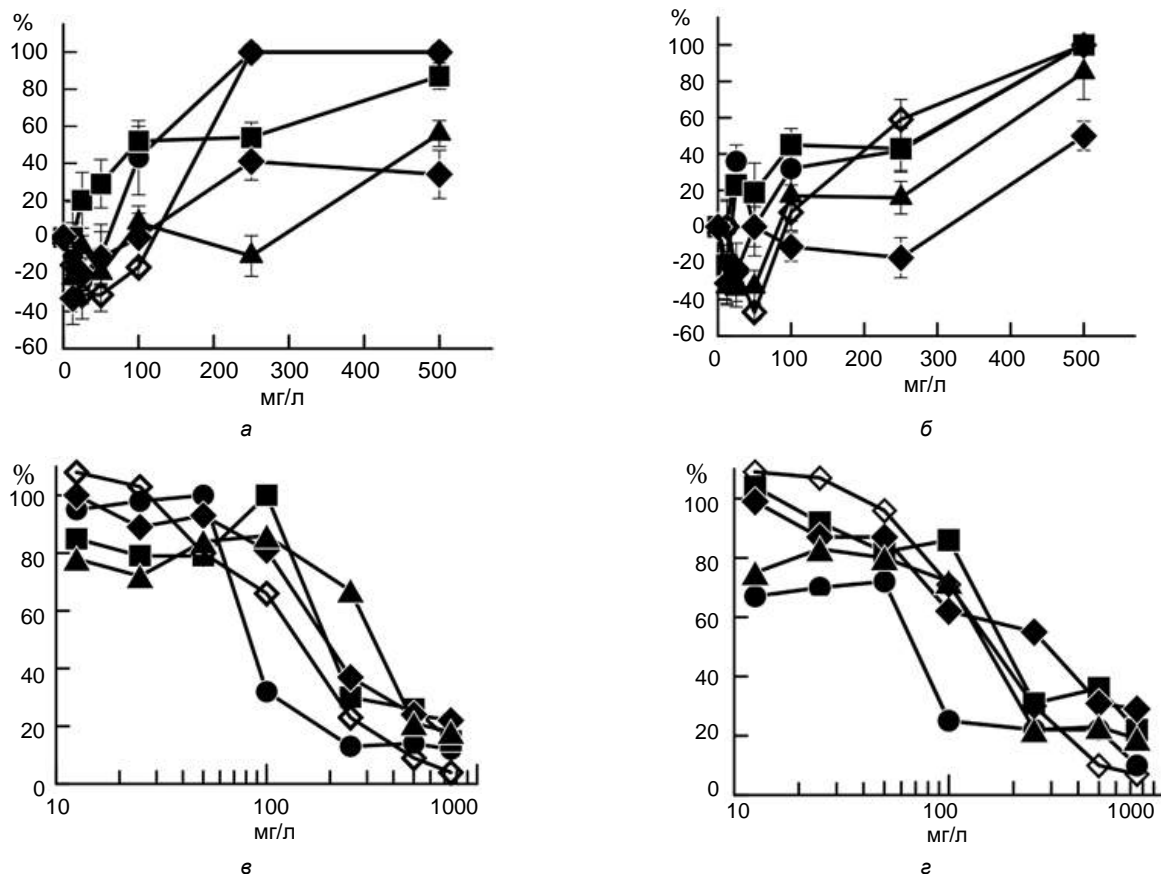


Рис. 2. Ингибирующие коэффициенты роста (а, б) и толерантности (в, г) микромицет для различных концентраций (мг/л)  $CeCl_3$  (а, в) и  $NdCl_3$  (б, г)

●— *P. simplicissimum*; ■— *U. Isabellina*; ◆— *A. niveoglaucus*; ▲— *G. vinaceus*; ◇— *S. polyspora*

На рис. 3 приведена дендрограмма, полученная в результате кластеризации штаммов по результатам расчета изменений их биомассы и роста колоний для различных концентраций солей Ce и Nd. На дендрограмме проявляется четкая группировка по кластерам штаммов со сходным поведением.

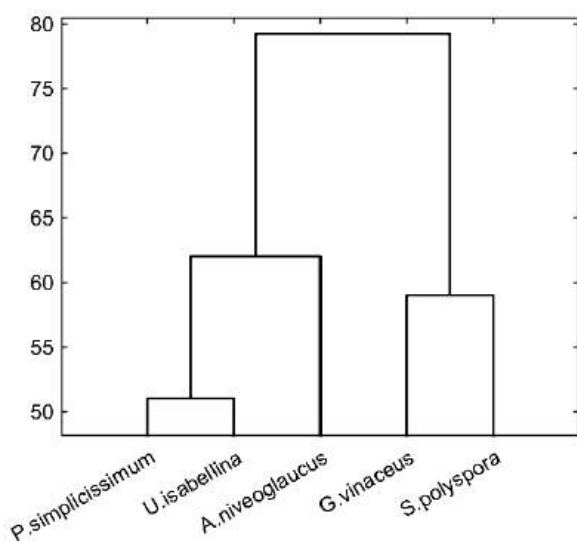


Рис. 3. Дендрограмма кластеризации по различиям в динамике роста и изменениях биомассы выбранных микрогрибов при меняющихся концентрациях РЗМ Ce и Nd, построенная по методу попарных взвешенных средних (расстояние Чебышева)

При этом можно выделить два основных кластера, которые демонстрируют различные модели роста некоторых грибов при различных концентрациях растворов Ce и Nd. Первый кластер подразделяется на две подгруппы, каждая из которых образована штаммами со сходными закономерностями роста. Первая подгруппа этого кластера объединяет доминантные изоляты *P. simplicissimum* и *U. isabellina*, в то время как вторая подгруппа содержит единственный изолят *A. niveoglaucus*. Второй крупный кластер включает изолят *G. vinaceus* и контрольный штамм *S. polyspora*. Для двух доминантных изолятов *P. simplicissimum* и *U. isabellina*, объединенных в одну подгруппу, расстояние оказалось наименьшим, что подтверждает их сходство между собой и значительное отличие от других протестированных штаммов.

### Обсуждение результатов

Основная цель данного исследования состояла в том, чтобы выделить из хвостов обогащения лопаритовой руды и охарактеризовать наиболее устойчивые к воздействию РЗМ микромицеты. Установленные значения численности изолированных микрогрибов на двух участках хвостохранилища оказались чрезвычайно низкими и не превышали десятков КОЕ/г, что, вероятно, в данном случае объясняется особой экстремальностью условий: низкие температуры, недостаток питательных веществ. Например, количество микромицет, обнаруженных в отвалах угольных

шахт на Шпицбергене, где микроорганизмы обеспечены достаточным уровнем органического углерода, более чем на порядок превышает полученные нами значения [17]. Подобные крайне низкие значения численности грибов ранее были отмечены также для хвостохранилищ обогатительных фабрик по производству апатитового концентрата ОАО "Апатит" (Мурманская область) [18].

По результатам тестирования четырех доминантных выделенных штаммов на толерантность/резистентность к Се и Nd выяснено, что низкие дозы РЗМ вызывали незначительное увеличение скорости роста и размера колонии без существенных морфологических изменений. Все протестированные штаммы, включая контрольный *S. polyspora*, показали радиальный рост колоний при концентрациях солей металлов до 100 мг/л и отсутствие роста при 1000 мг/л. Рост *A. niveoglauca* был незначительным ( $IR = 87\%$ ) при 500 мг/л  $CeCl_3$  и отсутствовал при 500 мг/л  $NdCl_3$  (рис. 2, а, б). Только штаммы *P. simplicissimum* и *U. isabellina* продолжали расти при концентрациях 500 мг/л для двух растворов солей РЗМ с частичным ингибированием (до 50 %), демонстрируя наивысшую степень толерантности к Се и Nd. Таким образом, эти два выделенных штамма обладали высокой степенью толерантности к Се и Nd. Кластерный анализ подтвердил значительное отличие *P. simplicissimum* и *U. isabellina* от других тестируемых видов. Результаты микроскопического анализа показали, что развитие колоний при высоком (500 мг/л) содержании РЗМ индуцировало изменения в морфологии грибковых колоний и клеток, вызывая диморфные переходы типа мицелий — дрожжи. Вероятно, в данном случае можно рассматривать дрожжевые формы как одну из возможных адаптаций к воздействию повышенных концентраций РЗМ. Для *U. isabellina* уже при концентрациях солей РЗМ 250 мг/л происходило изменение первоначально стерильного мицелия и образование внутри него хламидоспор, заполненных липидами, которые, как известно, обеспечивают выживание микроорганизма в неблагоприятных условиях [19]. Это свойство производить значительное количество липидов и полиненасыщенных жирных кислот позволяет рассматривать *U. isabellina* в качестве потенциального источника для промышленного производства биотоплива и фармацевтических препаратов [20].

Ареал распространения *P. simplicissimum* и *U. isabellina* достаточно широк. Данные виды микрогрибов могут колонизировать природные и техногенные экосистемы в полярных широтах и известны как психротолеранты (холодоустойчивые) и олиготрофы [17, 18, 21—23]. Благодаря своей высокой адаптивности к экологическому стрессу эти микроорганизмы способны выживать в экстремальных условиях за счет мощной ферментативной системы. Например, штаммы *U. isabellina* были обнаружены на поверхности обнаженных горных пород на границе ледника в Швейцарских Альпах [22]. Известно также, что выделенные микромицеты присутствуют в различных промышленных отходах, включая отходы обогащения полезных ископаемых, такие как, например, апатит-нефелиновые и угольные отходы [17, 18].

Экстремофильные микроорганизмы, способные выживать в экстремальных условиях, обладают ря-

дом специфических свойств, связанных с деструктивными особенностями по отношению к различным материалам, таким как нефть и нефтепродукты, полимерные материалы, пестициды, стройматериалы, горные породы и минералы [24]. При помощи синтеза вторичных метаболитов, в частности ферментов, микромицеты-экстремофилы разлагают сложные компоненты материалов до более простых соединений, которые затем используют в качестве источников питания [24]. Известно, что микромицеты родов *Penicillium* играют важную роль в процессах биологического выветривания и биовыщелачивания металлов, взаимодействуя с минералами при помощи различных механизмов, основанных на способности микроорганизмов выделять различные органические кислоты (лимонная, щавелевая, глюконовая и др.), которые позволяют извлекать металл из материала, подлежащего выщелачиванию [8]. Однако механизмы использования микроскопических грибов для получения РЗМ в промышленных масштабах в настоящее время пока не разработаны [9]. В ряде исследований сообщается о способности *U. isabellina* к разрушению гранитных пород [22] и разложению гербицидов [25], а также к выщелачиванию тяжелых металлов [26]. По результатам нашего исследования впервые выявлена высокая степень толерантности/резистентности выделенных штаммов *U. isabellina* к воздействию РЗМ.

## Выводы

Из лопаритовых отходов Ловозерского ГОК выделены комплексы микрогрибов-экстремофилов, которые способны выживать, находясь в экстремальных условиях среды: пониженная температура, недостаток питательных веществ. Для выявления деструктивных особенностей выделенных изолятов необходимы дальнейшие исследования.

По результатам анализа воздействия на рост изолятов различных концентраций Се и Nd наиболее толерантными к РЗМ оказались микромицеты *P. simplicissimum* и *U. isabellina*.

Малые дозы РЗМ стимулируют рост микромицетов. Высокие концентрации редкоземельных металлов индуцируют изменения в морфологии грибов на микроскопическом уровне, вызывая диморфные переходы типа мицелий — дрожжи, которые можно рассматривать как одну из возможных адаптаций к воздействию повышенных концентраций РЗМ.

Исследование толерантности/резистентности к основным РЗМ микромицетов, выделенных из хвостов обогащения лопаритовых руд, является необходимым для оценки возможности дальнейшего использования изолятов в процессах биовыщелачивания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Balaram V. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact // Geosci. Front. 2019. V. 10. P. 1285—1303.
2. Zhuang M., Zhao J., Li S., Liu D., Wang K., Xiao P., Yu L., Jiang Y., Song J., Zhou J., Wang L., Chu Z. Concentrations and health risk assessment of rare earth elements in vegetables from mining area in Shandong, China // Chemosphere. 2017. V. 168. P. 578—582.

3. Cheng J., Cheng Z., Hu R., Cui Y., Cai J., Li N., Gui S., Sang X., Sun Q., Wang L., Hong F. Immune disfunction and liver damage of mice following exposure to lanthanoids // *Environ. Toxicol.* 2014. V. 29. P. 64—73.
4. Chramov A. V., Kontrosh L. V., Makarov D. V., Shumilov O. I., Kasatkina E. A. Ecotoxicity responses of ciliates *Paramecium bursaria* to trace metals and rare-earth elements // *Int. J. Environ. Stud.* 2022. V. 79. № 5. P. 901—908.
5. Kalashnikov A. O., Konopleva N. G., Danilin K. P. Rare earths of the Murmansk region, NW Russia: minerals, extraction technologies and value // *Appl. Earth Sci.* 2022. P. 1—10.
6. Красавцева Е. А., Макаров Д. В., Максимова В. В., Селиванова Е. А., Икконен П. В. Результаты исследований свойств и состава хвостов обогащения лопаритовых руд // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2021. Т. 57. № 3. С. 190—198.
7. Ковальчук М. В., Нарайкин О. С., Яцишина Е. Б. Природоподобные технологии: новые возможности и новые вызовы // *Вестник РАН*. 2019. Т. 89. № 5. С. 455—465.
8. Dusengemungu L., Kasali G., Gwanama C., Mubemba B. Overview of fungal bioleaching of metals // *Environ. Adv.* 2021. V. 5. P. 100083.
9. Dev S., Sachan A., Dehghani F., Ghosh T., Briggs B. R., Aggarwal S. Mechanisms of biological recovery of rare-earth elements from industrial and electronic wastes: A review // *Chem. Eng. J.* 2020. V. 397. P. 124596.
10. Goldman E., Green L. H. *Practical Handbook of Microbiology*. — Boca Raton: CRC Press, 2015.
11. Domsch K. H., Gams W., Anderson T.-H. *Compendium of soil fungi*. — Eching: IHW-Verlag, 2007.
12. White T. J., Bruns T., Lee S. et al. Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. In: M. Innis (eds). *PCR Protocols: a guide to methods and applications*. — San Diego: Academic Press, 1990.
13. Godinho V. M., Furbino L. E., Santiago I. F. et al. Diversity and bioprospecting of fungal communities associated with endemic and cold-adapted macroalgae in Antarctica // *The ISME J.* 2013. V. 7. P. 1434—1451.
14. Zvyagintsev D. G., Dobrovol'skaya T. G., Golovchenko A. V., Zenova G. M., Smagina M. V. The structure of a saprotrophic microbial complex in the peatbogs // *Microbiol.* 1991. V. 60. P. 155—164.
15. Полянская Л. М., Звягинцев Д. Г. Содержание и структура микробной биомассы как показатели экологического состояния почв // *Почвоведение*. 2005. № 6. С. 706—714.
16. Kangguo M., Xiuqin Z., Lin H., Fusuo Z., Wenji Z., Jianyu C. Toxicity of lanthanum to pathogenic fungi and its morphological characteristics // *J. Rare Earths*. 2006. V. 24. P. 607—612.
17. Iliushin V. A., Kirtsideli I. Y., Vlasov D. Y. Diversity of culturable microfungi of coal mine spoil tips in Svalbard // *Polar Sci.* 2022. V. 32. P. 100793.
18. Евдокимова Г. А., Корнейкова М. В., Лебедева Е. В., Калмыкова В. В. Микромицеты в песках и песчаных почвах природного и техногенного генезиса // *Микология и фитопатология*. 2009. Т. 43. С. 84—92.
19. Федорович М. Н., Поликсенова В. Д. Формирование хламидоспор у видов рода *Alternaria* Nees в условиях культуры // *Вестник БГУ*. Сер. 2. 2011. № 2. С. 32—37.
20. Papanikolaou S., Aggelis G. Sources of microbial oils with emphasis to *Mortierella (Umbelopsis) isabellina* fungus // *World J. Microbiol. Biotechnol.* 2019. V. 35. P. 63.
21. Hassan N., Rafiq M., Hayat M., Shah A. A., Hasan F. Psychrophilic and psychrotrophic fungi: a comprehensive review // *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.* 2016. V. 15. P. 147—172.
22. Brunner I., Plotze M., Rieder S., Zumsteg A., Furrer G., Frey B. Pioneering fungi from the Damma glacier forefield in the Swiss Alps can promote granite weathering // *Geobiol.* 2011. V. 9. P. 266—279.
23. Евдокимова Г. А., Корнейкова М. В., Лебедева Е. В. Сообщества микромицетов в зоне воздействия алюминиевого завода // *Микология и фитопатология*. 2007. Т. 41. С. 20—28.
24. Кривушина А. А., Старцев В. О. Микромицеты — деструкторы полимерных материалов среди экстремофильных микроорганизмов (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2022. № 1. С. 123—134.
25. Marecik R., Kroliczak P., Czaczuk K., Bialas W., Olejnik A., Cyplik P. Atrazine degradation by aerobic microorganisms isolated from the rhizosphere of sweet flag (*Acorus calamus* L.) // *Biodegradation*. 2008. V. 19. P. 293—301.
26. Janicki T., Dlugonski J., Krupinski M. Detoxification and simultaneous removal of phenolic xenobiotics and heavy metals with endocrine-disrupting activity by the non-ligninolytic fungus *Umbelopsis isabellina* // *J. Hazard. Mater.* 2018. V. 360. P. 661—669.

## On the use of microscopic fungi to assess the toxicity and extraction of rare earth metals from loparite ore processing waste

<sup>1</sup> O. I. SHUMILOV, <sup>1</sup> E. A. KASATKINA, <sup>2</sup> I. Yu. KIRTSIDELI, <sup>1</sup> D. V. MAKAROV

<sup>1</sup> Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Center RAS, Apatity, Russia

<sup>2</sup> Komarov Botanical Institute RAS, Saint Petersburg, Russia

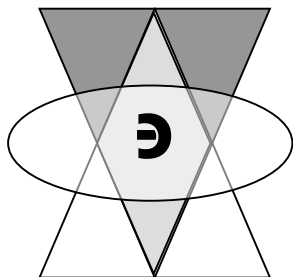
*As a result of morphological and molecular analysis, complexes of microscopic fungi from the loparite ore tailings of Lovozersky GOK (Murmansk region, Russia) were isolated and identified for the first time. The levels of tolerance/resistance of the isolates to the effects of the main rare earth metals (REM) contained in the loparite tails were studied for the purpose of their perspective application in the creation of new nature-like bioleaching technologies.*

**Keywords:** micromycetes, rare earth metals, loparite ore concentration tailings, bioleaching, Lovozersky GOK.

Bibliography — 26 references.

Received May 23, 2023





# Водоподготовка и водоочистка

УДК 628.54

DOI: 10.52190/2073-2589\_2023\_3\_19

EDN: MVGUVK

## Очистка сточных вод от микропластика с исследованием природы и свойств загрязнений

*К. Р. РУСАНОВА; Б. С. КСЕНОФОНТОВ, д-р техн. наук;*

*А. В. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук*

ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

*Описан способ очистки сточных вод от микропластика, при этом определен состав сточных вод с использованием рамановской спектроскопии, которая позволяет обнаружить все виды загрязняющих частиц в сточной воде путем получения комбинационного рассеивания спектров частиц. Определен химический состав загрязнений, в том числе и загрязнений, образующихся в результате очистки осадка.*

**Ключевые слова:** очистка сточных вод, микропластик, природа и свойства загрязнений, рамановская спектроскопия.

Определение состава сточной воды является первой и важной задачей в процессе разработки технологии очистки сточных вод, так как именно состав воды в значительной степени определяет способ очистки. Существует множество способов анализа состава сточных вод, однако большинство из них не оценивает наличие микропластика.

В последние десятилетия много внимания стали уделять загрязнению окружающей среды пластиком. Микропластик — это частицы пластика размером менее 5 мм. К микропластику относятся как небольшие изделия (волокна, бусины, блестки и т. п.), так и отходы, образовавшиеся в результате распада крупных пластиковых изделий.

Спектроскопия комбинационного рассеяния (рамановская спектроскопия) позволяет обнаружить все виды загрязняющих частиц в сточной воде путем получения КР спектров частиц [1—3]. С её помощью можно получить химический состав, а также структуру вещества. Рамановская спектроскопия используется

для идентификации широкого спектра различных загрязнений, в частности в виде полимеров, минералов, органических веществ и т. п.

### Методика проведения эксперимента

В качестве проб грязной воды использовали воду после стирки белья с использованием стирального средства марки Attack "BioEx", в составе которого 15—30 % цеолита; 5—15 % анионоактивного ПАВ, неионогенного ПАВ, поликарбоксилата <5 % и мыло, энзимы, отдушка, оптический отбеливатель.

По методике аналогичной определению взвешенных веществ было отфильтровано шесть образцов по 50 мл, три на каждую бутылку сточной воды. На рис. 1 представлено фото, на котором оранжевыми флажками помечены образцы после первого слива воды стиральной машинкой (пробы 1.1—1.3), желтыми — образцы воды после полоскания (2.1—2.3).



Рис. 1. Подготовка проб сточных вод к анализу

**Русанова Кристина Родионовна**, магистр.

E-mail: kristinarusanova@gmail.com

**Ксенофонтов Борис Семенович**, профессор кафедры "Экология и промышленная безопасность".

E-mail: kbsflot@mail.ru

**Бондаренко Анна Викторовна**, доцент.

E-mail: anytabond@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 12 марта 2023 г.

© Русанова К. Р., Ксенофонтов Б. С., Бондаренко А. В., 2023

После того, как вода была отфильтрована, фильтры были высушены в течение 48 часов и помещены в стерильные чашки Петри. На пробах 1.1—1.3 невооруженным глазом были видны мелкие загрязняющие частицы. На пробах 2.1—2.3 отсутствовали видимые загрязнения. На рис. 2 представлена фотография пробы 1.2. Затем фильтры были взвешены, в таблице представлено изменение массы фильтров до и после фильтрования.



Рис. 2. Фотография образца 1.2

Изменение массы фильтров

Номер пробы	Масса фильтра, г	Масса фильтра после фильтрования, г	Масса осадка, г
1.1	0,54	0,59	0,05
1.2	0,54	0,59	0,05
1.3	0,53	0,57	0,04
2.1	0,53	0,53	—
2.2	0,53	0,53	—
2.3	0,54	0,54	—

Для того, чтобы получить оптические изображения частиц осадка, фильтры были сфотографированы с использованием микроскопа "3D сканирующий стереомикроскоп Keyence VHX-6000". Основными типами загрязняющих частиц в образцах 1.1—1.3 были цветные и полупрозрачные нити; черные, красные, синие и полупрозрачные плоские и сферические частицы. На рис. 3—7 представлены полученные фотографии.



Рис. 3. Фотография образца 1.1

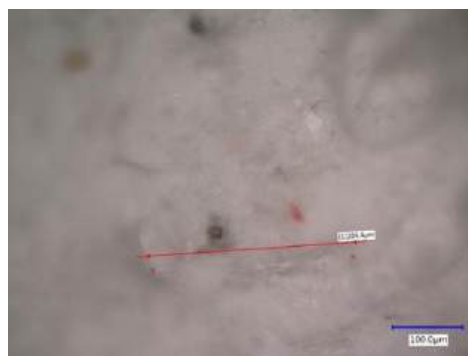


Рис. 4. Фотография образца 1.1

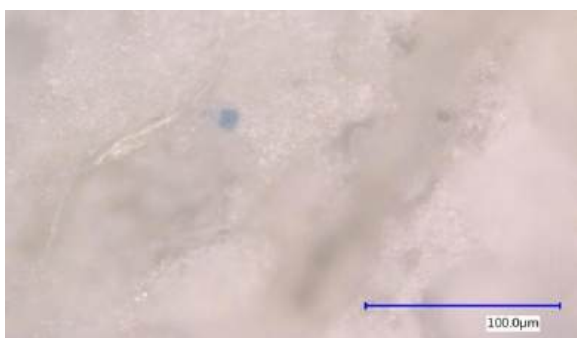


Рис. 5. Фотография образца 1.1



Рис. 6. Фотография образца 1.2

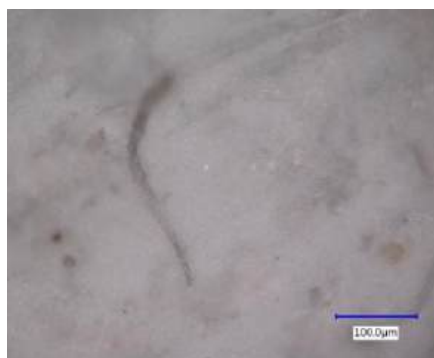


Рис. 7. Фотография образца 1.3

В образцах 2.1—2.3 основными типами загрязнения были оранжевые частицы неправильной формы и черные сферические частицы. Фотографии частиц представлены на рис. 8—9.

### Рамановские спектры осадка

Для идентификации осадка была использована рамановская спектроскопия. Для измерений использовался лазерный конфокальный микроскоп Alpha 300R+ со спектрометром комбинационного рассеяния с лазерным возбуждением на длине волны до 633 нм.

Были получены спектры комбинационного рассеяния частиц осадка во встроенной программе. Для определения материала осадка была использована программа "KnowItAll Informatics System" и платформа "Open Specy".

Для того, чтобы верифицировать программу "KnowItAll Informatics System" и платформу "Open Specy" был проведен анализ рамановского спектра фильтровальной бумаги. На рис. 10 представлена фотография фильтра под микроскопом. На рис. 11 представлен полученный рамановский спектр фильтровальной бумаги.



Рис. 8. Фотография образца 2.1

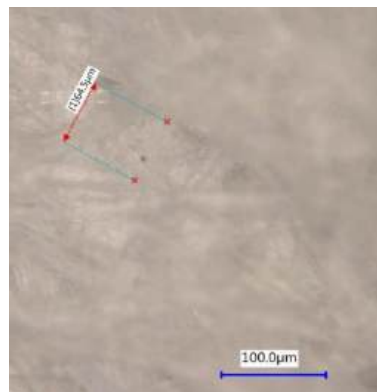


Рис. 9. Фотография образца 2.2



а



б

Рис. 10. Фильтровальная бумага под микроскопом (а) и фильтровальная бумага с увеличением 9X (б)

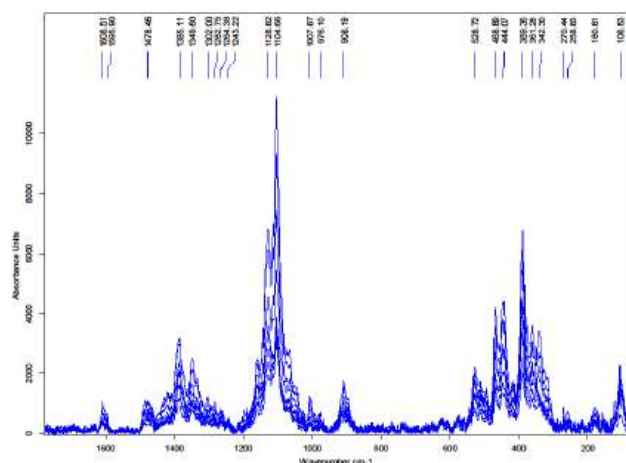


Рис. 11. Рамановский спектр фильтровальной бумаги; по оси абсцисс представлена длина волны,  $\text{см}^{-1}$ ; по оси ординат — единицы поглощения

Для того, чтобы сравнить полученный спектр с базами данных, была проведена предварительная обработка данных на платформе "Open Spesy". На рис. 12 желтым цветом представлен начальный спектр, сформированный платформой из загруженных данных, розовым цветом — обработанный спектр. Был выбран диапазон спектра, произведена полиномиальная базовая коррекция и использован сглаживающий полином. Данную процедуру проводили для всех исследуемых спектров.

Результаты сравнения спектра с базой данных платформы "Open Spesy" представлены на рис. 13. Исходный спектр материала совпадает со спектром целлюлозы на 90 %, что является корректным результатом.

Результаты сравнения спектра с базой данных программы "KnowItAll Informatics System" представлены на рис. 14. Исходный спектр фильтра совпадает со спектром целлюлозы на 82 %.

После проверки программ было принято решение использовать оба ресурса. Выбор определялся процентным совпадением проверяемого спектра с имеющимися программными спектрами. Было проведено исследование 11 образцов частиц загрязнений для их идентификации.

#### Образец 1.2\_1

На рис. 15 представлена фотография образца под микроскопом и полученный спектр образца.

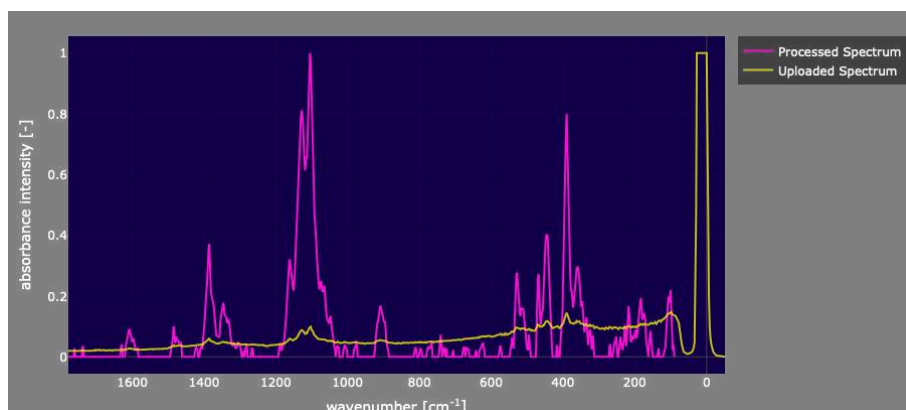


Рис. 12. Обработка спектра фильтровальной бумаги; по оси абсцисс представлена длина волны,  $\text{cm}^{-1}$ ; по оси ординат — интенсивность поглощения

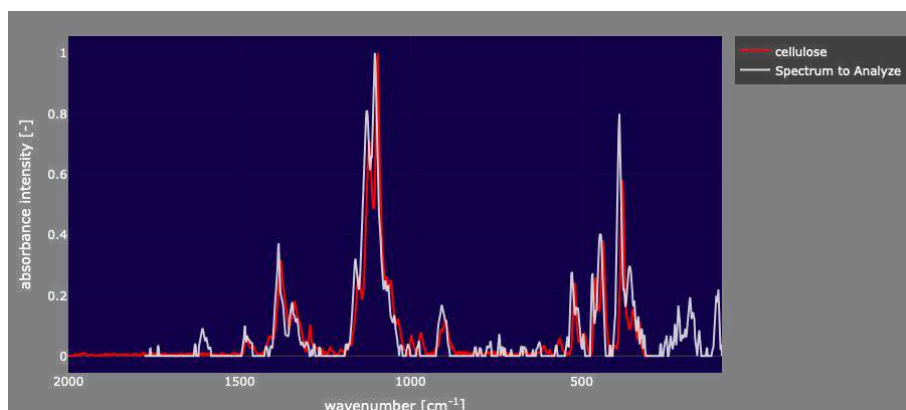


Рис. 13. Сравнение обработанного спектра фильтра с базой данных "Open Spesy"; белый спектр — исходный спектр фильтра, красный спектр — спектр целлюлозы

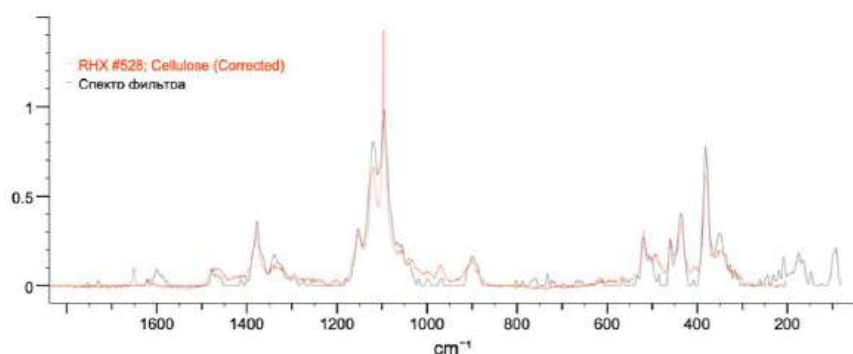
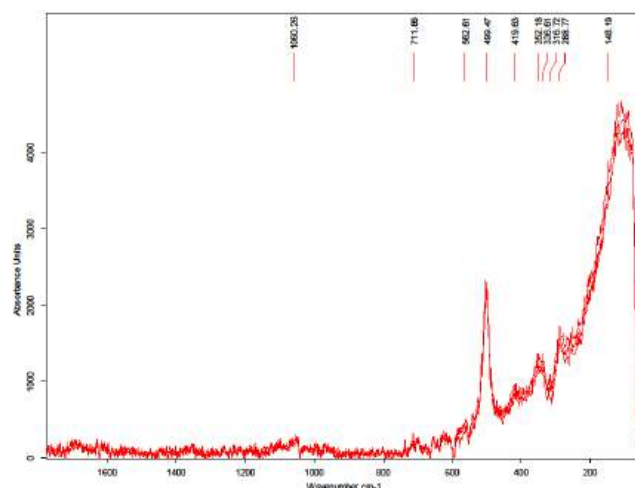


Рис. 14. Сравнение обработанного спектра фильтра с базой данных программы "KnowItAll Informatics System"; черный спектр — исходный спектр фильтра, оранжевый спектр — спектр целлюлозы





а



б

Рис. 15. Фотография образца 1.2\_1 (а); рамановский спектр образца 1.2\_1 (б)

Анализ образца был проведен в программе "KnowItAll Informatics System", результаты представлены на рис. 16. Совпадающим спектром является спектр поликристаллического кремния с точностью 84 %.

Поликремний представляет собой мелкие твердые кристаллы или пленку, в основном он используется для производства солнечных батарей и электроники [4]. Материал не является токсичным, однако в паспорте безопасности поликремния [5] указано,

что нужно избегать контакта с почвой, водными путями, дренажными и канализационными трубами без предварительной обработки. Так как поликремний является полимером, осадок может быть отнесен к микропластику.

#### Образец 1.2\_2

На рис. 17 представлена фотография образца под микроскопом и полученный спектр образца.

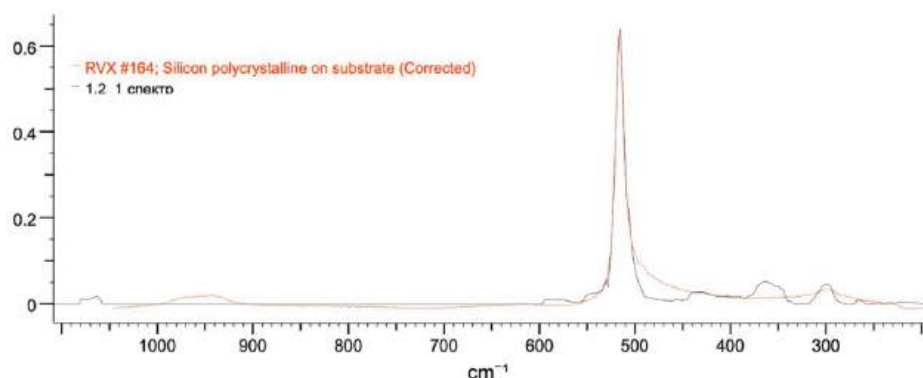
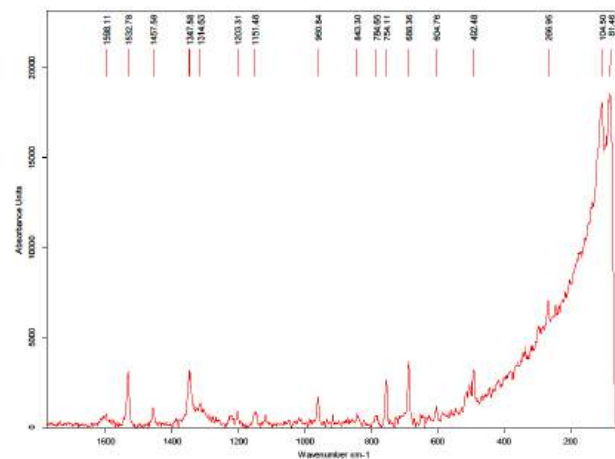


Рис. 16. Сравнение обработанного спектра образца 1.2\_1 с базой данных программы "KnowItAll Informatics System"



а



б

Рис. 17. Фотография образца 1.2\_2 (а); Рамановский спектр образца 1.2\_2 (б)

Анализ образца проводили на платформе "Open Specy", результаты представлены на рис. 18. Совпадающим спектром является спектр полиметилстирола с точностью 78 %.

Размер исследованной частицы составляет чуть больше 10 микрометров и, таким образом, частица может быть отнесена к микропластику. Полиметилстирол токсичен для водных организмов, может оказывать длительное неблагоприятное воздействие на водную среду. Обладает умеренным потенциалом биоаккумуляции. Токсические эффекты часто наблю-

дают у таких видов, как голубые мидии, дафнии, пресноводные зеленые водоросли, морские веслоногие моллюски и амфиподы [6].

### Образец 1.2\_3

На рис. 19 представлена фотография образца под микроскопом и полученный спектр образца.

Анализ образца был проведен в программе "KnowItAll Informatics System", результаты представлены на рис. 20. Совпадающим спектром является спектр дихлорида дибутилтина с точностью 83 %.

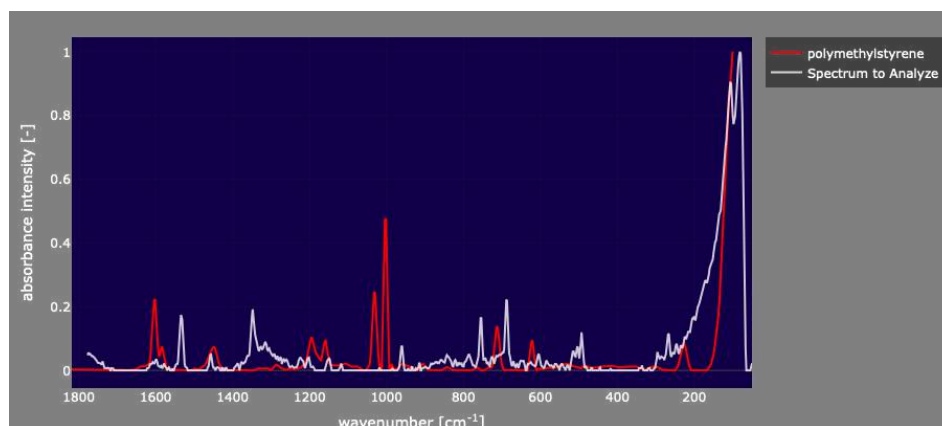
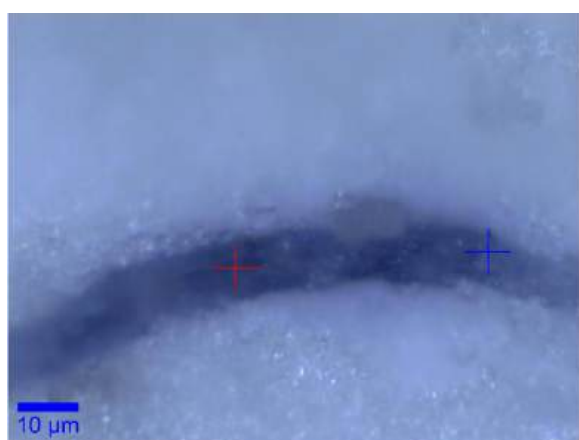
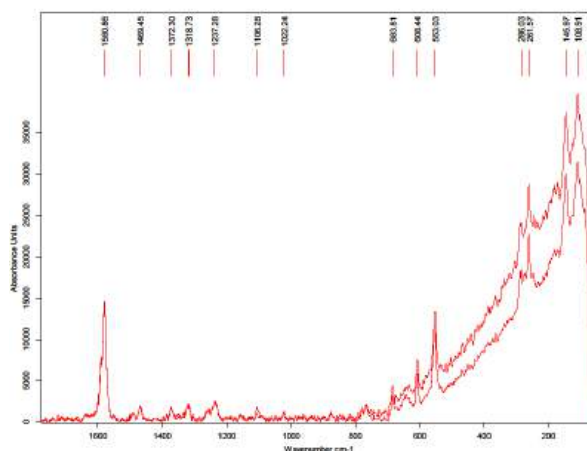


Рис. 18. Сравнение обработанного спектра образца 1.2\_2 с базой данных "Open Specy"



а



б

Рис. 19. Фотография образца 1.2\_3 (а); Рамановский спектр образца 1.2\_3 (б)

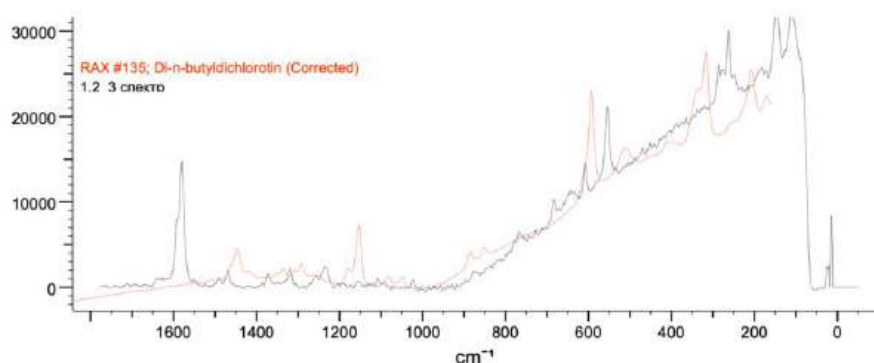


Рис. 20. Сравнение обработанного спектра образца 1.2\_3 с базой данных программы "KnowItAll Informatics System"

Дихлорид дибутилтина является токсичным и мутагенным веществом. Относится к 6.1 классу опасности — вещества, способные вызвать смертельный исход или тяжелое увечье, или нанести вред здоровью человека при их заглатывании, вдыхании или при контакте с кожным покровом. Данные мониторинга указывают на то, что население в целом может быть подвергнуто воздействию дихлорида дибутилтина (в виде дибутилтина) при попадании в организм рыбы из поверхностных вод, загрязненных дибутилтином [7].

#### Образец 1.2\_4

На рис. 21 представлена фотография образца под микроскопом и полученный спектр образца. Анализ образца был проведен на платформе "Open Specy", результаты представлены на рис. 22. Совпадающим спектром является спектр доломита (природный минерал) с точностью 90 %.

Доломит — это смешанный карбонат кальция и магния, он не является токсичным и сам по себе не оказывает негативного воздействия на окружающую

среду. Кроме того, он используется в качестве заменителя солей кальция и магния для повышения минерального содержания очищенной бутилированной воды [8].

#### Образец 1.2\_5

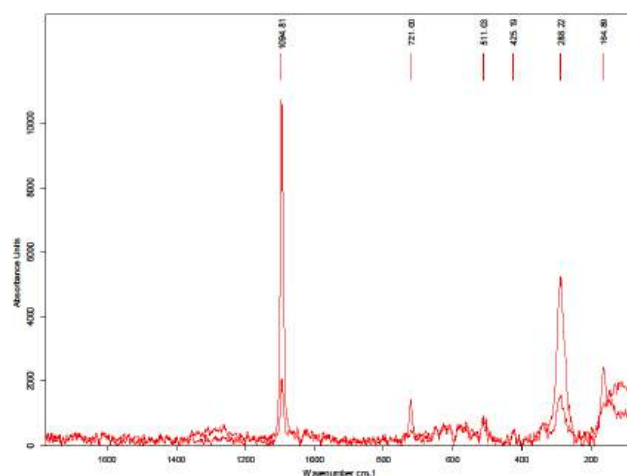
На рис. 23 представлена фотография образца под микроскопом и рамановский спектр образца. Анализ образца был проведен в программе "KnowItAll Informatics System", результаты представлены на рис. 24. Совпадающим спектром является спектр углерода с точностью 77 %. По фотографии образца и идентификации спектра можно сделать вывод, что образец 1.2\_5 — это человеческий волос.

#### Образец 1.2\_6

На рис. 26 представлена фотография образца под микроскопом и рамановский спектр образца. Анализ образца был проведен на платформе "Open Specy", результаты представлены на рис. 27. Совпадающим спектром является спектр полипропилена с точностью 82 %.



а



б

Рис. 21. Фотография образца 1.2\_4 (а); Рамановский спектр образца 1.2\_4 (б)

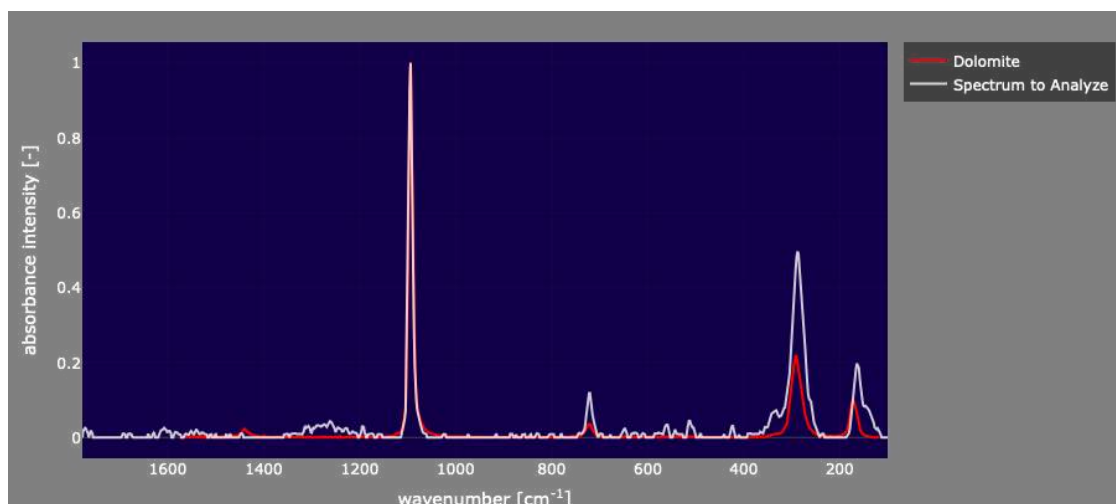
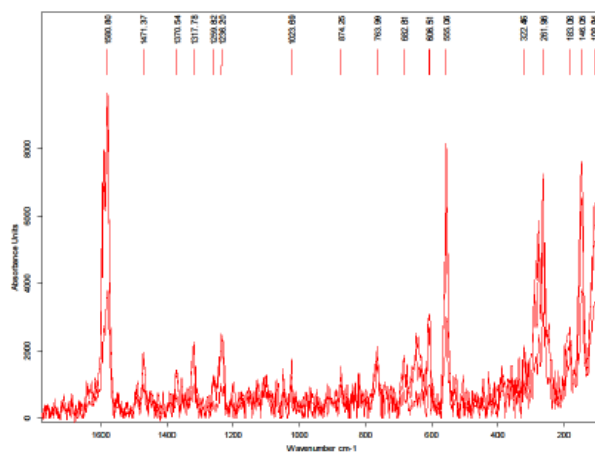


Рис. 22. Сравнение обработанного спектра образца 1.2\_4 с базой данных платформы "Open Specy"



а



б

Рис. 23. Фотография образца 1.2\_5 (а); рамановский спектр образца 1.2\_5 (б)

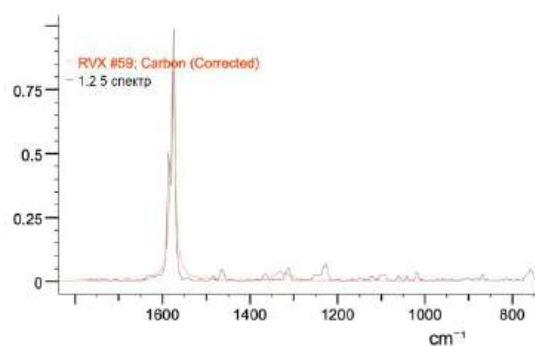
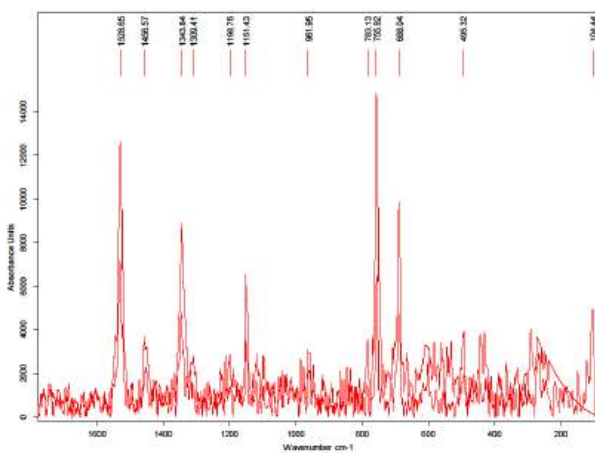


Рис. 24. Сравнение обработанного спектра образца 1.2\_5 с базой данных программы "KnowItAll Informatics System"



а



б

Рис. 25. Фотография образца 1.2\_6 (а); рамановский спектр образца 1.2\_6 (б)

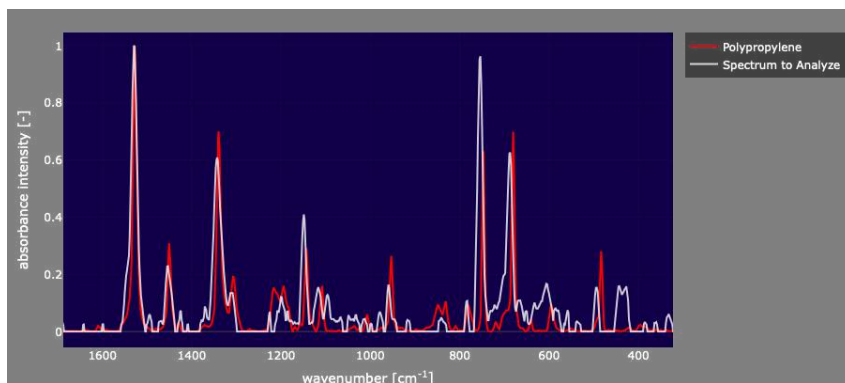


Рис. 26. Сравнение обработанного спектра образца 1.2\_6 с базой данных платформы "Open Specy"

Исследуемая сферическая частица размером около 10 микрон относится к микропластику. Полипропиленовые волокна и фрагменты могут оказывать неблагоприятное воздействие на организмы в концентрациях, которые уже можно обнаружить в окружающей среде [9]. Потенциально неблагоприятные эффекты на водные организмы, вызываемые полипропиленовыми микропластиками, аналогичны тем, которые вызывают другие типы микропластиков [10], задержку их в кишечнике, снижение скорости питания и роста, изменение скорости метаболизма и метаболических процессов, снижение репродуктивных функций, изменение микробиома кишечника и, очень редко, смерть.

### Заключение

В ходе анализа спектров образцов было идентифицировано 10 веществ. Четыре вида загрязняющих веществ принадлежат к полимерам и из-за размера частиц могут быть отнесены к микропластику. Также были обнаружены нетоксичные вещества, характерные для стирального порошка, и органические вещества, наличие которых характерно для данного стока. Кроме того, был обнаружен токсичный дихлорид дибутилтина, который никак не отражен в составе стирального порошка, и его наличие в стоке не является ожидаемым.

Таким образом, использование спектроскопии комбинационного рассеяния позволяет наиболее подробно рассмотреть состав сточных вод и идентифицировать загрязняющие вещества независимо от их размера, в том числе микропластик.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Януш О. В., Деркачев О. Ю., Гусарова Т. С. Оптическая спектроскопия полимеров: учеб. пособие. — СПб., 2017. — 46 с.
2. Институт физики им. Л. В. Киренского [Электронный ресурс]: многопредмет. науч. изд. / ФГБУН Институт физики им. Л. В. Киренского. — Электронн. текст. данные, 2015. URL: <http://kirensky.ru/ru/institute/labs/mc/ramansp>.
3. Новикова В. А., Варжель С. В. Рассеяние света и его применение в волоконной оптике. — СПб.: Университет ИТМО, 2019. — 39 с.
4. Basu S. Crystalline Silicon — Properties and Uses. London, United Kingdom, IntechOpen, 2011 [Электронный ресурс]: [http://www.issp.ac.ru/ebooks/books/open/Crystalline\\_Silicon\\_-\\_Properties\\_and\\_Uses.pdf](http://www.issp.ac.ru/ebooks/books/open/Crystalline_Silicon_-_Properties_and_Uses.pdf).
5. Polycrystalline Silicon — Safety Data Sheet. Canada, RECSIL-ICON, 2020. [Электронный ресурс]: <https://recsilicon.com/wp-content/uploads/2022/09/Download-Center-Material-Safety-Datasheets-Polycrystalline-Silicon-2022-Canada-US.pdf>.
6. Poly(a-methylstyrene) — Material Safety Data Sheet. USA, Santa Cruz Biotechnology, 2010 [Электронный ресурс]: <https://datasheets.scbt.com/sc-255431.pdf>.
7. PubChem Compound Summary for CID 12688, Dibutyltin dichloride. National Center for Biotechnology Information, 2022 [Online]. Available from: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Dibutyltin-dichloride>.
8. PubChem Compound Summary for CID 61833, Dolomite. National Center for Biotechnology Information, 2022 [Электронный ресурс]: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Dolomite>.
9. Jemec Kokalj A., Dolar A., Drobne D., Marinšek M., Dolenec M., Škrlep L., Strmljan G., Mušič B., Škapin A. S. Environmental hazard of polypropylene microplastics from disposable medical masks: acute toxicity towards *Daphnia magna* and current knowledge on other polypropylene microplastics // *Microplast nanoplast*. 2022. V. 2(1):1. doi: 10.1186/s43591-021-00020-0. Epub 2022 Jan 4. PMID: 35005629. PMCID: PMC8724753.
10. De Sá L. C., Oliveira M., Ribeiro F., Rocha T. L., Futter M. N. Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: what do we know and where should we focus our efforts in the future? // *Sci Total Environ*. 2018. V. 645. P. 1029–39. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.207>.

## Wastewater treatment from microplastics with a study of the nature and properties of pollution

K. R. RUSANOVA, B. S. KSENOFONTOV, A. V. BONDARENKO  
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

*The article describes a method for treating wastewater from microplastics. At the same time, the composition of wastewater is determined using Raman spectroscopy, which makes it possible to detect all types of polluting particles in wastewater by obtaining Raman scattering of particle spectra. With the help of Raman spectroscopy, the chemical composition of contaminants, including the precipitate formed as a result of purification, was determined.*

**Keywords:** wastewater treatment, microplastics, nature and properties of contaminants, Raman spectroscopy.

Bibliography — 10 references.

Received March 12, 2023



УДК 662.232.1; 502.17  
DOI: 10.52190/2073-2589\_2023\_3\_28  
EDN: NEZYXC

## Характеристика негативных проявлений нитроглицерина при содержании в воде водоёмов

А. А. МАСЛЕННИКОВ, д-р биол. наук; С. А. ДЕМИДОВА, канд. биол. наук;  
М. Х. ЯХЬЯЕВА; О. Н. НОВИКОВА, канд. мед. наук  
ФГУП «Научно-исследовательский институт гигиены, токсикологии и профпатологии»  
Федерального медико-биологического агентства, г. Волгоград, Россия

*Выполнена комплексная экспериментальная оценка опасности содержания взрывчатого вещества — нитроглицерина в воде водоемов. Установлено, что токсикант вызывал изменения органолептических и общесанитарных свойств данной экосистемы. При однократном внутрижелудочном поступлении вещество оказывало токсическое воздействие на организм лабораторных животных. Полученные данные учтены при обосновании ПДК рассматриваемого соединения в воде водоемов.*

**Ключевые слова:** вода, нитроглицерин, органолептический и санитарный режим водоёмов, порог острого общетоксического действия.

Проблема загрязнения окружающей среды нитроглицерином (НГЦ), обусловленная его широкомаштабным производством и применением, необходимым для решения ряда народнохозяйственных и оборонных задач, а также его использованием в медицине представляется достаточно актуальной.

НГЦ — известное мощное бризантное взрывчатое вещество, отличающееся очень высокой чувствительностью к механическим воздействиям. Чистый (жидкий) НГЦ опасен в обращении и поэтому на взрывных работах его не применяют. В загущённом состоянии используют в виде 93,0 %-го раствора в нитроклетчатке ("гремучий студень"). Его перевозка запрещена. Вещество используют во многих странах для заводского изготовления составной части нитроглицериновых промышленных взрывчатых веществ и баллистических бездымных порохов [1, 2].

Для обеспечения санитарно-эпидемиологического контроля за содержанием данного вещества в водоемах районов его производства и использования необходимо проведение соответствующих исследований по органолептическому, общесанитарному и токсикологическому признакам вредности [3].

Цель работы — определение особенностей содержания нитроглицерина в воде водоёмов.

### Материалы и методы

В качестве объекта исследований использован нитроглицерин (1, 2, 3-пропантриолтринитрат,  $C_3H_5O_9N_3$ , тринитроглицерин, глицеринтринитрат, тринитрин, глицерин), номер CAS 55-63-0 с удельной плотностью  $d_4^{20} = 1,595 \text{ г/см}^3$  и молекулярной массой 227,10. Данное соединение представляет собой маслянистую бесцветную или желтоватую жидкость, плохо растворимую в воде [2]. В исследовании использовали НГЦ, растворённый в этиловом спирте (20,0 %-й раствор), из которого перед постановкой экспериментов готовили водные растворы необходимой концентрации.

Исследования влияния соединения на органолептические свойства воды и её общесанитарный режим выполнены в соответствии с требованиями действующих методических указаний [3] и в соответствии с положениями монографий [4–6]. При этом анализ качества воды проводили по следующим показателям: прозрачность, цветность, наличие пены (пенообразование) и запаха [3–8].

В ходе оценки воды на прозрачность визуально различали (читали) черный шрифт (Times New Roman 12 pt) на белой бумаге при равномерном освещении через высоту водяного столба тестируемых проб на уровне 20,0 см и более, а менее — принимали за достоверное отклонение от контроля [3–6]. В процессе проведения эксперимента по определению цветности применяли известный фотометрический метод [8]. Установление предельного значения цветности воды выражали в градусах по специальной шкале. Критериально значимой принята величина, превышающая 20,0°. При характеристике пенности использовали метод цилиндров. За пороговую принимали концен-

**Масленников Александр Александрович**, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией экологической токсикологии.

E-mail: maslennikov@rihtop.ru

**Демидова Светлана Александровна**, ведущий научный сотрудник лаборатории экологической токсикологии.

E-mail: demidova@rihtop.ru

**Яхьяева Мадина Хасановна**, младший научный сотрудник лаборатории экологической токсикологии.

E-mail: niigtp@fmba@mail.ru

**Новикова Ольга Николаевна**, заместитель директора по научной работе.

E-mail: novikova@rihtop.ru

Статья поступила в редакцию 23 января 2023 г.

© Масленников А. А., Демидова С. А., Яхьяева М. Х.,  
Новикова О. Н., 2023

трацию, при которой отсутствовала стабильная (более 1 мин) крупнопузырчатая пена, а высота мелкопузырчатой у стенок цилиндра не превышала 1,0 мм [3—6]. Для определения запаха воды применяли стандартный бальный метод. Критериально значимым допускается запах в 2 балла [3].

Воздействие вещества на общесанитарный режим воды оценивали по состоянию основных процессов её самоочищения: биохимическое потребление кислорода — БПК<sub>5</sub> (I фаза минерализации соединения) [3—6, 9]; развитие и отмирание сапрофитной микрофлоры [3, 7]; динамика процессов нитрификации азотсодержащих органических веществ (аммиачный азот, нитриты и нитраты) — II фаза минерализации органических веществ [3, 7, 10—12]. Достоверными считали отклонения показателей в опыте, выходявшие за пределы отличий соответствующим контрольным значениям: 15,0 % — угнетение; 20,0 % — стимуляция [3].

При анализе БПК<sub>5</sub> содержание растворённого кислорода в пробах осуществляли распространённым методом йодометрического титрования по Винклеру [3—6, 9]. Тестирование водных образцов выполняли в следующие сроки: в день загрязнения — 0-е сутки; на 1, 3, и 5-е сутки.

При изучении влияния токсиканта на процессы нитрификации в воде исходили из общеизвестных положений о том, что основу органических соединений во всех водах, включая подземные, составляют азотсодержащие вещества (нитраты NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, нитриты NO<sub>2</sub><sup>-</sup> и аммонийные соли NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Рассматриваемая группа ионов находится в тесной взаимосвязи. С учётом этого, в настоящих исследованиях характеристику влияния нитроглицерина на нитрифицирующие процессы в воде проводили в следующие сроки: в день загрязнения (0-е сутки) через 1 час после внесения вещества в воду; на 1, 3, 7, 10, 14, 17, 21, 23, 26, 27, 28, 29, 30 и 33 сутки [3, 7].

Жизнеспособность сапрофитной микрофлоры оценивали в 14-ти суточном эксперименте (на 0-е, 1-е, 2-е, 3-и, 4-е, 5-е, 8-е, 10-е и 14-е сутки) [3, 7].

В ходе определения порога острого общетоксического действия соединения в качестве биомодели использовали белых нелинейных крыс-самцов в количестве 32 особи (по 8 особей в группе) с массой тела

200,0—240,0 г [3]. Опыты проведены с учетом принципов гуманного обращения с экспериментальными грызунами [13].

Водные растворы токсиканта вводили в желудок подопытным особям при помощи зонда из расчёта 1,0 мл на 100,0 г массы тела. Особи контрольной группы получали адекватные объёмы водно-крахмального раствора.

Общерезорбтивное действие НГЦ оценивали по клинической картине отравления, а также с помощью комплекса физиологических и поведенческих тестов, позволяющих интегрально охарактеризовать состояние организма подопытных крыс. При этом определяли динамику массы тела животных, частоту дыхательных движений и сердечных сокращений, поведение (горизонтальная, вертикальная двигательная, эмоциональная активность, а также "норковый" рефлекс и груминг) в установке "открытое поле" [14].

Статистическую обработку данных осуществляли с применением критерия t Стьюдента–Фишера [15], используя пакет Primer of Biostatistics 4.03.

**Результаты.** В процессе проведения эколого-токсикологических исследований выявлено, что присутствие тестируемого соединения в воде водоёмов в концентрациях  $2,5 \cdot 10^{-1}$ ;  $5,0 \cdot 10^{-2}$ ;  $2,5 \cdot 10^{-2}$  и  $1,0 \cdot 10^{-2}$  мг/л не изменяло её цветность, прозрачность и запах.

Однако в максимальных уровнях ( $2,5 \cdot 10^{-1}$  и  $5,0 \cdot 10^{-2}$  мг/л) при температурах 20,0—25,0 °C (комнатная) и 60,0 °C вещество способствовало крупному (более 3 мм в диаметре) и длительному пенообразованию по отношению к контролю, которое не исчезало в течение 1—3 минут. При снижении содержания токсиканта в исследуемой среде до  $2,5 \cdot 10^{-2}$  мг/л зарегистрированы минимальные достоверные изменения (табл. 1). Внесение вещества в воду в концентрации  $1,0 \cdot 10^{-2}$  мг/л критериально значимых отличий от контроля не вызывало.

Основываясь на представленных данных, пороговый уровень НГЦ по органолептическому признаку вредности составляет —  $2,5 \cdot 10^{-2}$  мг/л, а максимально недействующий —  $1,0 \cdot 10^{-2}$  мг/л.

Таблица 1

Характеристика пенистости воды, содержащей нитроглицерин

Температура воды, °C	Концентрация вещества в воде, мг/л	Наличие пены	Продолжительность сохранения пены, мин
20,0 <sup>p</sup> —25,0 <sup>o</sup> (комнатная)	Контроль	Отсутствие	—
	$2,5 \cdot 10^{-1}$	Крупная $h = 10,0$ мм, диаметр более 3,0 мм	Более 3 мин
	$5,0 \cdot 10^{-2}$	Крупная $h = 5,0$ мм, диаметр более 3,0 мм	Более 1 мин
	$2,5 \cdot 10^{-2}$	Мелкая $h = 1,0$ мм, диаметр менее 1,0 мм	15 с
	$1,0 \cdot 10^{-2}$	Отсутствие	—
60,0 <sup>o</sup>	Контроль	Отсутствие	—
	$2,5 \cdot 10^{-1}$	Крупная $h = 10,0$ мм, диаметр более 3,0 мм	Более 3 мин
	$5,0 \cdot 10^{-2}$	Крупная $h = 5,0$ мм, диаметр более 3,0 мм	Более 1 мин
	$2,5 \cdot 10^{-2}$	Мелкая $h = 1,0$ мм, диаметр менее 1,0 мм	15 с
	$1,0 \cdot 10^{-2}$	Отсутствие	—

Примечание. В таблице полужирным шрифтом указано достоверное отклонение величины от контроля.

При определении санитарных характеристик воды по трем указанным направлениям исследований (процессы БПК и нитрификации, состояние сапрофитной микрофлоры) соединение вносили в искусственные водоёмы в количестве  $2,5 \cdot 10^{-1}$ ;  $5,0 \cdot 10^{-2}$  и  $1,0 \cdot 10^{-2}$  мг/л.

В соответствии с требованиями МУ 2.1.5.720-98 [3] исследования возможности химагента проявлять негативное влияние на процессы БПК в воде водоёмов выполнены в трёх независимых сериях экспериментов.

Полученные результаты свидетельствуют, что НГЦ в каждой серии опытов оказывал одностороннее угнетающее воздействие на динамику процесса БПК, проявлявшуюся только в двух больших уровнях (табл. 2). При этом критерияльно значимое влияние токсиканта носило прямолинейный характер зависимости концентрации—эффект.

Понижение содержания токсиканта в водоёмах в 5 раз ( $1,0 \cdot 10^{-2}$  мг/л) на протяжении всего срока опытов не вызывало изменений нормального протекания аэробного биохимического окисления техногенного загрязнителя.

Исходя из приведенных данных, концентрация нитроглицерина  $5,0 \cdot 10^{-2}$  мг/л признана пороговой, а уро-

вень вещества  $1,0 \cdot 10^{-2}$  мг/л — максимально недействующим по воздействию на БПК<sub>5</sub> воды водоёмов.

В ходе исследования воздействия соединения на триаду азота зафиксировано, что НГЦ в двух максимальных уровнях оказывал негативное критерияльно значимое разнонаправленное воздействие на все стадии процесса нитрификации в воде водоёмов (табл. 3). Это свидетельствует о нарушении процессов самоочищения водной экосистемы, т. е. разбалансировке соотношения между содержанием различных форм азота, необходимых для нормального функционирования жизнедеятельности фауны и флоры в водоёмах.

Однако при содержании токсиканта в воде на уровне  $1,0 \cdot 10^{-2}$  мг/л на протяжении всего эксперимента значимых изменений относительно контроля не отмечено (таблица 3).

С учётом изложенного, концентрация оцениваемого взрывчатого вещества, равная  $5,0 \cdot 10^{-2}$  мг/л, определена в качестве пороговой, а уровень вещества  $1,0 \cdot 10^{-2}$  мг/л — максимально недействующим по воздействию на процессы нитрификации воды водоёмов (табл. 3).

Таблица 2

Достоверные изменения процессов БПК<sub>5</sub> воды (мг О<sub>2</sub>/л), загрязненной НГЦ

Период проведения исследований, сутки	Концентрация НГЦ в воде, мг/л			Контроль
	2,5·10 <sup>-1</sup>	5,0·10 <sup>-2</sup>	1,0·10 <sup>-2</sup>	
I серия				
1	0,43 (54,74↓)	0,73 (23,16↓)	0,87 (8,42)	0,95
3	3,05 (34,83↓)	3,59 (23,29↓)	4,70 (0,43)	4,68
5	4,16 (27,90↓)	4,74 (17,85↓)	5,45 (5,55)	5,77
II серия				
1	0,53 (37,65↓)	0,68 (20,00↓)	0,75 (11,76)	0,85
3	2,37 (27,96↓)	2,69 (18,24↓)	2,99 (9,12)	3,29
5	3,73 (21,14↓)	3,97 (16,07↓)	4,52 (4,44)	4,73
III серия				
1	0,58 (21,62↓)	0,60 (18,92↓)	0,67 (9,46)	0,74
3	2,45 (17,51↓)	2,49 (16,16↓)	2,86 (3,70)	2,97
5	3,31 (16,20↓)	3,39 (14,18)	4,03 (2,03)	3,95

Примечание. В скобках полужирным шрифтом указано достоверное отклонение величины (в %) и направленность эффекта (↑↓).

Таблица 3

Достоверные изменения показателей, характеризующих процессы нитрификации в воде, содержащей НГЦ

Показатели и единицы измерения	Сроки наблюдения	Концентрация НГЦ в воде, мг/л			Контроль
		$2,5 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	
Азот аммонийный (по $\text{NH}_4^+$ ), мг/л	30-е сутки	0,77 ( <b>16,30↓</b> )	0,83 (9,78)	0,88 (4,35)	0,92
	33-е сутки	0,57 ( <b>32,14↓</b> )	0,68 ( <b>19,15↓</b> )	0,76 (9,52)	0,84
Азот нитритов (по $\text{NO}_2^-$ ), мг/л	10-е сутки	1,40 ( <b>15,15↓</b> )	1,40 ( <b>15,15↓</b> )	1,45 (12,12)	1,65
	17-е сутки	2,00 ( <b>20,00↓</b> )	2,10 ( <b>16,00↓</b> )	2,25 (10,00)	2,50
	21-е сутки	2,00 ( <b>28,57↓</b> )	2,36 ( <b>15,71↓</b> )	2,60 (7,14)	2,80
	23-и сутки	2,06 ( <b>28,97↓</b> )	2,50 (13,79)	2,70 (6,90)	2,90
	26-е сутки	2,40 ( <b>17,24↓</b> )	2,70 (6,90)	2,80 (3,45)	2,90
	27-е сутки	2,58 ( <b>19,63↓</b> )	2,70 ( <b>15,89↓</b> )	3,12 (2,80)	3,21
	28-е сутки	2,14 ( <b>70,88↓</b> )	4,75 ( <b>35,37↓</b> )	8,25 (12,24)	7,35
	29-е сутки	10,17 ( <b>28,23↓</b> )	11,45 ( <b>19,20↓</b> )	13,21 (6,78)	14,17
	30-е сутки	8,14 ( <b>19,80↓</b> )	9,69 (4,53)	10,96 (7,98)	10,15
	33-е сутки	10,12 ( <b>16,71↓</b> )	10,01 ( <b>17,61↓</b> )	11,15 (8,23)	12,15
Азот нитратов (по $\text{NO}_3^-$ ), мг/л	3-и сутки	0,75 ( <b>27,12↑</b> )	0,62 (5,08)	0,59 (0,00)	0,59
	14-е сутки	0,75 ( <b>33,93↑</b> )	0,60 (7,14)	0,62 (10,71)	0,56
	17-е сутки	0,56 (12,00)	0,42 ( <b>16,00↓</b> )	0,43 (14,00)	0,50
	21-е сутки	0,50 ( <b>25,15↑</b> )	0,42 ( <b>27,27↑</b> )	0,37 (12,12)	0,33
	30-е сутки	0,41 ( <b>22,64↓</b> )	0,53 (0,00)	0,55 (3,77)	0,53
	33-е сутки	0,46 ( <b>22,03↓</b> )	0,45 ( <b>23,73↓</b> )	0,55 (6,78)	0,59

Примечание. В скобках полужирным шрифтом указано достоверное отклонение величины (в %) и направленность эффекта (↑↓).

Оценка состояния сапрофитной микрофлоры позволила установить, что наличие в воде искусственных водоёмов НГЦ с 0-х по 3-и сутки и далее на 8-е сутки эксперимента в концентрации 0,25 мг/л оказывало отрицательное влияние на жизнеспособность микробных сообществ данной группы (табл. 4).

Противоположный, но также выраженный эффект (стимуляция) воздействия химагента на данные микроорганизмы зарегистрирован на этом же уровне с 4-х по 5-е сутки исследований до 54,93 % (табл. 4).

Кроме того, тестируемое соединение вызывало выраженную стрессовую реакцию у анализируемой группы микрофлоры при его содержании в водной среде в концентрации  $5,0 \cdot 10^{-2}$  мг/л. Подтверждением данному факту является наличие критериально значимого [3] существенного увеличения количества колоний сапрофитов от 23,52 до 98,26 %, определяемое с 0-х по 4-е сутки опыта (табл. 4).

Наряду с выявленными изменениями при снижении содержания вещества в воде до уровня  $1,0 \cdot 10^{-2}$  мг/л подавления или увеличения роста клеток сапрофитов относительно контроля не отмечено.

Основываясь на полученных данных, концентрация НГЦ —  $5,0 \cdot 10^{-2}$  мг/л признана пороговой по влиянию на микроорганизмы данной экосистемы, а  $1,0 \cdot 10^{-2}$  мг/л — максимально недействующей.

В процессе установления порога острого общетоксического действия влияние вещества на организм лабораторных животных оценивали при его внутрижелудочном поступлении в дозах — 16,3 мг/кг (1 опытная группа), 8,2 мг/кг (2-я опытная группа) и 5,5 мг/кг

(3 опытная группа). Обследование крыс проводили через 1 сутки после введения водных растворов химагента. При этом определено, что у животных опытных групп не обнаружено видимых клинических признаков интоксикации, а также достоверных, в сопоставлении с контролем, отличий массы тела, частоты дыхательных движений и частоты сердечных сокращений. Однако оценка поведения самцов позволила зафиксировать сдвиг отдельных показателей у подопытных особей, получивших вещество в двух больших дозах. В частности, в ходе тестирования крыс первой опытной группы выявлено статистически значимое понижение показателя эмоциональной активности, выходящего за пределы бисигмального отклонения аналогичного значения у самцов контрольной группы (табл. 5).

Снижение уровня воздействия ксенобиотика до величины 8,2 мг/кг также приводило к изменению поведения крыс, отличавшегося повышением их активности. У особей данной группы зарегистрировано достоверное увеличение горизонтальной активности и груминга, (последний показатель превышал значения 2 сигм контроля).

В противоположность отмеченному, однократное пероральное поступление нитроглицерина в организм животных на уровне 5,5 мг/кг не вызывало каких-либо отклонений оцениваемых показателей.

С учетом изложенного доза НГЦ, равная 16,3 мг/кг, признана явно действующей. Порог острого общетоксического действия соответствует уровню 8,2 мг/кг. Доза соединения, равная 5,5 мг/кг, определена в качестве максимально недействующей.

Таблица 4

**Достоверные изменения численности сапрофитной микрофлоры воды, загрязнённой НГЦ (количество колоний / 1,0 мл)**

Период посева	Концентрация НГЦ в воде, мг/л			Контроль
	$2,5 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	
0 (через 1 час)	8856,0 ( <b>59,98↓</b> )	43867,0 ( <b>98,26↑</b> )	20005,0 (9,59)	22126,0
0 (через 3 час)	23160,0 ( <b>31,35↓</b> )	53908,0 ( <b>59,79↑</b> )	33007,0 (2,16)	33737,0
1-е сутки	11045,0 ( <b>23,73↓</b> )	19466,0 ( <b>34,42↑</b> )	13320,0 (8,02)	14481,0
2-е сутки	8862,0 ( <b>17,98↓</b> )	15066,0 ( <b>47,78↑</b> )	10981,0 (7,71)	10195,0
3-е сутки	7022,0 ( <b>54,27↓</b> )	18967,0 ( <b>23,52↑</b> )	14356,0 (6,51)	15356,0
4-е сутки	6817,0 ( <b>54,93↑</b> )	5750,0 ( <b>30,68↑</b> )	3942,0 (10,41)	4400,0
5-е сутки	15600,0 ( <b>32,96↑</b> )	11317,0 (3,55)	11160,0 (4,88)	11733,0
8-е сутки	1103,0 ( <b>31,45↓</b> )	1571,0 (2,36)	1796,0 (11,62)	1609,0

Примечание. В скобках полужирным шрифтом указано достоверное отклонение величины (в %) и направленность эффекта (↑↓).

Таблица 5

**Достоверные изменения, установленные после однократного перорального воздействия нитроглицерина**

Показатели и единицы измерений	Дозы вещества, мг/кг			
	16,3	8,2	5,5	Контроль
Показатели поведения				
Горизонтальная активность, усл. ед.	14,29 ± 4,24	25,71 ± 3,92*	9,14 ± 2,51	13,14 ± 4,14
Эмоциональная активность, усл. ед.	0,29 ± 0,18**	1,63 ± 0,42	1,38 ± 0,46	1,50 ± 0,22 (0,40 ÷ 2,60)
Груминг, сек	8,29 ± 1,51	18,14 ± 3,03**	2,86 ± 1,37	7,14 ± 1,90 (-2,89 ÷ 17,17)

Примечание. Символом \* обозначены статистически значимые различия при  $P \leq 0,05$  и находящиеся в пределах ( $M \div 2\sigma$ ) показателей контрольной группы животных; символом \*\* обозначены статистически значимые различия при  $P \leq 0,05$ , выходящие за пределы ( $M \div 2\sigma$ ) показателей контрольной группы животных.

### Заключение

Обобщённый анализ результатов выполненных экспериментов позволил установить следующее. Однократное загрязнение воды водоёмов НГЦ сопровождается негативным изменением её органолептических характеристик и общесанитарных свойств. Кроме того, в условиях острого опыта вещество при внутрижелудочном поступлении оказывает токсическое воздействие на организм лабораторных животных.

Полученные данные свидетельствуют о том, что попадание нитроглицерина в воду представляет эколого-токсикологическую опасность, зарегистрированную по всем трём базовым признакам вредности, что учтено при обосновании ПДК соединения в воде водоёмов.

Сделан вывод: нитроглицерин, не изменяя прозрачность, цветность и запах воды, способствует длительному пенообразованию; концентрация  $5,0 \cdot 10^{-2}$  мг/л определена как пороговая по органолептическому признаку вредности; по влиянию на процессы биохимического потребления кислорода, процессы нитрификации и жизнеспособность сапрофитной микрофлоры установлена единая пороговая концентрация:  $5,0 \cdot 10^{-2}$  мг/л; уровень токсиканта равен 8,2 мг/кг, признан порогом однократного общетоксического действия.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Родионов А. Н. Сведения о взрывчатых веществах. Боеприпасы // Пособие по огневой и инженерной подготовке, подготовке по связи. [Электронный ресурс]. URL: [https://ebooks.grsu.by/voen\\_podgotovka/tema-5-svedeniya-o-vzryvchatykh-veshchestvakh-boepri-pasy.htm](https://ebooks.grsu.by/voen_podgotovka/tema-5-svedeniya-o-vzryvchatykh-veshchestvakh-boepri-pasy.htm) (дата обращения: 09.12.2022).
2. Котенко К. В., Уйба В. В., Кушнёва В. С., Селиванова Л. Н., Захарова З. М. Вредные химические вещества в ракетно-космической отрасли: справочник / под ред. Уйбы В. В. — М.: ФМБА, ФМБЦ им. А. И. Бурназяна, 2011. — 408 с.
3. МУ 2.1.5.720-98. Обоснование гигиенических нормативов химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. — М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава РФ, 1999. — 55 с.
4. Муравьев А. Г. Руководство по определению показателей качества воды полевыми методами. — СПб.: Кримас+, 2004. — 477 с.
5. Унифицированные методы анализа вод / под общ. ред. Лурье Ю. Ю. — М.: Химия, 1971. — 375 с.
6. Лурье Ю. Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод. — М.: Химия, 1984. — 448 с.
7. Цыганок В. М. Определение влияния исследуемых веществ на процессы естественного самоочищения при гигиеническом нормировании в области санитарной охраны водоёмов: сб. научных трудов НИИ гигиены им. Ф. Ф. Эрисмана. — М., 1974. С. 55—58.
8. ГОСТ 31868-2012. Межгосударственный стандарт. Вода. Методы определения цветности. — М.: Стандартинформ, 2014. — 12 с.
9. ПНД Ф 14.1:2.4.123-97. КХА вод. МВИ биохимической потребности в кислороде после п-дней инкубации (БПК<sub>полн.</sub>) в поверхностных пресных, подземных (грунтовых), питьевых, сточных и очищенных сточных водах. Государственный комитет РФ по охране окружающей среды. — М., 2004. — 18 с.
10. ПНД Ф 14.1:2.1-95. Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов аммония в очищенных сточных водах фотометрическим методом с реактивом Несслера. Государственный комитет РФ по охране окружающей среды. — М., 2004. — 13 с.
11. ПНД Ф 14.1:2.3-95. Методика выполнения измерений массовой концентрации нитрит-ионов в природных и сточных водах фотометрическим методом с реактивом Грисса. Государственный комитет РФ по охране окружающей среды. — М., 2004. — 13 с.
12. ПНД Ф 14.1:2.4-95. Методика выполнения измерений массовой концентрации нитрат-ионов в природных и сточных водах фотометрическим методом с салициловой кислотой. Государственный комитет РФ по охране окружающей среды. — М., 2004. — 13 с.
13. ГОСТ 33044-2014. Принципы надлежащей лабораторной практики. — М.: Стандартинформ, 2014. — 18 с.
14. МР № 2166-80. Методические рекомендации по использованию поведенческих реакций животных в токсикологических исследованиях для целей гигиенического нормирования / под общ. ред. Буркацкой Е. Н., Витер В. Ф., Тимофиевской Л. А. и др. — Киев, 1980. — 46 с.
15. Лакин Г. Ф. Биометрия. — М.: Высшая школа, 1990. — 350 с.

## Characteristics of the negative manifestations of trinitrin when contained in the water of reservoirs

A. A. MASLENNIKOV, S. A. DEMIDOVA, M. H. YAHYAEVA, O. N. NOVIKOVA  
FSUE "Research Institute of Hygiene, Toxicology and Occupational Pathology"  
at Federal Medical and Biological Agency, Volgograd, Russia

*A comprehensive experimental assessment of the danger of the content of an explosive substance — nitroglycerin in the water of reservoirs was carried out. It was found that the toxicant caused changes in the organoleptic and general sanitary properties of this ecosystem. In the conditions of acute experience, the substance with intragastric intake had a toxic effect on the body of laboratory animals. The data obtained are taken into account when justifying the MPC of the compound in question in the water of reservoirs.*

**Keywords:** water; nitroglycerin; organoleptic and sanitary regime of reservoirs; threshold of acute general toxic effect.

Bibliography — 15 references.

Received January 23, 2023



УДК 631.879.2:626.131.5  
DOI: 10.52190/2073-2589\_2023\_3\_33  
EDN: NJHIKS

## Анализ процесса выщелачивания вскрышных пород как дополнительного источника поступления некоторых ионов в карьерные сточные воды

О. В. БЕЛЯЕВА, канд. хим. наук; Н. В. ГОРА, канд. техн. наук; А. К. ГОРЕЛКИНА, д-р техн. наук;  
Н. С. ГОЛУБЕВА, канд. техн. наук; Л. А. ИВАНОВА, канд. техн. наук  
Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

*Проведено исследование процесса выщелачивания подвижных форм сульфатов и солей жесткости из пород отвалов и фильтрующих дамб. Показана зависимость содержания исследуемых ионов от времени контакта воды с образцами. Установлено, что в условиях равновесия выщелачивание сульфатов из всех горных пород наблюдается как нейтральными, так и кислыми растворами. Вымывание солей жесткости происходит из всех исследуемых образцов при имитации кислотных дождей. Определено, что в динамических условиях выщелачивание происходит для всех образцов.*

**Ключевые слова:** сточные воды, сульфаты, выщелачивание, вскрышные породы, соли жесткости.

Ресурсоориентированная экономика Кемеровской области определяет уровень техногенного влияния на экосистемы региона. Учитывая, что воздействие горных работ на окружающую среду многопланово и комплексно, угледобывающие предприятия являются одним из наиболее мощных источников загрязнения окружающей среды жидкими отходами, оказывая негативное воздействие на водный режим территории Кузбасса. При сохранении существующей тенденции роста объемов угледобычи преимущественно открытым способом сохраняется и рост объемов сбрасываемых разрезами сточных вод. Мероприятия по защите окружающей среды от воздействия открытой разработки месторождений угля на природные водные объекты, как правило, направлены на предупреждение и устранение нежелательных последствий хозяйственной деятельности на экосистемы. Экологический эффект от очистки загрязненных карьерных вод, поступающих в природные водоемы, состоит в достижении безопасных концентраций кон-

таминантов в них, что, в свою очередь, приводит к экономическому эффекту за счет предотвращения уплаты штрафов за нанесение ущерба природному водному объекту. Основная сложность заключается в том, что необходимо очищать большие объемы вод. Охрана водных ресурсов от загрязнения неочищенными стоками угольной промышленности является одной из приоритетных задач угольной отрасли региона [1].

Самый крупный в бассейне реки Томь очаг загрязнения природных вод карьерными и шахтными стоками относится к наиболее промышленно освоенному району Кемеровской области в окрестностях городов Новокузнецк, Прокопьевск и Киселевск. Проходящие по данной территории реки Ускат и Аба испытывают не меньшую нагрузку, являясь приемниками многочисленных сточных вод, в том числе с угольных разрезов. При этом часть небольших рек, питающих Ускат и Абу, практически начинаются в карьерах [2, 3].

Формирование карьерных вод происходит за счет трещинных вод скальной толщи и атмосферных осадков. Они собираются в зумпфы, расположенные в нижней точке карьера, откуда специальными насосами перекачиваются в технический буферный водоем. Вода по трубе поступает из буферного водоема в отстойник, находящийся в естественном понижении рельефа. После отстаивания осветленная вода попадает в поверхностный водный объект.

Технологии очистки карьерных сточных вод через искусственные фильтрующие массивы, для строительства которых используют твердые отходы добычи полезных ископаемых, получили широкое распространение на современных разрезах Кузбасса [4]. Преимущества данных технологий заключается в простоте возведения, технологичности очистного сооружения, малой площади и низкой себестоимости очистки сточных вод. Данный подход обычно имеет высокие экологические показатели при достаточной экономической выгоде. Качество карьерных вод

**Беляева Оксана Владимировна**, доцент кафедры "Общая и неорганическая химия".

E-mail: beljaeva1@yandex.ru

**Гора Наталья Вячеславовна**, доцент кафедры "Общая и неорганическая химия".

E-mail: goranataliya@yandex.ru

**Горелкина Алена Константиновна**, доцент кафедры "Техносферная безопасность".

E-mail: alengora@yandex.ru

**Голубева Надежда Сергеевна**, доцент кафедры "Техносферная безопасность".

E-mail: golubeva.n.s@mail.ru

**Иванова Людмила Анатольевна**, доцент кафедры "Техносферная безопасность".

E-mail: lyuda\_ivan@mail.ru

Статья поступила в редакцию 2 июня 2023 г.

© Беляева О. В., Гора Н. В., Горелкина А. К., Голубева Н. С., Иванова Л. А., 2023

после прохождения очистки зависит от используемых пород и параметров фильтрующего массива [5].

Водородный показатель карьерных вод Кемеровской области, зависящий от обилия осадков и поступления подземных вод, в большинстве случаев находится в пределах значений 6,0—8,5. Но при этом нужно учитывать, что выпадение кислотных осадков стало широко распространённым явлением, приводящим к негативным экологическим изменениям на территории Кемеровской области. Преимущественной причиной образования кислотных осадков является взаимодействие атмосферной воды с диоксидом углерода, а также с оксидами серы и азота, которое приводит к формированию слабой угольной кислоты и других более сильных кислот. Для южной и северной частей региона характерны слабокислые воды, а для центральной — нейтральные и слабощелочные [6, 7].

По химическому составу карьерные воды в центральной части области относятся к гидрокарбонатно-сульфатным, в южной и северной части — к гидрокарбонатно-кальциевым.

Сточные воды многих угольных разрезов содержат большое количество сульфатов, превышающие их фоновые уровни. Допустимый предел содержания сульфат-ионов в бытовых и сточных водах, согласно СанПиН 1.2.3685-21, составляет 500 мг/дм<sup>3</sup>.

Источниками сульфатов в карьерных сточных водах являются серосодержащие минералы. Дополнительный вклад в увеличение концентрации сульфатов в стоках угольных разрезов вносят атмосферные осадки, содержащие двуокись серы. Формирование сернистого ангидрида в атмосфере происходит главным образом за счет сгорания угля и нефтепродуктов [8, 9]. Кроме того, большинство сульфатных соединений легко растворимо в воде, что приводит к увеличению их содержания в сточных водах, очищаемых фильтрованием за счет вымывания из вскрышных пород. Контакт горных пород с карьерными водами и атмосферными осадками может также приводить к выщелачиванию солей жесткости (ионов кальция и магния). В связи с этим сточные воды после контакта с вскрышными породами и фильтрующими горными массивами могут иметь более высокую концентрацию сульфат-ионов, а также ионов кальция и магния по сравнению с подающимися на отстаивание и фильтрацию стоками [10, 11].

Цель данной работы — оценка выщелачивания сульфатов и солей жесткости из горных пород. Для выполнения поставленного задания были определены следующие задачи:

- оценка вымывания сульфатов и солей жесткости в условиях равновесия нейтральными и кислыми (имитация кислотных осадков) растворами;
- определение степени выщелачивания сульфатов и солей жесткости при медленной фильтрации через слой горных пород.

### Методы и принципы исследования

Объектами исследования были выбраны породы отвалов (образцы О-1—О-4) и фильтрующих дамб (Д-1 и Д-2). После дробления породы и просеивания воздушно-сухих образцов для анализа отобрали фракции с размером 0,25—0,75 мм.

Определение концентрации сульфатов проводили методом фототурбидиметрии (ГОСТ 31940-2012), кальция и магния — комплексометрическим титрованием (ГОСТ 23268.5-78).

На первом этапе исследовали модельный процесс выщелачивания подвижных форм сульфатов и солей жесткости из горных пород при попадании атмосферных осадков. Для этого навеску образца породы заливали дистиллированной водой (рН 6,86) или ацетатным буферным раствором с рН 4,75 (имитация кислотных осадков) при соотношении 1:200. Содержание исследуемых ионов измеряли через 12, 24, 36 и 48 часов.

### Основные результаты

На рис. 1, 2 приведены зависимости содержания исследуемых ионов от времени контакта воды с образцом породы фильтрующей дамбы Д-2.

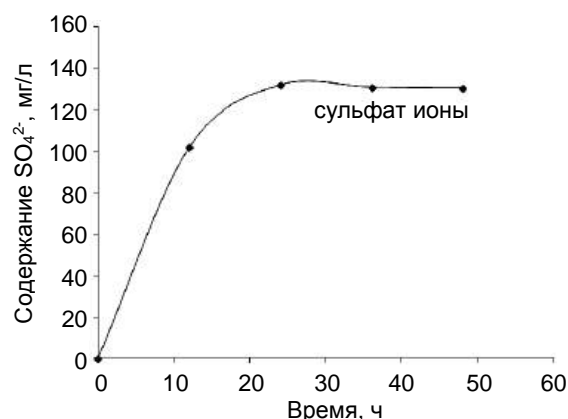


Рис. 1. Изменение концентрации сульфатов в процессе выщелачивания водой образца фильтрующей дамбы

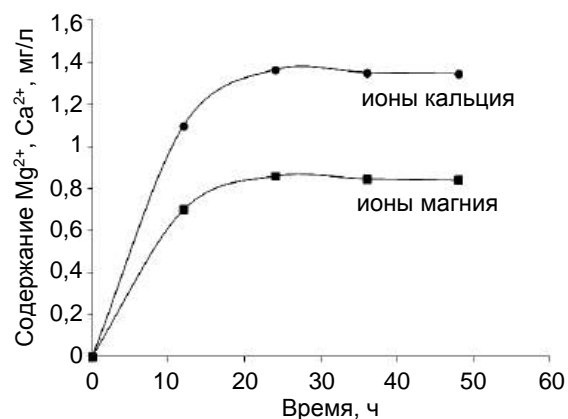


Рис. 2. Изменение концентрации кальция (●) и магния (■) в процессе выщелачивания водой образца фильтрующей дамбы

Для остальных образцов получены аналогичные результаты. Установлено, что наиболее интенсивное выщелачивание всех исследуемых ионов протекает в течение первых 12 ч, после 20—24 ч контакта с раствором экстрагента процесс стабилизируется.

Содержание сульфатов и солей жесткости в растворах после 48 ч контакта с породами приведено в табл. 1.

Таблица 1

Содержание сульфатов, кальция и магния в растворах после контакта с горными породами

Образец породы	Контактирующий раствор	Содержание, мг/кг		
		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
О-1	Вода	191,9 ± 53,7	н/о	н/о
	Буферный раствор	236,7 ± 66,2	19,80 ± 2,97	5,59 ± 0,84
О-2	Вода	328,6 ± 92,0	н/о	н/о
	Буферный раствор	708,0 ± 198,2	20,27 ± 3,04	15,39 ± 2,30
О-3	Вода	390,6 ± 109,4	н/о	н/о
	Буферный раствор	87,0 ± 24,4	21,51 ± 3,23	6,36 ± 2,31
О-4	Вода	433,3 ± 121,3	н/о	н/о
	Буферный раствор	367,2 ± 102,8	19,12 ± 2,87	9,56 ± 1,43
Д-1	Вода	1100,9 ± 220,2	2,84 ± 0,42	1,70 ± 0,26
	Буферный раствор	1484,5 ± 296,9	86,8 ± 13,0	45,3 ± 6,8
Д-2	Вода	127,3 ± 25,5	1,42 ± 0,21	0,85 ± 0,13
	Буферный раствор	596,2 ± 166,9	15,72 ± 2,36	6,00 ± 0,90

Примечание: н/о — не обнаружено.

При контакте образцов отвалов с дистиллированной водой соли жесткости не обнаружены. При этом для образцов фильтрующих дамб выщелачивание не превышало для кальция 3 мг, а для магния — 2 мг на 1 кг породы. В случае имитации кислотных дождей наблюдается вымывание солей жесткости во всех исследуемых образцах пород. При этом наибольшее извлечение кальция и магния наблюдается для образца Д-1.

Выщелачивание сульфатов из всех горных пород наблюдается как нейтральными, так и кислыми растворами (см. табл. 1). Извлечение сульфатов кислыми осадками из исследуемых образцов (за исключением О-3, О-4) также, как и для солей жесткости, превышает выщелачивание водой.

Полученные данные позволяют предположить, что в случае кислотных осадков, доля которых для Кемеровской области составляет 15—30 % от общего количества осадков [3, 6], поступление SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup> в поверхностные водоемы может резко возрасти. Породы дамбы Д-1 обладают наименьшей устойчивостью к химической эрозии.

Так как карьерные стоки непрерывно просачиваются сквозь вскрышные породы, на следующем этапе исследований было оценено выщелачивание сульфатов и солей жесткости в динамических условиях. Для этого навеску образцов породы массой 5,00 ± 0,02 г помещали в колонку диаметром 2 см лабораторной установки (рис. 3).

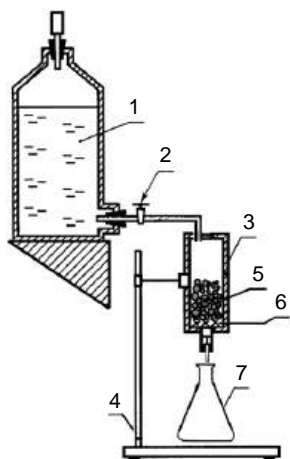


Рис. 3. Схема лабораторной установки для анализа процесса выщелачивания в динамических условиях: 1 — бутылка Вульфа; 2 — кран; 3 — колонка; 4 — штатив; 5 — порода; 6 — поддерживающий слой; 7 — колба для сбора фильтрата

Из бутылки Вульфа с нижним тубусом через колонку пропустили 1 литр дистиллированной воды со скоростью 5,0 ± 0,2 мл/мин, что соответствует в выбранной геометрии эксперимента линейной скорости 1,60 см/мин. Весь собранный фильтрат был проанализирован на ионы SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Содержание сульфатов, кальция и магния в растворах после контакта с горными породами в динамических условиях

Образец породы	Содержание, мг/кг		
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
О-1	444,5 ± 112,6	152,3 ± 26,8	90,2 ± 16,2
О-2	593,4 ± 108,7	149,7 ± 25,2	81,1 ± 14,3
О-3	969,1 ± 218,2	150,2 ± 26,4	77,8 ± 12,2
О-4	1266,7 ± 228,2	59,8 ± 10,8	35,9 ± 6,5
Д-1	1535,1 ± 258,1	145,2 ± 26,4	4,00 ± 0,69
Д-2	847,6 ± 152,6	242,0 ± 69,6	174,2 ± 27,1

В динамических условиях выщелачивание наблюдали для всех образцов. Суффозия исследуемых ионов при непрерывном контакте с водой превышает вымывание в условиях равновесия не только из нейтральных растворов, но и при имитации кислотных осадков.

## Заключение

При взаимодействии исследуемых горных пород с водными потоками происходит процесс выщелачивания. Мобилизационный эффект буферного раствора связан с увеличением кислотности среды. На практике образующаяся угольная кислота может вытеснять катионы кальция и магния, а сама превращаться в гидрокарбонат-ион. Выщелачивание также может протекать под действием других кислот. Кроме того, чем сильнее кислота, тем быстрее будет происходить вымывание ионов из отвалов.

Полученные данные показывают, что ионы кальция вытесняются лучше, чем ионы магния. Вероятно, это объясняется тем, что ионы магния более прочно

связаны с силикатами, входящими в состав горных пород.

При контакте всех образцов горных пород как с дистиллированной водой, так и с кислыми растворами (имитация кислотных осадков) наблюдается значительное выщелачивание из них сульфатов от 87 до 1485 мг на 1 кг породы.

Учитывая, что наибольшее вымывание происходит в течение первых суток контакта можно предположить рост поступления исследуемых ионов в поверхностные водные объекты при прохождении карьерных стоков через вскрышные породы, а также при массовом таянии снега или сильных атмосферных осадках.

*Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла "Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения", утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. №1144-р, № соглашения 075-15-2022- 1201 от 30.09.2022 г.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Глушанкова И. С. Очистка карьерных вод горнорудных предприятий от азотсодержащих соединений с использованием редокс-барьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 10. С. 58—68.
2. Стоящева Н. В. Проблема загрязнения малых рек Кузбасса сточными водами промышленных предприятий // Вестник Кемеровского государственного университета. 2015. Т. 64. № 4–3. С. 156—163.
3. Стоящева Н. В. Оценка антропогенной нагрузки на водные объекты бассейна Верхней Оби в разные по водности периоды // Известия Алтайского отделения РГО. 2018. Т. 51. № 4. С. 17—26.
4. Доклад о состоянии окружающей среды города Новокузнецка за 2021 год [Электронный ресурс] // Комитет охраны окружающей среды и природных ресурсов администрации города Новокузнецка. 2022. URL: <https://eko-nk.ru/>. (дата обращения: 15.03.23).
5. Тюленев М. А. Технология очистки сточных вод на действующих разрезах Кузбасса // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. S6. С. 104—106.
6. Лесин Ю. В. Сравнительная оценка содержания загрязняющих примесей в карьерных сточных водах при использовании различных методов их очистки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. S7. С. 76—95.
7. Доклад о состоянии и охране окружающей среды Кемеровской области — Кузбасса в 2021 году // Администрация правительства Кузбасса Министерство природных ресурсов и экологии Кузбасса. 2022. [Электронный ресурс]. URL: [http://ecokem.ru/wp-content/uploads/2022/08/doklad\\_2021.pdf](http://ecokem.ru/wp-content/uploads/2022/08/doklad_2021.pdf). (дата обращения: 15.03.23).
8. Попов А. Н. Применение искусственных фильтрующих массивов для очистки карьерных сточных вод разреза "Шестаки" // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. S1-1. С. 560—567.
9. Маслобоев В. А. Методы снижения концентрации сульфатов в сточных водах горнорудных предприятий // Вестник Кольского научного центра РАН. 2017. Т. 9. № 1. С. 99—115.
10. Тюленев М. А. Перенос загрязняющих веществ при фильтрации сточных карьерных вод во вскрышных породах // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2011. Т. 85. № 2. С. 22—30.
11. Тюленев М. А. Некоторые результаты промышленной проверки очистки карьерных сточных вод фильтрацией в массивах вскрышных пород // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2015. S1-1. С. 569—577.

## Analysis of the overburden leaching process as an additional source of some ions entering quarry wastewater

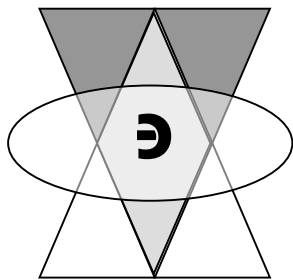
O. V. BELYAEVA, N. V. GORA, A. K. GORELKINA, N. S. GOLUBEVA, L. A. IVANOVA  
Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

*The process of leaching of mobile forms of sulfates and hardness salts from the rocks of dumps and filter dams has been studied. The dependences of the content of the studied ions on the time of contact of water with the samples are given. The most intensive leaching of all the studied ions occurs during the first 12 hours, after 20—24 hours of contact with the extractant solution, the process stabilizes. It has been established that under equilibrium conditions, the leaching of sulfates from all rocks is observed with both neutral and acidic solutions. The leaching of hardness salts occurs from all the studied samples during imitation of acid rain. It is determined that under dynamic conditions leaching occurs for all samples. The suffusion of the studied ions in continuous contact with water exceeds the leaching under equilibrium conditions not only from neutral solutions, but also during imitation of acid precipitation.*

**Keywords:** wastewater, sulfates, leaching, overburden, hardness salts.

**Bibliography** — 11 references.

*Received June 2, 2023*



# Чрезвычайные ситуации, экологическая оценка их последствий

УДК 504.064

DOI: 10.52190/2073-2589\_2023\_3\_37

EDN: NSBORP

## Эколого-экономические аспекты закрытия полигона "Красный Бор" в контексте экономики замкнутого цикла

А. А. ПАКИНА, канд. геогр. наук; М. Н. ЦЫМБАЛ; С. Д. ШЛАНДАКОВА  
МГУ имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

*Проведен анализ экологической ситуации в районе расположения полигона "Красный Бор". Сделан вывод о продолжающемся негативном воздействии полигона на окружающую среду, и рассмотрены возможные пути его предотвращения. По результатам оценки уровня загрязнения почвенного и растительного покрова в районе исследования, донных отложений и вод р. Большая Ижорка, полигон отнесен к I категории негативного воздействия на окружающую среду. При сравнении экологических и экономических эффектов от реализации возможных сценариев рекультивации полигона — нулевого, стандартного и интенсивного — выявлены экологические риски, и оценены перспективы их предотвращения. Обоснован выбор технологической схемы переработки накопленных отходов в рамках интенсивного сценария с возможностью извлечения ценных примесей из нефтешламов. Предложена бизнес-модель, отражающая связи между сторонами, вовлеченными в процесс рекультивации, и структуру издержек и доходов при переходе на принципы замкнутой экономики.*

**Ключевые слова:** промышленные отходы, замкнутая экономика, наилучшие доступные технологии, бизнес-модель.

Сложившаяся к настоящему времени модель "линейной" экономики предполагает вовлечение в процесс производства постоянно растущие объемы природных ресурсов, что противоречит концепции устойчивого развития и сопряжено с экологическими и экономическими рисками [1, 2]. В связи с этим все большую актуальность приобретает переход к экономике замкнутого цикла или циркулярной экономике (*circular economy*), в которой производство продук-

ции, ее поступление в оборот и переход в категорию отходов представляет собой единый замкнутый процесс, основанный на ресурсосбережении и энергоэффективности [3, 4].

Одним из насущных вопросов в рамках перехода к экономике замкнутого цикла является повышение эффективности обращения с промышленными отходами. В 2020 г. на территории России образовалось 6955,7 млн т отходов производства и потребления, из которых около 99 % (6907,2 млн т) приходится на промышленные отходы или отходы производства [5]. При этом к отходам производства отнесены не только промышленные отходы, но также отходы, образующиеся в результате сельскохозяйственной деятельности и строительства, что связано с отсутствием в Федеральном законе РФ от 24.06.1998 № 89-ФЗ "Об отходах производства и потребления" определения понятия "промышленные отходы". С учетом разграничения понятий отходов производства и промышленных отходов к последним можно отнести образование веществ и предметов непосредственно в результате промыш-

**Пакина Алла Анатольевна**, доцент кафедры "Рациональное природопользование".

E-mail: allapa@yandex.ru

**Цымбал Марина Николаевна**, старший преподаватель кафедры "Рациональное природопользование".

E-mail: cimbal\_mar@mail.ru

**Шландакова Софья Дмитриевна**, магистрант "Экономического факультета".

E-mail: shlandakova00@list.ru

Статья поступила в редакцию 4 мая 2023 г.

© Пакина А. А., Цымбал М. Н., Шландакова С. Д., 2023



ленной деятельности (добывающих, обрабатывающих производств и т. д.). В итоге объем промышленных отходов в Российской Федерации на 2020 г. может быть оценен в 6633,63 млн т или 95,4 % от общего объема отходов [6].

Возможность комплексной оценки эколого-экономических эффектов от утилизации промышленных отходов была проанализирована на примере полигона "Красный Бор" в Тосненском районе Ленинградской области (рис. 1).



**Рис. 1. Объект накопленного вреда окружающей среде, нанесенной полигоном "Красный Бор"**  
(фото с сайта: <http://www.poligonkb.spb.ru>)

Полигон эксплуатировался в период с 1969 г. по 2014 г., когда прием отходов практически прекратился. Приказом Минприроды от 25.09.2018 г. полигон "Красный Бор" включен в Реестр объектов накопленного вреда окружающей среде. Согласно Постановлению Правительства РФ от 31.12.2020 г. № 2398-р "Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, и IV категорий", полигон "Красный Бор", на котором захоронены промышленные отходы I—IV классов опасности, является объектом I категории негативного воздействия на окружающую среду (НВОС). Отходы I класса опасности содержатся в специально оборудованных герметичных контейнерах, захороненных на глубине до 7 м в синие глины. Отходы II—IV классов опасности размещены на специальных картах в зависимости от характера (кислотные, щелочные, органические). В общей сложности за годы эксплуатации образовалось до 70 карт, которые содержат ~1,7 млн т отходов [7]. В соответствии с СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03 "Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов" (глава VII п.12.1.1) полигон является объектом I класса опасности, размер нормативной санитарно-защитной зоны (СЗЗ) составляет 1000 м. Ранее, с 1985 по 2019 год, размер СЗЗ составлял 3 км [7].

Полигон "Красный Бор" расположен в 30 км от Петербурга и в 4 км к юго-востоку г. Колпино и занимает площадь 67,4 га. Место размещения полигона было выбрано с учетом природных характеристик территории, обеспечивающих минимизацию экологических рисков. В геоморфологическом отношении территория относится к северо-западной части Русской равнины, современный рельеф которой сформирован последним Валдайским оледенением; в геологическом — расположение полигона приурочено к мощной 70—

110-метровой толще кембрийских глин, являющейся естественным водоупором. Напорный характер подземных вод создает дополнительную их защищенность. Однако сверхнормативная эксплуатация выявила просчеты в выборе участка: в связи с вступлением в силу СНиП 2.01.28-85 "Полигоны по обезвреживанию и захоронению промышленных отходов" оказалось, что полигон расположен выше водозабора Санкт-Петербурга — в 6 км от Невы [7].

Оказывая значительное воздействие на окружающую среду, полигон "Красный Бор" является объектом высокой категории риска для окружающей территории. На основе анализа литературных источников, а также проектной документации [7—9] можно заключить, что полигон существенно воздействует на окружающую среду, что подтверждено интенсивным загрязнением вод и донных отложений каналов полигона и р. Большая Ижорка рядом соединений, в том числе хлорорганическими соединениями, нефтепродуктами, тяжёлыми металлами [9]. По данным исследований 2019 и 2020 гг., на территории СЗЗ [8] и на границе 1-километровой зоны [9] выявили загрязнение почв выше гигиенических нормативов такими веществами, как свинец, мышьяк, бенз(а)пирен, полихлорированные бифенилы. В ходе геоботанических исследований также отмечена трансформация растительного покрова в пределах СЗЗ полигона. Так, одним из наиболее репрезентативных биоиндикаторов загрязнения в регионе исследований является сосна обыкновенная. В тех местах, где фильтрат контактирует с корневыми системами, отмечается угнетенное состояние растительности, срок жизни хвои сокращается до двух лет; при отсутствии следов просачивания возраст хвои составляет более четырех лет [8].

В 2016—2018 гг. на полигоне реализован комплекс неотложных мер по снижению рисков для окружающей среды (особенно в паводковый период), что позволило привести территорию полигона в стабильное безаварийное состояние для дальнейшей выработки комплекса мер в плановом режиме [7, 8]. С апреля 2022 г. на полигоне начали вести масштабные работы по рекультивации земель в рамках федерального проекта "Чистая страна" национального проекта "Экология" [10]. Согласно проекту рекультивации, деятельность по минимизации НВОС включает два этапа: создание битумизированной противодиффузионной завесы вокруг полигона токсичных отходов производства "Красный Бор"; разработку технологического оборудования для переработки содержимого карт и осуществление стандартного проекта рекультивации [8]. Первый этап подразумевает строительство водоупорных гидротехнических сооружений для обеспечения гидроизоляции участка захоронения отходов. Второй этап является основным и включает создание и последующую эксплуатацию технических сооружений по откачке и очистке пастообразных и жидких отходов с тела полигона. Для сопоставления экологических и экономических эффектов от реализации проекта были проанализированы три сценария: нулевой, стандартный и интенсивный. Нулевой вариант, необходимый с точки зрения соответствия требованиям ОВОС, рассматривали также в целях идентификации рисков, которых позволит избежать реализация двух других сценариев.

Анализ предполагаемых результатов **нулевого варианта** закрытия полигона показал, что потенциальные риски обусловлены несоответствием характеристик полигона масштабам негативного воздействия. Так, следствием нулевого варианта будет сохранение превышения ПДК по таким веществам как формальдегид, взвешенные вещества, нефтепродукты, фенолы и ряд других продуктов, вредных для поверхностных и подземных вод. Кроме того, в связи с истощением глинистого основания можно прогнозировать усиление воздействия на геологическую среду и образование техногенного водоносного горизонта в насыпных грунтах. Критическим фактором является расположение полигона в зоне избыточного увлажнения, что влияет на подтопление отдельных участков полигона в период максимального снеготаяния. Также при нулевом варианте закрытия полигона будет продолжена эксплуатация существующих мини-ТЭЦ и котельной, выбросы от которых превышают установленные нормы.

Некоторые решения в рамках нулевого варианта связаны с высокими дополнительными затратами по строительству комплексов по переработке отходов либо новых полигонов и перевозке отходов I и II категорий опасности: при отсутствии перерабатывающих комплексов с достаточной производительностью и соответствующим перечнем перерабатываемых отходов необходим вывоз с территории полигона жидких и пастообразных отходов, ориентировочный объем которых составит 400 м<sup>3</sup>. Нулевой вариант также предусматривает отказ от проектирования рекультивационного покрытия, что не соответствует требованиям нормативно-правовой базы Российской Федерации в области охраны окружающей среды и функционирования полигонов отходов производства и потребления (Постановление Правительства РФ от 10.07.2018 г. № 800 "О проведении рекультивации и консервации земель").

Недостатки нулевого варианта учтены при разработке **стандартного сценария** рекультивации с внедрением эффективной технологической схемы утилизации жидких и пастообразных отходов и комплексом мероприятий по формированию рельефа на полигоне, а также созданием многофункционального рекультивационного покрытия. Для обезвреживания жидких и пастообразных отходов проект предусматривает внедрение технологической схемы, позволяющей очищать воды, поступающие с тела полигона, до предельно допустимых концентраций. Предлагаемый вариант связан со значительными экономическими и энергетическими затратами, однако обеспечивает необходимый уровень защиты окружающей среды от негативного воздействия. Ливневые (поверхностные) стоки объемом порядка 216 тыс. м<sup>3</sup>/год собираются в резервуар-накопитель рабочим объемом 22 тыс. м<sup>3</sup>, состоящий из модульных элементов. После прохождения очистных сооружений ливневые стоки, очищенные до уровня ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения, поступают в магистральный канал и далее в гидрографическую сеть. Также на полигоне запланировано строительство противополиграфических завес (ПФЗ). В результате воздействие на грунтовые воды в период ликвидации НВОС будет минимизировано за счет работы

эшелонированной ПФЗ и возводимых очистных сооружений [8].

Формирование рекультивационного покрытия предусматривает систему дренажей на разных уровнях и сеть лотков для отведения поверхностного стока и фильтрата. Для самотечности стоков и эффективности их сборов формируют определенный угол наклона путем установки армогрунтовой стены высотой до 5 м, что обеспечивает герметичность полигона и максимальную защиту окружающей территории от протечек фильтрата. Для предотвращения просадок и выравнивания территории тело полигона послойно засыпается привозным грунтом. Основными источниками воздействия предприятия на атмосферный воздух будут установки по очистке и литификации концентрата, а также транспорт и котельная, обеспечивающая теплом и электроэнергией рабочий персонал.

Рассмотренный стандартный сценарий рекультивации полигона, несмотря на очевидные экологические преимущества, является примером линейной модели обращения с ресурсами. Качественные изменения, необходимые для оптимизации сферы обращения с отходами, могут произойти только в результате вовлечения в оборот большей части вторичного сырья. В этой связи принципиальное значение приобретает обоснование технологических схем переработки накопленных отходов с получением экологического и экономического эффектов. Одним из возможных вариантов такой схемы, составляющей основу **интенсивного сценария**, может быть рекультивация с возможностью извлечения ценных примесей из нефтешламов. Согласно исследованиям [11, 12], отходы, содержащие разные виды нефтепродуктов, могут подлежать переработке при помощи пиролизной установки для получения ценных компонентов, таких, как бензин, дизель и т. д. Технологические комплексы, в основе которых лежит схема пиролиза, рассматриваются в качестве перспективных для переработки нефтешламов с позиций наилучших доступных технологий (НДТ). В частности, в информационно-техническом справочнике НДТ ИТС 9-2020 "Утилизация и обезвреживание отходов термическими способами" указывается, что объемы отходящих газов, подвергаемых очистке, и твердого остатка при пиролизе меньше, чем при сжигании отходов. При этом твердый остаток можно использовать в промышленности (сажа, активированный уголь и др.).

Особенности работы пиролизной установки, соответствующей требованиям переработки нефтесодержащих отходов для включения их в категорию ресурсов, можно рассмотреть на примере установки по переработке нефтешлама УППН-1.6-2.5-У1 [12]. В процессе работы установки происходит перемешивание нефтешлама и его нагревание до  $t = 580$  °C в пиролизной камере. По прошествии 5—6 ч (в зависимости от качественных характеристик нефтешлама) отработанная зола выгружается через специальный шламоприемок, а охлажденные продукты обработки нефтешлама поступают в ректификационную колонну. Далее в сепараторе происходит разделение на углеводородные газы (метан, бутан, этан, пропан) и бензиновую фракцию, а также выделение дизельной фракции и тяжелого газойля. Углеводородные газы

используют для получения тепловой энергии в топочной камере, формируя систему оборотного газопотребления. Расчеты авторов установки [12] показывают, что при вовлечении в процесс 800 кг нефтешлама на выходе получаются следующие полезные компоненты переработки (при потерях в 5,6 кг): бензиновая фракция (109,6 кг), дизельная фракция (168 кг), тяжелый газойль (128 кг), зола пиролиза (360 кг) и углеводородные газы (28,8 кг). Производительность установки, согласно характеристикам, равна 2,4 т/сутки или 876 т/год. При использовании трех установок ежегодный объем нефти, подлежащей утилизации с регенерацией ценных примесей, составит 2628 т, а для переработки всего объема нефтешламов (34 тыс. т) понадобится около 9 лет. Объем компонентов вторичной переработки за указанный период представлен в таблице.

Объемы компонентов переработки нефтешламов

Сырье и продукты	Доля компонентов, %	Общий объем
Нефтешлам	100	21665000 кг
Бензиновое топливо	15,0	3228 тыс. кг или 4304000 л*
Дизельное топливо	22,1	4891 тыс. кг или 5892771 л**
Тяжелый газойль	17,1	3726,4 тыс. кг или 4266544,5 л***
Зола пиролиза	44,0	9749 тыс. кг
Потери	0,7	151 тыс. кг

\* Перевод тонн в л проводился с учетом плотности бензина 750 кг/м<sup>3</sup>.

\*\* Перевод тонн в л проводился с учетом плотности дизельной фракции 830 кг/м<sup>3</sup>.

\*\*\* Перевод тонн в л проводился с учетом плотности тяжелого газойля 873,4 кг/м<sup>3</sup>.

Соответствие предложенного подхода принципам "замкнутой" экономики определяется принадлежностью большей части полученных компонентов к числу товарных продуктов. Так, зола, полученная в процессе пиролиза, может быть использована при изготовлении асфальтобетонного покрытия (в Ленинградской области это может быть, например, Асфальтобетонный завод № 1). Дизельная и бензиновая фракции также обладают товарной ценностью, но имеют низкое цетановое число (44,6 пункта), поэтому использование дизеля следует рассматривать, в основном, для поддержания процесса горения на установке. Применение данной установки возможно и совместно с передвижной электростанцией, которая способна работать на бензиновой и дизельной фракции. Принимая, что для получения 9,5 кВт·ч электроэнергии необходимо 1 литр топлива в час или 24 л в сутки [13], обеспечение технических работ по рекультивации потребует минимальной мощности передвижной электростанции в 750 кВт·ч или 1894 л суточного потребления дизельного топлива. Тяжелый газойль можно использовать в качестве котельного топлива для выработки пара и горячей воды и покрытия потребностей близлежащих населенных пунктов. Поскольку район исследования является энерго-дефицитным, излишек электроэнергии (особенно в случае использования двух передвиж-

ных электростанций) может быть перенаправлен в местную сеть энергоснабжения населения. Стоимость 1 кВт·ч электроэнергии в сельских населенных пунктах Ленинградской области — 3,43 рубля, включая НДС. При работе двух передвижных электростанций экономический эффект составит до 32928 руб. в день или 12 018 720 руб. в год. В проекте по рекультивации полигона предусмотрено использование дизель-генераторной установки, однако более эффективным представляется вариант с выработкой электроэнергии для снабжения близлежащих населенных пунктов. Ограничением для его реализации является образование загрязняющих веществ, таких, как азота диоксид и оксид, углерод (сажа), серы диоксид (ангидрид сернистый), углерода оксид, керосин. В этой связи необходимо внедрение, например, регенеративных жидкофазных методов очистки газов с получением ценных товарных продуктов (таких, как, удобрения для сельского хозяйства). Таким образом, использование установки, подобной УППН-1.6-2.5-У1, обеспечивает получение ценных примесей из нефтешлама и рационализацию использования отходов. Для обозначения связей между вовлеченными сторонами, вовлеченными в процесс рекультивации полигона на принципах замкнутой экономики, была построена бизнес-модель (рис. 2).

В рамках предложенной бизнес-модели выделяются 3 основных блока: предпосылки разработки предложения; обоснование потенциального спроса на продукцию; структура издержек и доходов.

К первому блоку, включающему перечень ключевых партнеров, ресурсов и видов деятельности в случае реализации проекта закрытия полигона в соответствии с интенсивным сценарием, могут быть отнесены: ГК "Росатом", осуществляющая инженерные работы по разработке проекта рекультивации полигона, и государственные структуры, обеспечивающие реализацию федерального проекта "Чистая страна". Для осуществления технической поддержки проекта к числу таких партнеров могут быть отнесены разработчики технологии переработки нефтешлама с получением вторичных нефтяных фракций (например, УГНТУ) и потенциальный потребитель полученных продуктов переработки (например, асфальтобетонный завод, расположенный, предпочтительно, в Ленинградской обл.), производственные процессы которого допускают переработку золы пиролиза и шин. В результате обеспечиваемых этими партнерами видов деятельности на рынок вторичной продукции будут поставлены топливо, электроэнергия и ресурсы для создания асфальтобетонного покрытия. К ресурсам могут быть отнесены не только финансовые средства, необходимые для осуществления проекта, но также персонал — высококвалифицированные специалисты как в области инженерных работ, так и в смежных отраслях, что позволит минимизировать экологические риски и максимизировать экономическую выгоду. Материальными ресурсами являются установка по переработке нефтешламов, передвижная электростанция и отходы (в том числе нефтешламы и шины), составляющие базу для применения наилучших доступных технологий.

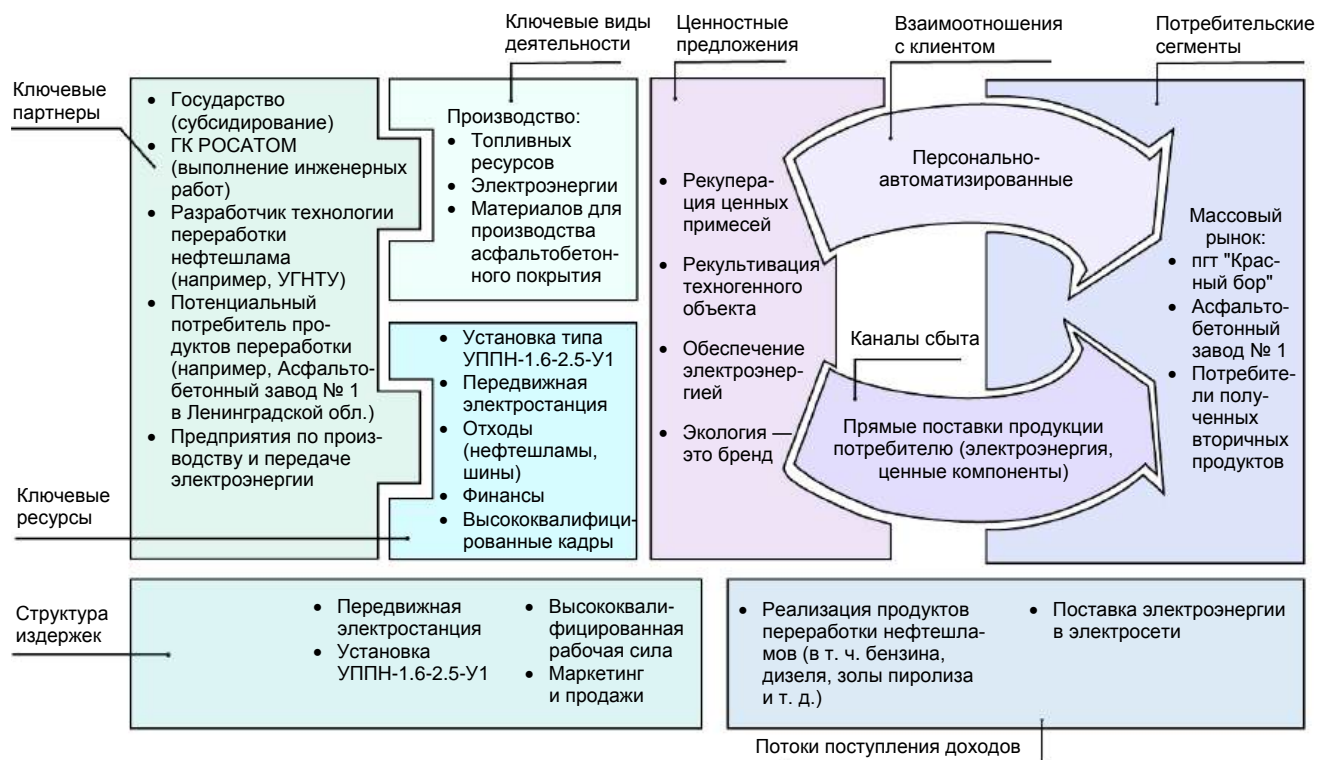


Рис. 2. Бизнес-модель функционирования предприятия «Красный Бор»

Второй блок бизнес-модели объединяет т. н. «ценностные предложения», характер взаимоотношений с клиентами, потенциальные каналы сбыта и потребительские сегменты. В зависимости от различий в сегментах потребителей при выделении ценности предложений могут учитываться не только материальная польза для потребителей, но и снижение нагрузки на экосистемы: с течением времени благоприятная экологическая ситуация воспринимается как своего рода бренд. Реализация интенсивного сценария рекультивации — это не только снижение экологических рисков, но также содействие повышению уровня жизни местного населения. Взаимоотношения с клиентами, согласно [14], в рамках бизнес-модели должны выстраиваться как с компаниями-партнерами, так и с жителями ближайших населенных пунктов, что способствует решению организационных вопросов и обеспечивает оптимальные результаты. Взаимодействие компаний с потребительским сегментом формирует каналы сбыта — точки контакта между потребителем и продавцом, которые способствуют повышению уровня осведомленности и доверия потребителей всех видов продукции. В данном случае это, например, выявление и оценка потребностей населенных пунктов в электроэнергии. Учитывая, что район является энергодефицитным, выстраивание взаимоотношений с клиентами отвечает интересам обеих сторон — и производителя, и потребителей энергии.

Третий блок. Структура издержек и доходов включает идентификацию потоков поступления доходов и оценку доходов и расходов предприятия. Основные потоки доходов от закрытия полигона формируются в результате выработки и поставки электроэнергии, а также производства и поставки потребителям продуктов переработки нефтешламов. С учетом стоимости

1 т отработанного дизельного топлива в 36 руб. минимальный доход от его реализации составит 180 тыс. руб. Поставка электроэнергии в ближайшие населенные пункты может быть также отнесена к статье доходов, т. к. при потребности полигона «Красный Бор» в электроэнергии около 4 тыс. МВт·ч/год годовая выработка электроэнергии на передвижной электростанции может составлять 6570 МВт·ч. Структура издержек — это расходы, которые связаны с прибыльным и бесперебойным функционированием предприятия. Создание и воплощение ценностных предложений, поддержание взаимоотношений с клиентами, получение прибыли — все это связано с издержками [14]. К числу таких издержек относится, в первую очередь, стоимость работ по стандартной рекультивации полигона «Красный Бор», которую «Федеральный экологический оператор» оценивает в 10 млрд руб. Данных для оценки стоимости установки по переработке нефтешламов в открытом доступе нет. Стоимость передвижной электростанции на 750 кВт — около 5 млн руб., также необходимы работы по ее подключению к сети питания. В структуру издержек также входят расходы на обеспечение рабочей силы для поддержания функционирования системы. Таким образом, ключевым элементом эффективности рекультивации объектов накопленного экологического вреда, к числу которых относятся полигоны, содержащие опасные отходы, является внедрение наилучших доступных технологий. Важную роль играет экономический механизм их внедрения, позволяющий снижать налоговую нагрузку на предприятия в случае применения НДТ. Расширение возможностей государственной поддержки такой деятельности будет стимулировать переход к экономике замкнутого цикла.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кудрявцева О. В., Митенкова Е. Н., Солодова М. А. Циркулярная экономика как инструмент устойчивого развития России // Экономическое возрождение России. 2019. № 3(61). С. 115—126.
2. Пахомова Н. В., Рихтер К. К., Ветрова М. А. Переход к циркулярной экономике и замкнутым цепям поставок как фактор устойчивого развития // Вестник Санкт-Петербургского университета. Экономика. 2017. № 2. С. 244—268.
3. Скобелев Д. О., Марьев В. А., Потапов Г. Г., Шубов Л. Я., Доронкина И. Г. Создание экотехнопарков — рациональный путь к развитию отрасли комплексной переработки отходов и использования вторичных ресурсов // Экология промышленного производства. 2018. № 2. С. 7—21.
4. Марьев В. А., Смирнова Т. С., Гузь Л. В., Манкулова Ж. А. Промышленный симбиоз как инструмент устойчивого развития в современном мире // Экология промышленного производства. 2018. № 3. С. 64—68.
5. Государственный доклад "О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2020 году". — М.: Минприроды России, МГУ имени М.В. Ломоносова. 2021. С. 262—274.
6. Отходы производства и потребления. Окружающая среда. Федеральная служба государственной статистики (Росстат) [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (дата обращения: 03.09.2022).
7. Есина Е., Маслова В., Дедик Д. Объект накопленного экологического вреда (полигон токсичных отходов "Красный Бор"). Доклад ЭПЦ "БЕЛЛОНА", АНО содействия охране окружающей среды "Экспертно-правовой центр "ЭкоПраво". — Санкт-Петербург, 2020. — 85 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://network.bellona.org/content/uploads/sites/4/2020/10/KR\\_BOR\\_2020.pdf](https://network.bellona.org/content/uploads/sites/4/2020/10/KR_BOR_2020.pdf) (дата обращения: 12.08.2022).
8. Проектная документация "Оценка воздействия на окружающую среду" / ГТП-14/2020-2-ОВОС.1.1 // Федеральный экологический оператор, 2021.
9. Комбарова М. Ю., Радилов А. С., Алибаева Л. А., Якубова И. Ш., Кудрявцев М. А., Ринчиндоржиев Б. Б., Гуляев Д. В. Оценка влияния утилизации опасных отходов на полигоне "Красный Бор" на окружающую среду // Гигиена и санитария. 2019. Т. 98(11). С. 1216—1221.
10. На полигоне "Красный Бор" начинаются рекультивационные работы. Администрация Санкт-Петербурга. Официальный сайт. 26 апреля 2022 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gov.spb.ru/press/governor/236421/> (дата обращения: 08.11.2022).
11. Гракович В. Ф., Токарев Ю. Н., Мельников В. В. Экологические и технологические аспекты энергетической безопасности России // Экология промышленного производства. 2014. № 4. С. 55—60.
12. Московец А. В., Лапшин И. Г., Гильмутдинов А. Т. Малогабаритная установка по переработке нефтешламов // Нефтегазовое дело. 2015. Т. 13. № 1. С. 101.
13. Курочкин А. К., Тамм Т. Нефтешламы — ресурсное сырье для производства светлых моторных топлив и дорожных битумов // Сфера. Нефть и газ. 2010. № 4. С. 72—81.
14. Остервальдер А., Пинье И. Построение бизнес-моделей: Настольная книга стратега и новатора. — М.: ООО "Альпина Паблишер", 2012. — 66 с.

## Ecological and economic aspects of the "Krasny Bor" landfill closure in the context of a closed-cycle economy

A. A. PAKINA, M. N. CYMBAL, S. D. SHLANDAKOVA  
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

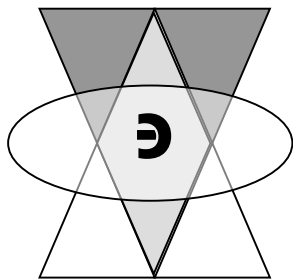
*The article considers the ecological situation in the area of the "Krasny Bor" landfill, the ongoing negative impact on the environment and possible ways to prevent it. According to the results of the assessment of the level of pollution of soil and vegetation cover in the study area, as well as bottom sediments and waters of the Bolshaya Izhorka river, the landfill is classified as an object of the category 1 by negative impact on the environment. The environmental risks are identified and the prospects for their prevention are assessed based on comparison of the environmental and economic effects from possible scenarios of landfill reclamation — zero, standard and intensive. The choice of a technological scheme for processing accumulated waste within the intensive scenario's framework with the possibility of extracting valuable impurities from oil sludge is justified. A business model that reflects the relationships between the parties involved in the reclamation process and the structure of costs and revenues during the transition to the principles of a closed economy is proposed.*

**Keywords:** industrial waste, closed economy, best available technologies, business model.

**Bibliography** — 11 references.

*Received May 4, 2023*





# Экологический контроль. Прогнозирование

УДК 502/504, 004.9  
DOI: 10.52190/2073-2589\_2023\_3\_43  
EDN: OBUJPI

## Региональная система учета и контроля парниковых газов на основе геоинформационных технологий на карбоновом полигоне ЧГУ им. А. А. Кадырова

**Н. М. БУЛАЕВА**, д-р техн. наук; **Р. Х. БЕКМУРЗАЕВА**, канд. эконом. наук;  
**А. С. ГАДЖИХАНОВ**

ФГБОУ ВО «Чеченский государственный университет им. А. А. Кадырова»,  
г. Грозный, Чеченская республика, Россия

*Представлены результаты исследований по проведению мониторинга парниковых газов на участках карбонового полигона ЧГУ им. Кадырова и созданию модуля геоинформационной системы как основы для учета и контроля индикаторов мониторинга во времени и пространстве.*

**Ключевые слова:** парниковые газы, мониторинг, геоинформационные системы и технологии, карбоновый полигон.

Основным вызовом нашего времени является изменение климата. В изменение климата большой вклад вносит увеличение климатически активных газов. От вида деятельности человека зависит увеличение и сокращение объемов парниковых газов.

Цель исследования — создание системы учета и контроля парниковых газов на основе геоинформационных технологий. В исследованиях, рассмотрены и предложены решения задач по таким областям, как:

- мониторинг видового состава растительности (эдификаторов) с использованием беспилотных летательных аппаратов;
- проведение исследований на основе наземных и дистанционных методов мониторинга;
- оценка объема биомассы пастбищных участков;
- оценка качества биомассы (объема пригодной для потребления биомассы и вредных для животных растений);

**Булаева Нуржиган Маисовна**, ведущий научный сотрудник.

E-mail: bulaevanurjagan@yandex.ru

**Бекмурзаева Рашия Хамзатовна**, ведущий научный сотрудник.

E-mail: raya.bek@mail.ru

**Гаджиханов Амаль Севзиханович**, младший научный сотрудник.

E-mail: g.amal@mail.ru

Статья поступила в редакцию 29 мая 2023 г.

© Булаева Н. М., Бекмурзаева Р. Х., Гаджиханов А. С., 2023

- оценка объема потребления биомассы животными;

- создание карты оборота пастбищных участков.

Региональная система учета и контроля парниковых газов Чеченской республики (РС УиКПГ ЧР) создана на основе геоинформационных технологий на платформе GemGIS.

Предлагаемый сервис позволит выполнить первоначальное планирование пастбищ и сенокосов, планирование расположения водоемов, оград, маршрутов техники, оценку состояния пастбищ (объема биомассы, состава растений, состояния почв), прогнозирование количества биомассы и кормов на участках, подсчет скота на участках, мониторинг его распределения с помощью БЛА.

Улучшение почвенных экосистем ведет к повышению эффективности использования сельскохозяйственных земель. Это позволит повысить рентабельность хозяйств за счет рационального подхода при решении народно-хозяйственных задач [1, 2].

### Основная часть

Рассмотрим одну из актуальных задач, это контроль и учет климатически активных газов на примере карбонового полигона ЧГУ им. А. А. Кадырова.

При исследованиях применяли методы: географический, биологический и геоинформационно-картографический.

Сбор данных осуществлялся в результате полевых, камеральных и дистанционных наблюдений:

- рекогносцировка местности, отбор проб почв, подземной и надземной фитомассы, эмиссии парниковых газов,
- обработка полученной информации и занесением в базу данных,
- получение информации с метеостанций, БЛА и вышки Eddy Covariance, оснащенной измерительным оборудованием для определения потоков климатически опасных газов.

На высоте от 1500 до 2000 м.н. у.м. на склоне Чеберлойской котловины Веденского района находятся пастбищные участки карбонового полигона ЧГУ им. А. А. Кадырова. География ландшафтной структуры котловины разнообразна. Тут присутствуют пять типов и одиннадцать групп ландшафтов. Горные склоны Чеберлойской котловины характерны ярко выраженными террасами. Горно-луговые, субальпийские ландшафты занимают наиболее верхние этажи террас. Под воздействием фактором среды обитания и постоянного выпаса животных привел к разрушению экосистемы и изменению разнотравно-злаковых сообществ. Труднодоступные участки, крутые склоны и ущелья представлены горно-лесными ландшафтами, которые включают в себя три группы. Проведенные наблюдения показали, что за последние 20 лет участки начинают активно зарастать сосной и березой и это результат снижения интенсивности выпаса. Доминирующий тип почв — горно-луговые черноземовидные на карбонатных породах.

Проведенный химический анализ почвы на исследуемых участках показал, что pH колеблется от 6,33 до 8,05. Можно сделать вывод, что на данных участках почвы нейтральные и слабощелочные, что является оптимальным диапазоном для большинства растений (таблица).

Площадь участка, отведенного под регенеративное животноводство, составляет 1054 га. На террасах склона северной экспозиции были выбраны исследовательские площадки: эталонный участок, умеренный и интенсивный выпас, загон, участки для высадки травосмесей (рис. 1). На основании мобильного приложения "Smart Protractor" установлена крутизна склона исследуемых участков горно-луговых экосистем, она составила от 0,5 до 10°.



Рис. 1. Участки под регенеративное животноводство

#### Химический анализ почвы на пастбищных участках

Y	X	ID	pH
42,74408	46,12963	IN-1	6,86
42,74408	46,12962	IN-2	7,11
42,74404	46,12961	IN-3	7,32
42,74399	46,12963	IN-4	6,56
42,7439	46,12961	IN-5	6,49
42,74386	46,12981	IN-6	6,89
42,74395	46,1298	IN-7	7,25
42,74412	46,12986	IN-9	7,33
42,7442	46,12985	IN-10	6,33
42,7438	46,12331	UMR-1	6,8
42,74377	46,12326	UMR-2	7,15
42,74375	46,12324	UMR-3	7,83
42,74372	46,12319	UMR-4	7,86
42,74367	46,12315	UMR-5	7,88
42,74365	46,12302	UMR-6	7,58
42,7436	46,12301	UMR-7	7,38
42,7436	46,12286	UMR-8	7,61
42,74354	46,12269	UMR-9	6,74
42,74024	46,10932	ET-1	8,02
42,7403	46,10937	ET -2	8,05
42,74039	46,10945	ET -3	7,98
42,7405	46,10947	ET -4	7,86
42,74057	46,10955	ET -5	7,83
42,74065	46,10958	ET -6	7,89
42,74071	46,10966	ET -7	7,74
42,74067	46,10973	ET -8	7,86
42,7406	46,1098	ET -9	7,85
2,74056	46,10984	ET -10	7,79

Примечание. X, Y — координаты; IN, UMR, ET — интенсивный, умеренный выпас, эталонный участок соответственно.

Для мониторинга и учета выброса парниковых газов на основе ГИС-технологий рассматривались вопросы комплексного анализа индикаторов мониторинга предметной области для формирования алгоритма и определения наиболее оптимальных путей решения задачи формирования базы данных актуальных параметров карбонового полигона ЧР [3—5].

Разработано и предложено построение многоуровневой структуры базы данных в формате модуля геоинформационной системы: проектирование и разработка основных ее компонентов, различных узлов и уровней системы, позволяющих обеспечить сопровождение мониторинга как аналитического модуля системы (рис. 2).



Рис. 2. Модуль геоинформационной системы учета и контроля парниковых газов карбонового полигона ЧР (РС УиК ПГ ЧР)

Изучая углеродный след и состояние парниковых газов на участках карбонового полигона ЧГУ, авторы подошли к созданию универсальной информационно-аналитической системы мониторингования и формирования базы данных агропромышленного комплекса [6, 7].

Основной задачей мониторингования и оценки земель горных и предгорных территорий ЧР является комплексная оценка потенциала и эффективности развития этих территорий (рис. 3).

Разработанная система анализа данных модуля "Учет и контроль выбросов парниковых газов" по полученным данным о выбросах парниковых газов на карбоновых полигонах позволит с помощью статистических методов провести оценку результатов анализа этих данных, сравнение с предыдущими данными [8—11].

Форма анализа мониторинговых данных позволяет получить информацию об объеме мониторинговых

данных в разрезе различных объектов, периодов, видов мониторинга (рис. 4).

Разработан картографический модуль по отображению объектов мониторинга на различных общедоступных в сети Интернет картах. В данное время — это сервисы Яндекс (Яндекс-карты), Google (карты Google), OpenStreetMap, Microsoft (карты virtual earth).

Для автоматизированного расчета значений одних параметров на основе значений других параметров предназначен модуль калькуляции, выполненный в виде отдельного исполняемого модуля.

Результатом применения правил калькуляции являются данные мониторинга. Они заносятся в БД в соответствующие объекты и периоды.

Формула калькуляции представляет собой математическое выражение с использованием исходных параметров в качестве переменных, функций калькуляции и простых математических действий (рис. 5).

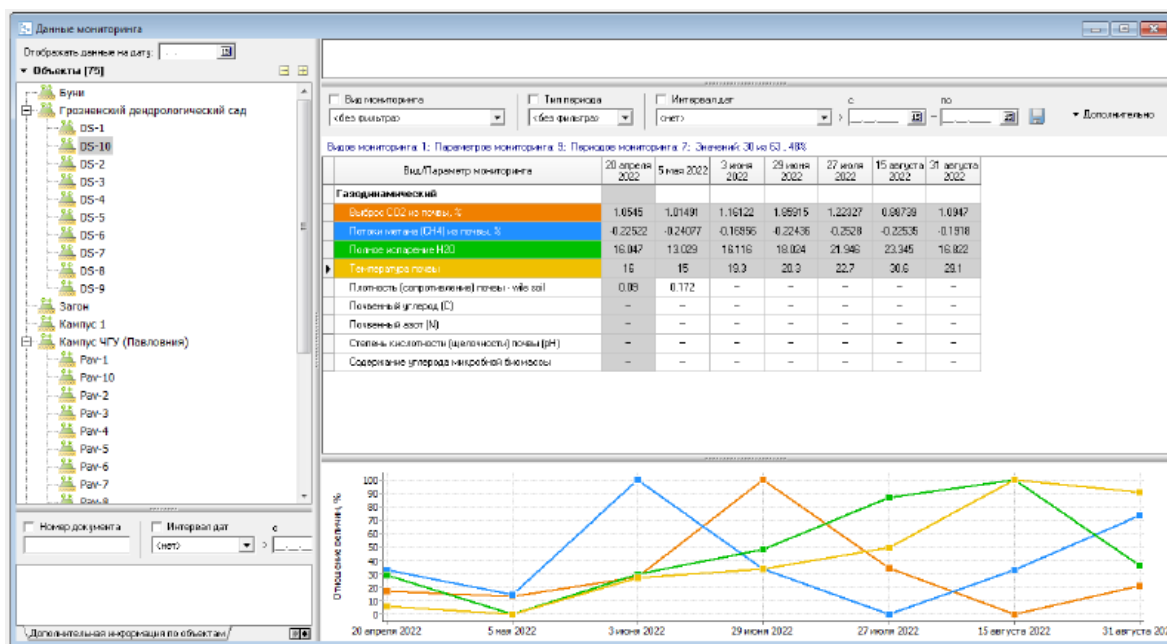


Рис. 3. Форма мониторинговых данных

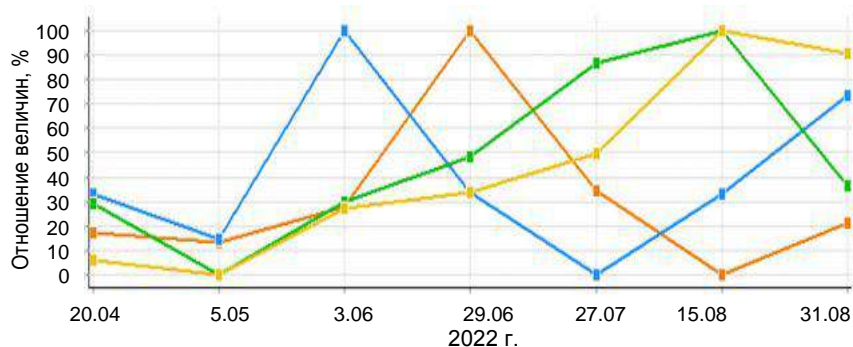


Рис. 4. График соотношения величин мониторинговых значений:

- 1 — выброс CO<sub>2</sub> из почвы;
- 2 — потоки метана CH<sub>4</sub> из почвы;
- 3 — полное испарение H<sub>2</sub>O;
- 4 — температура почвы

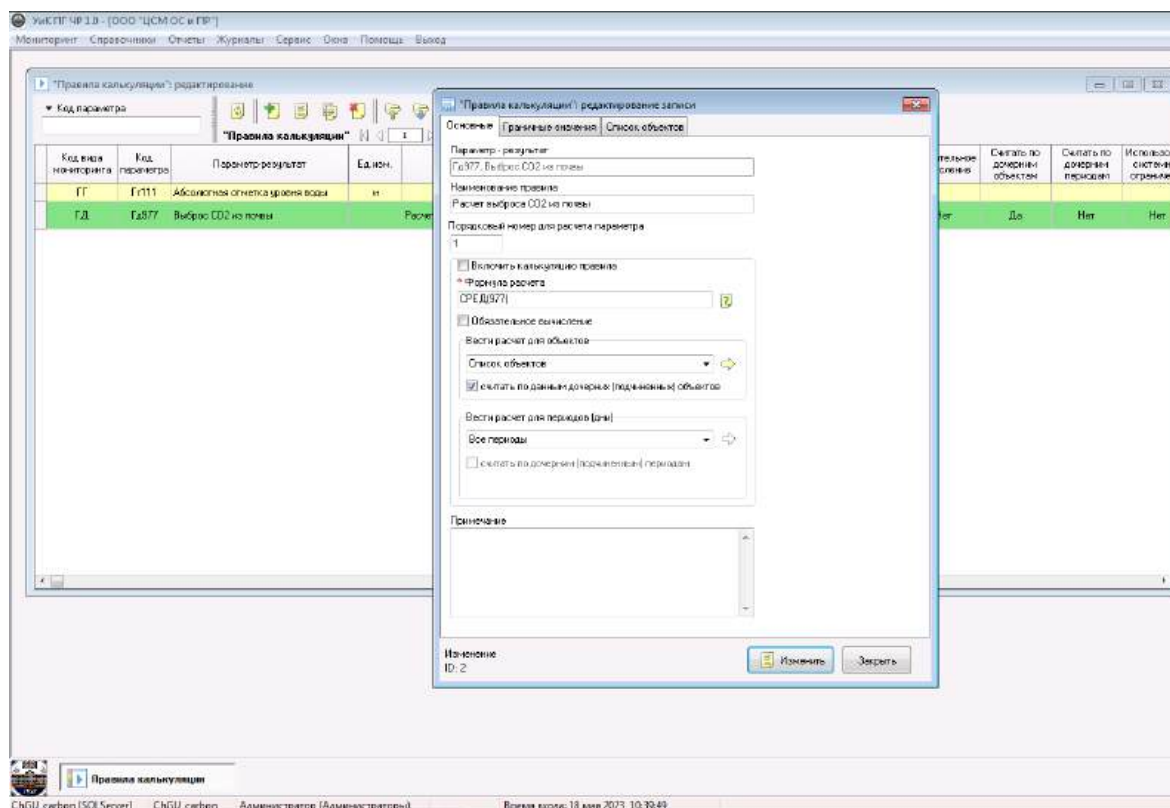


Рис. 5. Форма запуска калькуляции мониторинговых данных

Значительная часть данных получается на основе комплексного мониторинга, в том числе и методов дистанционного зондирования.

### Заключение

Создан модуль геоинформационной системы как основы для учета и контроля индикаторов мониторинга парниковых газов во времени и пространстве.

Представленная Информационная система мониторинга для учета и контроля парниковых газов может служить каталогизированной системой, включающей в себя на основе данных федеральных служб (прежде всего по земельному кадастру в РФ) подробное описание сельскохозяйственных объектов, а именно: название/владелец, профиль использования сельхозугодий, объекты переработки сельхозпродукции, парк сельхозтехники, объекты животноводства, поголовье скота (какого/сколько), качественная оценка состава почв, выращиваемые культуры. Одной из

целей устойчивого развития является поддержание сельского хозяйства для обеспечения здорового образа жизни. Достижение этих целей приведет страну на более устойчивый путь развития.

*Работа выполнена в рамках реализации государственного задания FECS-2023-0008 при поддержке Минобрнауки РФ.*

### ЛИТЕРАТУРА

- Бекмурзаева Р. Х., Гаджиханов А. С. Региональная система учета и контроля парниковых газов на карбоновом полигоне Чеченского государственного университета им. А. А. Кадырова // Мониторинг. Наука и технологии. 2022. № 4. С. 50—56.
- Епихина А. С., Визирская М. М., Васенев В. И., Мазиров И. М., Васенев И. И., Риккардо Валентини. Инновационные методы мониторинга парниковых газов представительных ландшафтов мегаполиса // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агрономия и животноводство. 2012. № S5. С. 43—54.

3. Булаева Н. М., Гайрабеков И. Г., Керимов И. А., Минцаев М. Ш., Эзирбаев Т. Б. Разработка геоинформационных технологий комплексного мониторинга природных ресурсов Чеченской Республики // Мониторинг. Наука и технологии. 2020. № 4. С. 48—55.
4. Булаева Н. М. Информационно-аналитическая система комплексного экологического мониторинга // Мониторинг. Наука и технологии. 2015. № 4. С. 45—56.
5. Булаева Н. М., Филенко А. Д., Магомедов Б. И., Магомед-мирзоев Э. М. Информационная система геоэкологического мониторинга Республики Дагестан // Геоинформатика. 2007. № 2. С. 4—10.
6. Дадашев М. Н., Булаева Н. М., Гаджиханов А. С. Геоинформационные технологии в системе сопряженного мониторинга окружающей среды // Экология промышленного производства. 2018. № 4. С. 53—55.
7. Булаева Н. М., Каплунов Ю. В., Глоба Е. Ю. Разработка и формирование единого информационного пространства экологического мониторинга — системы территориально-опережающего

развития на примере угольной отрасли // Мониторинг. Наука и технологии. 2014. № 2. С. 71—81.

8. Булаева Н. М., Мусалов Ш. М. Модуль синхронизации мониторинговых данных в информационной системе "GEM GIS" // Мониторинг. Наука и технологии. 2017. № 1. С. 38—45.

9. Каплунов Ю. В., Лиманский А. В., Булаева Н. М. Разработка методической основы формирования актуальной базы данных экологического мониторинга среды ликвидируемых шахт угольных регионов России // Мониторинг. Наука и технологии. 2010. № 4. С. 6—18.

10. Булаева Н. М., Дадашев М. Н., Григорьев Е. Б. Сопряженный мониторинг теплового поля Земли для исследования геотермальных энергоресурсов Дагестана // Вести газовой науки. 2019. № 1(38). С. 107—115.

11. Булаева Н. М., Пономарев В. С. Разработка системы комплексного экологического мониторинга Республики Хакасия с применением ГИС-технологий // Мониторинг. Наука и технологии. 2015. № 1. С. 35—43.

## Regional system of accounting and control of greenhouse gases based on geoinformation technologies at the carbon landfill of the A. A. Kadyrov Chechen State University

N. M. BULAEVA, R. H. BEKMURZAYEVA, A. S. GADZHIKHANOV

Chechen State University named after A. A. Kadyrov, Grozny, Chechen Republic, Russia

*The article presents the results of research on the monitoring of greenhouse gases at the sites of the carbon landfill of the ChSU im. Kadyrov and the creation of a geoinformation system module as a basis for accounting and monitoring monitoring indicators in time and space.*

**Keywords:** greenhouse gases, monitoring, geoinformation systems and technologies, carbon landfill.

**Bibliography** — 11 references.

*Received May 29, 2023*

УДК 504.3:006.354; 66 (075.8)  
DOI: 10.52190/2073-2589\_2023\_3\_48  
EDN: OBUONM

## Теория и практика экологического мониторинга промышленных предприятий. Современный взгляд

В. В. ДЕМИДЮК, канд. хим. наук

ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт органической химии и технологии» ГНЦ РФ, Москва, Россия

*Проведены специальные исследования и разработаны способы отбора репрезентативных проб воздуха при мониторинге (контроле) безопасности окружающей среды для людей, проживающих на селитебных территориях, прилегающих к промышленным предприятиям. Исследовано поведение воздушных потоков в воздуховодах больших диаметров. Установлено, что движение потоков в трубах не является линейным. Причем потоки вращаются в северном полушарии по часовой стрелке. На основании литературных данных предполагается, что в южном полушарии воздушные потоки вращаются против часовой стрелки. Предложено использовать открытое поведение (состояние) воздушных потоков в воздуховодах. Это открытие позволило разработать системы отбора газовых проб для последующего их анализа в стационарных лабораториях и представило возможность подключения приборов непрерывного автоматического приборного контроля выбросов, в том числе предельно допустимых выбросов (ПДВ) опасных веществ. Способ внедрен (с 2002 г. по 2017 г.) на всех семи объектах по уничтожению запасов химического оружия Российской Федерации. Анализ отобранных проб позволил контролировать состояние окружающей природной среды на территориях расположения объектов.*

**Ключевые слова:** воздуховод, воздушные выбросы, воздушный поток, газоход, контроль состояния окружающей природной среды, предельно допустимый выброс, трубка Пито.

Экологический мониторинг промышленных предприятий является основой оценки их воздействия на окружающую природную среду территорий, на которых они расположены. Экологический мониторинг промышленных предприятий, включая предприятия химической промышленности, ТЭЦ и др., является необходимой и весьма трудной задачей.

Санитарные правила СП 2.2.1.2513-09 в п. 3.3. требуют "До начала эксплуатации объектов и в период основной производственной деятельности ... необходимо иметь утвержденную программу производственного контроля за соблюдением санитарных правил в соответствии с СП 1.1.1058-01" [1, 2].

При разработке проектной документации производств всё должно быть направлено на создание безопасного производства, которое не должно влиять на состояние окружающей среды региона его будущего размещения [3, 4].

Это достигается при разработке исходных данных для проектирования и создания систем производственного контроля безопасности путем внедрения научных, инженерных и других решений, позволяющих максимально минимизировать опасность [5].

В проектной документации должны быть предусмотрены все мероприятия, связанные с контролем выбросов производства.

Контроль выбросов производства включает два направления:

- анализ проб, отобранных непосредственно из воздуховодов по согласованному графику, включающий:

- периодический отбор пробы непосредственно из воздуховода,
- анализ отобранной пробы в стационарной лаборатории производства;

- непрерывный автоматический приборный контроль предельно допустимого выброса.

Анализ проб, проводимый в стационарных лабораториях по разработанным сертифицированным методикам, как правило, не вызывает затруднений.

Отбор проб из воздуховодов (труб больших диаметров) представляет значительные трудности.

---

Демидюк Валерий Васильевич, главный научный сотрудник.  
E-mail: dir@gosniiookht.ru

Статья поступила в редакцию 28 февраля 2023 г.

© Демидюк В. В., 2023



Известно, что в различных курсах "Процессов и аппаратов" для контроля параметров потоков и отбора проб из воздухопроводов рекомендуют применять трубки Пито — прибор для измерения полного напора текущей жидкости (суспензии) или газа. Трубка названа по имени её изобретателя (1732 г.) французского инженера-гидравлика Анри Пито.

Для отбора проб из трубопроводов (воздуховодов) рекомендуют применять трубки Пито, устанавливаемые по оси потока [6—9].

Исследования на моделях вентиляционных труб диаметром более 1 м показали, что воздушный поток по осевому сечению отсутствует.

Для контроля организованных воздушных (вентиляционных) выбросов особо опасных производств был обоснован (в том числе и при наличии систем очистки выбрасываемого воздуха) непрерывный автоматический контроль стационарными приборами на уровне ПДК воздуха рабочей зоны.

Кроме того, оказалось, что отбирать пробы из воздухопроводов, имеющих линейные скорости газовых (воздушных) потоков более 15 м/с, существующими средствами невозможно (невозможно даже при 10 м/с).

Применяемые поглотительные устройства, как правило, способны поглощать загрязнители при линейных скоростях газо-воздушного потока не более 2 м/с [10—12].

Экспериментальными исследованиями установлено, что в воздухопроводах отсутствуют линейные потоки воздуха. Воздушные потоки в воздухопроводах вращаются по часовой стрелке. Причем в перпендикулярном сечении воздухопровода плотность (количество) воздуха распределено неравномерно. Вблизи центра воздухопровода воздушный поток отсутствует (или почти отсутствует при малых диаметрах воздухопроводов). Определять скорости воздушного потока (и отбирать пробы) в воздухопроводе можно только на уровнях определенного заглубления. Причем необходима определенная конфигурация воздухозаборного зонда.

Экспериментально были уточнены уровни заглубления зондов. Отработан способ установки зонда в воздухопроводе: косым сечением перпендикулярно навстречу потоку воздуха.

Разработанная конструкция была предложена вместо монтажа байпасных линий для традиционного отбора проб из воздухопроводов, имеющих скорости газового потока более 2 м/с. Причем для каждого конкретного воздухопровода рассчитывается заглубление зонда и его конфигурация.

### Результаты и обсуждение

Экологический мониторинг базируется на контроле организованных выбросов промышленных предприятий (включая предприятия химической промышленности) и является необходимой и весьма трудной задачей. Это связано с тем, что большинство организованных источников промышленных выбросов имеют большую высоту (сто и более метров) и большие скорости газообразных потоков в источниках выброса.

Кроме того, ряд источников выбрасывает горячие газы.

В ФГУП "ГосНИИОХТ" было проведено исследование, посвященное разработке способа отбора проб из воздухопроводов (организованных источников выбросов промышленных загрязнителей).

Модельная установка состояла из газохода (трубы диаметром от 0,6 до 1,0 м и длиной 6 и более метров), нагнетательного центробежного вентилятора, создающего максимальную линейную скорость воздушного потока в трубе до 15 м/сек (задвижка обеспечивала регулирование скорости потока от 5 до 15 м/сек). На входе в трубу размещали форсунку, через которую в газоход вводили определяемые вещества. В середине газохода монтировали перпендикулярный подвижный (передвижной) пробоотборный зонд, через который отбирали пробы анализируемого вещества. Зонд устанавливали таким образом, что через него можно было отбирать пробы по всему сечению газохода перпендикулярно его осевой линии.

Пробоотборный зонд, смонтированный как трубка Пито, установленный на глубине осевой линии газохода, не привел к обнаружению вводимого загрязнителя ни в одном из испытанных газоходов.

Перемещение зонда перпендикулярно оси сечения газохода позволяло обнаружить загрязнитель в некоторых точках сечения газохода.

Многолетними исследованиями установлено, что суммарный воздушный поток в воздухопроводах движется (поступательно) линейно, в то же время он вращается по часовой стрелке.

Направление вращения воздушных потоков на Земле было установлено в исследованиях образования вихрей, циклонов, торнадо, смерчей, тайфунов [13].

Воздушные потоки в северном полушарии Земли вращаются по часовой стрелке, а в южном — против часовой стрелки. Вихрем называют движение жидкости или газа, при котором их малые элементы (частицы) перемещаются не только поступательно, но и вращаются около некоторой мгновенной оси.

Изучая сечение цилиндрического воздухопровода, перпендикулярное цилиндрической поверхности, имеем набор кругов, равных примерно половине диаметра воздухопровода. Они являются (ОТПЕЧАТКАМИ) следами вращающегося воздушного потока, который, помимо вращения в воздухопроводе, вращается еще и вокруг своей оси. При вращении частицы пыли (либо загрязняющих веществ, имеющих массу) стремятся приблизиться к наружному диаметру вращающегося потока.

Исследования показали, что в сечении газохода большого диаметра количество вещества, введенное в газоход, определяется только в четырех точках (потоках), показанных на схеме (рис. 1).

Долгое время было непонятно, почему вещества определяются в четырех точках, а не в двух. Наблюдения поведения воздушных потоков в газоходах больших диаметров (значительно больше 1 м) дали ответ на этот вопрос.

Исследования показали, что в сечении газохода большого диаметра количество вещества, введенное в газоход, определяется только в четырех точках (потоках), показанных на схеме (рис. 1).

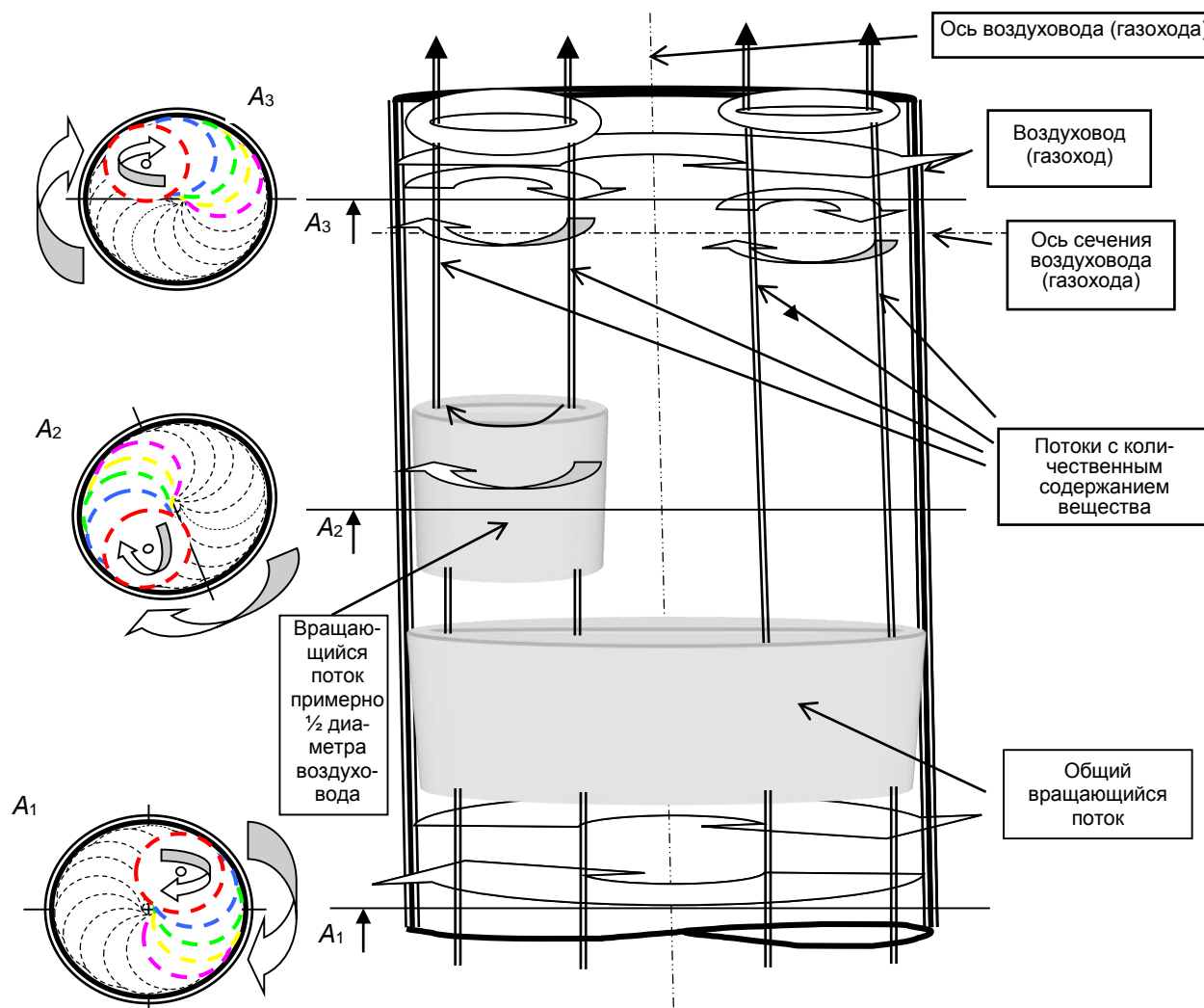


Рис. 1. Схема движения воздушных потоков в трубах больших диаметров

Оказалось, что воздушные потоки в газоходах вращаются как единый поток, в котором образуются вращающиеся потоки меньшего диаметра, чем половина диаметра газохода (т. е. сравнимы с радиусом газохода). Причем все эти потоки вращаются в северном полушарии по часовой стрелке.

Вихревое движение характерно для всех воздуховодов.

В воздуховодах малых диаметров (до 300 мм) возникает один наблюдаемый вихревой поток (рис. 2).

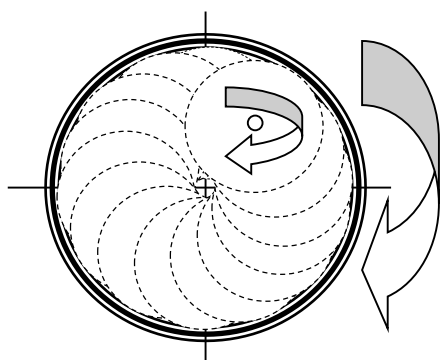


Рис. 2. Схема вращения воздуха в цилиндрическом воздуховоде с одним вихревым потоком

Очевидно, в газоходах малого диаметра плотность газовых потоков такова, что удается фиксировать только суммарное вращение всего потока в газоходе в целом. В таких воздуховодах наблюдают две точки, в которых определяются загрязнители (любые частицы, имеющие массу).

В результате частицы загрязнителя (пыли и проч.), имеющие массу, концентрируются на некотором удалении от стенок цилиндрического воздуховода и совсем отсутствуют по его оси.

Образование двух вихревых потоков (диаметром, равным примерно  $\frac{1}{2}$  диаметра воздуховода), включенных внутрь большого вихревого потока, можно наблюдать только в газоходах диаметром больше 300 мм.

В результате частицы загрязнителя, имеющие массу, концентрируются на некотором удалении от условных стенок цилиндров каждого вихревого потока, вращающегося внутри общего вихревого потока.

Правильность исследований (наблюдений) подтверждена при проведении контроля вентиляционных систем службами вентиляции.

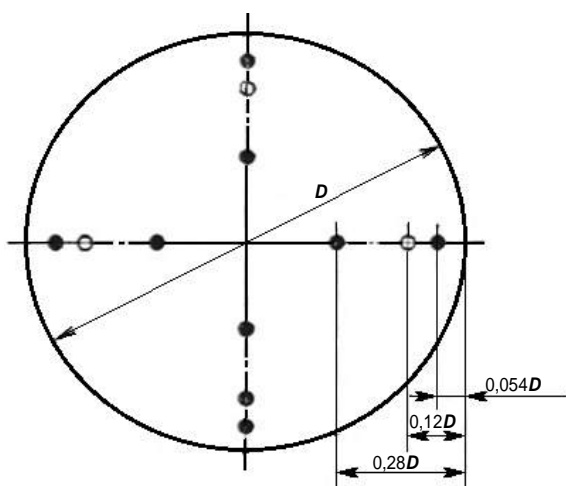
Это явление используют в ГОСТ 12.3.018-79 и в других нормативных документах [14—18]. В ГОСТе приведены координаты точек измерения воздушных потоков при измерении давления и скоростей движения воздуха в воздуховодах.

Координаты точек мерного сечения выражаются в так называемом гидравлическом диаметре ( $D_h$ ), определяемом по формуле:

$$D_h = 4F/\Pi,$$

где  $D_h$  — гидравлический диаметр, м;  
 $F$  — площадь сечения воздуховода,  $\text{м}^2$   
 $(F = \pi \cdot d^2/4 = 0,785 \cdot d^2)$ ;  
 $\Pi$  — периметр сечения, м.

Для измерения давления и скорости движения воздуха в воздуховодах (каналах, газоходах) должны быть выбраны участки с расположением мерных сечений на расстояниях не менее шести гидравлических диаметров  $D_h$ , м за местом возмущения потока (отводы, шиберы, и т. п.) и не менее двух гидравлических диаметров перед ним.



**Рис. 3. Координаты точек измерения давления и скорости в воздуховодах цилиндрического сечения (по ГОСТ 12.3.018-79):**

○ — при  $100 \text{ мм} \leq D \leq 300 \text{ мм}$ ; ● — при  $D > 300 \text{ мм}$   
 $(D$  — диаметр воздуховода. ГОСТ распространяется только на воздуховоды диаметром больше 100 мм (примечание автора))

Коэффициенты, найденные на ФГУП "ГосНИИОХТ", отличаются от значений, приведенных в ГОСТе, это связано с тем, что по ГОСТу определяют скорость воздушного потока и его давление во всем потоке, а автор определял вещества (пыль и проч.), которые имеют массу, поэтому центробежная сила при вращении вещества относит его к условным стенкам газового потока.

Характерно то, что для воздуховодов диаметром менее 300 мм наблюдают только две точки в диаметральном сечении, тогда как для газоходов диаметром более 300 мм измерения целесообразно проводить в четырех точках. Эти данные приведены в ГОСТ для контроля скорости воздушного потока и его давления. Они были подтверждены на ФГУП "ГосНИИОХТ" и установлены коэффициенты для определения количества загрязнителей, находящихся в организованном выбросе.

Так, для воздуховодов диаметром до 300 мм имели коэффициент, установленный экспериментально: 0,10 (вместо 0,12 по ГОСТ).

Для воздуховодов диаметром больше 300 мм — 0,052 (вместо 0,054) и 0,26 (вместо 0,28). Для удобства монтажа пробоотборных стационарных зондов и

отбора проб из них были выбраны расстояния, приближенные к наружным стенкам газоходов (труб). Максимальное отклонение координат точек измерений не должно превышать  $\pm 10\%$ . Количество измерений в каждой точке должно быть не менее трех.

Более того, были разработаны специальные зонды, которые, благодаря косому сечению, перекрывали координаты найденных точек для отбора проб опасных веществ, присутствующих в воздуховодах, и точек, приведенных в ГОСТе для определения скорости воздушного потока и его давления.

Данные, полученные в исследованиях, были использованы при создании систем производственного контроля безопасности на объектах по уничтожению химического оружия. Вначале при разработке исходных данных, а затем по факту монтажа для контроля организованных источников выбросов [19, 20].

Применение полученных результатов позволило надежно контролировать организованные выбросы объектов по уничтожению химического оружия.

На основе обнаруженного эффекта (полученных новых знаний) разработан способ отбора газозо-воздушных проб из воздуховодов и способ подключения приборов автоматического непрерывного контроля предельно допустимого выброса.

Способ позволил выполнить требования санитарных правил СП 2.2.1.2513-09 [1, 2] по организации проведения производственного контроля безопасности. Он был применен при создании систем производственного контроля безопасности на всех объектах по уничтожению химического оружия.

В частности, на объекте "Горный" было установлено 184 врезки зондов в воздуховоды, с помощью которых по графикам отбирали пробы для контроля чистоты организованных выбросов из помещений 1-й и 2-й групп опасности, и были установлены приборы автоматического непрерывного контроля вентиляционных выбросов (в том числе ПДВ).

Например, при уничтожении иприта с 19.12.2002 г. по 25.11.2003 г., кроме непрерывного автоматического контроля, было отобрано и проанализировано 3845 проб, отобранных по согласованному графику, которые подтвердили отсутствие опасных загрязнителей в организованных выбросах объекта. При контроле воздуховодов отбирали примерно 350 проб в месяц, 11 проб в день [20].

Процессы, происходящие в воздуховодах, подобны природным вихрям. Линейная скорость прохождения газов в воздуховодах не менее 15–20 м/с (54–72 км/ч), скорость распространения природных вихрей на уровне бурь (17,2–20,7 м/с, 61,92–74,52 км/ч) (по шкале Бофорта) [21].

Важно отметить тот факт, что природные атмосферные вихри вращаются в свободной зоне, т.е. вращаясь, они поднимаются вверх, так как давление с высотой уменьшается. Это приводит к вихревой воронке, внутри которой образуется вакуумное пространство (разряжение). С высотой ширина воронки увеличивается и вакуум в ней падает. Вихрь пронесется над землей, постепенно расширяясь, теряя энергию и скорость вращения. Очевидно поэтому всё поднятое вакуумом (песок, вещи и т. п.), выпадает на землю там, где вихревое вращение прекращается.

Скорость распространения вихрей (ураганов) достигает 32,7 м/с и более (117,3 км/ч и более). Минимальным вихревым явлением на поверхности Земли по шкале Ф. Бофорта (1806 г.) является сильный ветер — буря, имеющая скорость ветра 17,2—20,7 м/с (61,92—74,52 км/ч). Ветер ломает сучья деревьев, идти против ветра очень трудно.

Максимальное явление "Жесткий шторм" (жесткая буря) имеет скорость ветра 28,5—32,6 м/с (102,6—117,3 км/ч). Большие разрушения на значительном пространстве. На суше наблюдается очень редко.

Диаметр вихрей в атмосфере достигает 500—1000 км и высоты 1—12 км.

Вращающийся газовый поток вырывается из организованного источника (вентиляционной трубы), как вихрь. Он напоминает туго сплетенную косу, состоящую из множества косичек малого диаметра, вращающихся в большом потоке, объединяющем их в большую прочную косу, называемую факелом. В этом потоке (факеле) загрязнители несутся (уносятся) далеко от выбрасывающей их трубы благодаря плотно скрученной косе (рис. 4).



Рис. 4. Вращающиеся потоки, выбрасываемые из воздуховода (газохода) ТЭЦ

Экспериментально установлено то, что загрязнители выпадают из вихревого потока на расстоянии от источника выбросов, равном примерно 100 высотам источника загрязнения (данные не публиковались).

На рис. 5 представлен вид факела от организованного источника выброса труб ТЭЦ — 250 м.



Рис. 5. Рассеивание загрязнителей от стационарного источника (факел от организованного источника выброса труб ТЭЦ — 250 м. Зона выпадения загрязнителей 25 км)

Уничтожение запасов химического оружия Российской Федерации проводилось на семи объектах и завершено в 2017 г. Ни один объект не внес изменений в состояние окружающей природной среды на территориях расположения самых опасных промышленных предприятий (объектов) [20, 22].

### Заключение

Приведено исследование поведения газозвухных потоков в воздуховодах промышленных предприятий, являющихся источниками загрязнения окружающей природной среды на территории их расположения.

Целью исследования была разработка способа контроля выбросов из любых организованных промышленных источников, включая разработку методологии отбора проб.

В исследовании были получены новые знания (зафиксирован неизвестный ранее эффект) по поведению газозвухных смесей в воздуховодах различного диаметра.

Открытие позволило сформировать современный подход и принципы создания экологически безопасных производств химической промышленности. На основании (на примере) опыта проектирования, строительства и эксплуатации наиболее опасных объектов по уничтожению химического оружия были созданы эффективные системы контроля выбросов промышленных предприятий.

Благодаря разработанному способу контроля вентиляционных выбросов, при создании объектов по уничтожению химического оружия выполнены требования санитарных правил СП 2.2.1.2513-09 в п. 3.3., требующих "До начала эксплуатации объектов и в период основной производственной деятельности ... необходимо иметь утвержденную программу производственного контроля за соблюдением санитарных правил в соответствии с СП 1.1.1058-01".

Уничтожение запасов химического оружия Российской Федерации проводилось на семи объектах и завершено в 2017 г.

Разработки ФГУП "ГосНИИОХТ" привели к тому, что ни на одном объекте не было ни одного пораженного. Кроме того, ни один объект не внес изменений в состояние окружающей природной среды на территориях расположения самых опасных промышленных предприятий (объектов).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Санитарные правила СП 1.1.1058-01. Организация и проведение производственного контроля за соблюдением санитарных правил и выполнением санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий. Минздрав России — М., 2001.

2. Санитарные правила СП 1.1.2193-07. Организация и проведение производственного контроля за соблюдением санитарных правил и выполнением санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий. Изменения и дополнения № 1 СП 1.1.1058-01".
3. Демидюк В. В., Ещенко Ю. И., Кузьмина Г. А. и др. Обоснование инвестиций в строительство объекта по уничтожению химического оружия в Щучанском районе Курганской области / Под общ. ред. Манило И. И., Мамонтова Ю. И. — Курган: 1998. — 70 с.
4. Демидюк В. В. Современное состояние окружающей среды (Мир, где мы живем). Рос. Зеленый Крест. — М., 1998. — 29 с.
5. Демидюк В. В., Демидюк Н. В., Петрунин В. А. Обеспечение безопасности уничтожения химического оружия. Рос. Зеленый Крест. — М.: ООО "Агентство Ракурс Продакшн", 2004. — 20 с.
6. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Т. 1. — М.: Химия, 1981. — 384 с.
7. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии. Т. 2. — М.: Химия, 1981. С. 385—812.
8. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. для вузов. Изд. 10-е, стереотипное, доработанное. Перепеч. с изд. 1973 г. — М.: ООО ТИД "Альянс", 2004. — 753 с.
9. Романков П. Г., Курочкина М. И., Мозжерин Ю. Я. Процессы и аппараты химической промышленности. — Л.: Химия, 1989. — 560 с.
10. Современные средства отбора проб воздуха рабочей зоны. ВЦНИИОТ ВЦСПС, 1984.
11. Буковский М. И., Колесник М. И., Муравьева С. И., Дьякова Г. А. Руководство по контролю вредных веществ в воздухе рабочей зоны: справ. изд. Кн. 2. — М.: Химия, 1993. — 415 с.
12. Руководство по контролю источников загрязнения атмосферы. РД 52.04.186-89. Руководящий документ. — М.: Минздрав, Гидромет, 1991.
13. Погасян Х. П. Циклоны. — Л.: Гидрометеиздат, 1976. — 148 с.
14. ГОСТ 12.3.018-79. Системы вентиляционные. Методы аэродинамических испытаний. — М., 1981. — 11 с.
15. Санитарно-гигиенический контроль систем вентиляции производственных помещений. Методические указания № 4425-87. — М., 1988. — 28 с.
16. Энциклопедия по машиностроению XXL. Отбор проб аэрозолей. — 116 с.
17. ГОСТ Р ИСО 10396-2012. Выбросы стационарных источников. Отбор проб при автоматическом определении содержания газов с помощью постоянно установленных систем мониторинга. (Идентичен международному ИСО 10396-2007).
18. Методические указания по оборудованию мест отбора проб при экоаналитическом контроле промышленных выбросов в атмосферу (утв. НИИ Атмосфера, ФГУ "ЦЭКА" 30.09.2002).
19. Демидюк В. В., Петрунин В. А., Шелученко В. В. Организация системы производственного контроля безопасности объекта по уничтожению химического оружия: сб. Общественный форум-диалог. "Выполнение Россией Конвенции о запрещении химического оружия: состояние и перспективы к концу 2005 года". Рос. Зеленый Крест. — М., 2006. С. 46—49.
20. Холстов В. И., Демидюк В. В. Принципы создания экологически безопасных производств химической промышленности // Экология промышленного производства. 2021. № 4(116). С. 37—45.
21. География. Современная иллюстрированная энциклопедия. — М.: Росмэн. / Под ред. проф. Горкина А. П., 2006.
22. Капашин В. П., Соловьев В. К., Назаров А. В., Кузнецова Ю. Е., Ферезанова М. В. На пути химического разоружения. — Изд. 2-ое, доп. — М.: ФУ БХ УХО, 2010. (С. 120-121, 148, 176-177, 182, 205). — 209 с.

## Theory and practice of environmental monitoring of industrial enterprises. A modern look

V. V. DEMIDYUK

FSUE "State Scientific-research Institute of Organic Chemistry and Technology"  
State Research Center of the Russian Federation, Moscow, Russia

*Special studies have been conducted and methods have been developed for sampling representative air samples during environmental safety monitoring (control) for people living in residential areas adjacent to industrial enterprises. The behavior of air flows in air ducts of large diameters is investigated. It is established that the flow movement in the pipes is not linear. Moreover, the streams rotate clockwise in the northern hemisphere. Based on the literature data, we assume that in the southern hemisphere, air flows rotate counterclockwise. The behavior (state) of air flows in air ducts that we have discovered is proposed. This knowledge (Discovery) made it possible to develop systems both for taking gas samples for their subsequent analysis in stationary laboratories, and made it possible to connect devices for continuous automatic instrument control of emissions, including maximum permissible emissions (MPI) of hazardous substances. The method was implemented (from 2002 to 2017) at all seven facilities for the destruction of chemical weapons stocks of the Russian Federation. The analysis of the selected samples made it possible to control the state of the natural environment in the territories of the objects.*

**Keywords:** duct, ventilation emissions, gas-air flow, flue, environmental monitoring, maximum permissible emission, Pito tube.

Bibliography — 22 references.

Received February 28, 2023

УДК 62-523.8; 62-522.2; 62-522.7  
DOI: 10.52190/2073-2589\_2023\_3\_54  
EDN: PBCTHA

## Анализ мировых тенденций снижения экологической нагрузки при использовании мобильных энергетических средств в коммунальном, дорожно-строительном и сельском хозяйстве

И. А. СТАРОСТИН, канд. техн. наук; Е. В. ОВЧИННИКОВ;

А. В. ЕЩИН, канд. техн. наук

Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, Москва, Россия

*Рассмотрены мировые тенденции снижения экологических последствий при использовании техники в различных областях деятельности человека. Основными объектами анализа являются трактора западных производителей, использующие технические решения для снижения негативного воздействия на атмосферу.*

**Ключевые слова:** экология, вредные выбросы, двигатели внутреннего сгорания, мобильные энергетические средства.

Одним из трендов последних десятилетий является снижение экологической нагрузки на окружающую среду от хозяйственной деятельности человека. Основные усилия направлены на снижение вредных воздействий на атмосферу, водные источники и почву, а также на сохранение биосистем, флоры и фауны.

В рамках снижения экологической нагрузки на окружающую среду и борьбы с глобальным потеплением одной из первоочередных задач, стоящих перед мировым сообществом, является снижение вредных выбросов в атмосферу и декарбонизация мировой экономики. Вредные выбросы не только загрязняют окружающую среду непосредственно рядом с их источниками, но могут и переноситься воздушными массами на значительные расстояния, где с осадками попадают в водные ресурсы или оседают в почве, что впоследствии сказывается на состоянии экосистем огромных территорий, составе и качестве получаемых продуктов питания.

По данным Росстата, в 2021 г. в Российской Федерации в атмосферу выброшено 22,3 млн т. загрязняющих веществ, из которых 5,1 млн т. (24 %) выброшено передвижными источниками [1]. Таким образом, передвижные источники, к которым в частности относятся спецтехника, включающая строительные, дорожные, коммунальные, сельскохозяйственные, лесохозяйственные и др. машины, вносят значительный негативный вклад в загрязнение атмосферы. При этом существенная часть перечисленной спецтехники предназначена для городского хозяйства и эксплуатируется непосредственно в населенных пунктах, что приводит к загрязнению атмосферы в жилых районах и их окрестностях.

Основными энергетическими средствами, применяемыми в качестве базовой машины или агрегирующимися с различными видами прицепных и навесных специализированных машин, являются тракторы. В строительной и коммунальной сфере широко применяют экскаваторы и погрузчики, бульдозеры, катки, поливочные и коммунальные машины для уборки территории, машины для ухода за газонами, садами и парками, машины для ремонта дорожного полотна, ухода за прилегающими к дорогам территориям и т. п., эксплуатируемые с серийными универсальными тракторами.

Современные тракторы оснащают преимущественно дизельными двигателями внутреннего сгорания. Образующиеся в процессе горения дизельного топлива в двигателях отработавшие газы содержат в качестве основных компонентов  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ , окись углерода  $\text{CO}$ , соединения азота, представляющие собой смесь различных окислов ( $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$  и др.), различные неокислившиеся углеводородные соединения  $\text{C}_x\text{H}_y$ , альдегиды, твердые частицы и другие компоненты [2]. Большая часть данных веществ является серьезным загрязнителем окружающей среды.

В связи с этим актуальным вопросом является проведение исследований по выявлению мировых тенденций, направленных на снижение выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от передвижных источников, и способствующих этому технических решений, применяемых в современных тракторах и создаваемых на их базе специальных машин.

Цель исследования — выявление мировых тенденций повышения экологичности мобильных энергетических средств.

Одной из ключевых мер по снижению выбросов вредных веществ с отработавшими газами транспорта и спецтехники является введение экологических стандартов.

Ретроспективный анализ введения экологических нормативов концентрации вредных веществ в отработавших газах двигателей показывает, что основной тенденцией является многократный рост требований

Старостин Иван Александрович, старший научный сотрудник.

E-mail: starwan@yandex.ru

Овчинников Евгений Валентинович, научный сотрудник.

E-mail: evo-xpro-info@yandex.ru

Ещин Александр Вадимович, старший научный сотрудник.

E-mail: eschin-vim@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2023 г.

© Старостин И. А., Овчинников Е. В., Ещин А. В., 2023



по снижению концентрации вредных веществ в отработавших газах двигателей с каждым вновь вводимым стандартом [3].

В решении задачи по снижению вредных выбросов тракторов в атмосферу возможно выделить два основных направления работы производителей. Первое направление напрямую нацелено на обеспечение соответствия выпускаемой продукции существующим экологическим требованиям. Второе направление связано со стремлением производителей максимально снизить расход топлива и повысить эффективность использования мощности установленных двигателей, что в целом также способствует снижению экологической нагрузки.

Анализ технических мер, применяемых производителями для достижения уровня выбросов, соответствующих современным строгим экологическим нормам Европы и США, показал тенденцию использования в мировой и отечественной практике различных технологий [3]. Соответствие стандартам Tier 1 — Tier 3 производителями в большинстве случаев достигается за счет усовершенствования конструкции двигателей без использования или при ограниченном использовании нейтрализации — окисления отработавших газов в системе выпуска в присутствии катализатора. Для обеспечения соответствия требованиям более высоких экологических стандартов применяются внутреннюю рециркуляцию Exhaust Gas Recirculation (EGR), дизельный сажевый фильтр Diesel Particular Filter (DPF), предкамерный впрыск, управляемую регенерацию фильтра, систему с фильтром с непрерывной регенерацией, например, окислительный каталитический нейтрализатор Diesel Oxidation Catalyst (DOC) с сажевым фильтром DPF, системами селективного каталитического восстановления Selective Catalytic Reduction (SCR).

Например, двигатели Deutz TTCD 7.8 тракторов Deutz-Fahr серии 9 оснащены системой DOC, представляющей из себя катализатор окисления для снижения уровня содержания оксидов азота и углеводородов, образующихся в результате сгорания. В сочетании с системой EGR катализатор позволяет соответствовать нормам Tier 4i [4].

В целях повышения мощности и снижения удельного расхода топлива в дизельных двигателях самоходных машин и тракторов средней и высокой мощности широко применяют турбонаддув и системы охлаждения наддувочного воздуха, позволяющие обеспечить более полное сгорание топлива, что также способствует снижению объемов выбросов вредных веществ с отработавшими газами. С этой целью также применяют четырехклапанные системы газораспределения [3].

Например, в двигателях тракторов John Deere серии 8R/8RT используется воздушно-воздушный интеркулер, который позволяет снизить температуру проходящего во впускной коллектор воздуха, за счет чего увеличивается объем поступающего кислорода, достигается более полное сгорание топлива, снижается давление и температура процесса, что позволяет снизить риск перегрева и повысить ресурс двигателя [5].

В тракторах New Holland серии T4 также используют соответствующий экологическим нормам Tier III

двигатель FPT Industrial F5C, оснащенный системами турбонаддува и промежуточного охлаждения всасываемого воздуха, способствующими повышению эффективности сгорания топливовоздушной смеси, что особенно необходимо при высоких температурах наружного воздуха [6].

Повышению топливной экономичности и снижению вредных выбросов дизельных двигателей способствует применение топливной системы аккумуляторного типа с электронным управлением Common rail, обеспечивающей точную цикловую подачу топлива в соответствии с уровнем загрузки двигателя [3]. Данная система находит применение в дизельных двигателях большинства тракторов средней и высокой мощности.

Все большее применение находят электронные системы управления мощностью двигателя, нацеленные на минимизацию расхода топлива. Например, применяющаяся в транспортных и мобильных энергетических средствах система Electronic Control Module (ECM) обеспечивает поддержание заданных оборотов двигателя за счет корректировки уровня подачи топлива в зависимости от динамики изменения нагрузки на двигатель [7].

В двигателях DPS ECE R 24 тракторов Claas Axion 850 применяют систему Claas Power Management (CPM), позволяющую регулировать мощность и расход топлива в зависимости от необходимого тягового усилия, а также потребляемой BOM и гидравлической системой мощности. Повышению топливной экономичности способствует также применение автоматической коробки передач Hexashift, настроенной на обеспечение оптимальной загрузки двигателя при минимальном расходе топлива [8].

В тракторах New Holland серии T9, оснащенных дизельными двигателями FPT Industrial, установлена система интеллектуального управления, позволяющая регулировать мощность и крутящий момент в соответствии с нагрузкой в трансмиссии, гидравлике или на BOM [6].

В тракторах Fendt 200 V/F/P применяют двигатель и бесступенчатую коробку передач, согласование работы которых осуществляется системой управления Tractor Management System (TMS), которая обеспечивает автоматическое управление частотой вращения двигателя и передаточным числом бесступенчатой коробки передач Varío. Выдаваемая двигателем мощность автоматически регулируется в соответствии с нагрузкой, при этом обороты двигателя всегда поддерживаются в оптимальном диапазоне, за счет чего обеспечивается значительное снижение расхода топлива [9].

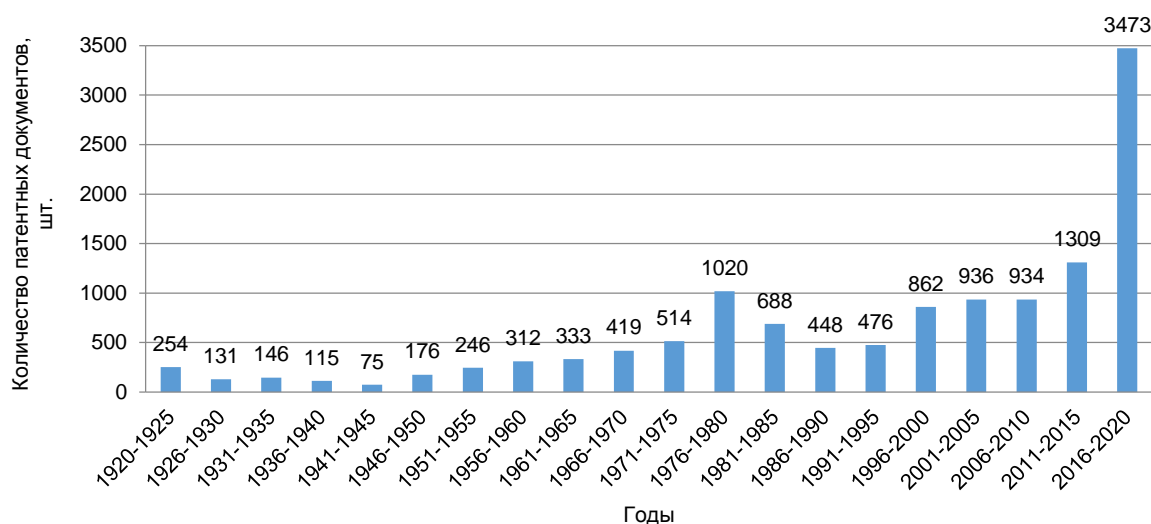
В тракторах Fendt 900 Varío реализована концепция Fendt iD, согласно которой уже при проектировании всех узлов и агрегатов заложены решения, обеспечивающие возможность работы на пониженных номинальных оборотах двигателя, за счет чего становится возможным снизить потребление топлива, увеличивая при этом ресурс. Например, применяемая в данных тракторах турбина с изменяемой геометрией Variable Geometry Turbocharger (VGT) обеспечивает плавную и постоянную мощность даже на низких оборотах двигателя [9].

Тракторы Case IH Steiger комплектуют двигателем FPT Powertrain Technologies объемом 12,9 л, оснащенный запатентованной технологией экономии топлива Case IH SCR, обеспечивающей возможность повышения мощности в пиковые моменты до 62 л.с., что позволяет сократить эксплуатационные расходы на уровень до 10 % по сравнению с предыдущими моделями [10].

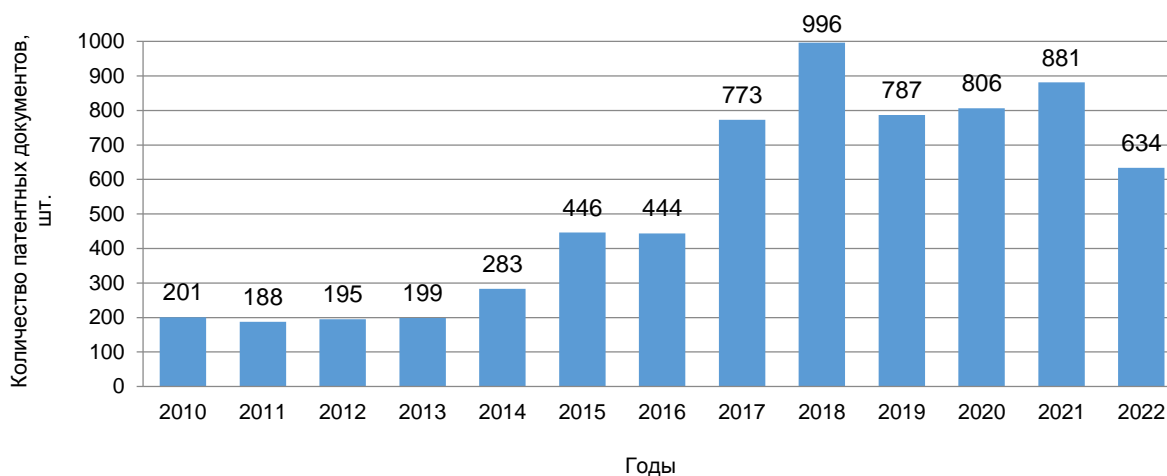
Анализ патентных документов международной патентной системы Patent Cooperation Treaty (PCT) Всемирной организации интеллектуальной собственности (WIPO) [11] за последние 100 лет (по состоянию на 31 декабря 2022 г.) показывает, что интерес мирового научного сообщества к патентованию решений по совершенствованию тракторных двигателей в последние годы существенно вырос (рис. 1). Подавляющее большинство патентных документов направлено на совершенствование конструкции и классических систем тракторных двигателей. Но, в

последние годы, значительное внимание также уделяется системам автоматического управления рабочими режимами двигателя и упреждающей регулировки частоты вращения коленчатого вала в зависимости от режимов работы агрегата и окружающих условий.

Компанией CLAAS запатентована система для управления рабочими режимами двигателя трактора, состоящая из датчиков, фиксирующих давление в шинах, частоту вращения колеса, тяговое усилие, усилие на колесе, нагрузку на ось, крутящий момент колеса и частоту вращения двигателя; вычислительного блока и исполнительных механизмов [12]. На основании поступающей от датчиков информации вычислительный блок рассчитывает рабочие параметры трактора, сравнивает их с оптимальными значениями и в случае отклонения от оптимальных значений осуществляет регулировку частоты вращения двигателя.



а



б

**Рис. 1. Динамика изменения количества зарегистрированных патентных документов в области совершенствования тракторных двигателей:**

а — изменение количества зарегистрированных патентных документов в период 1920—2022 гг.,

б — изменение количества зарегистрированных патентных документов в период 2010—2022 гг.

Компанией CLAAS также предложен способ опережающего регулирования мощности двигателя или режимом работы трансмиссии в зависимости от окружающих условий. Опережающее регулирование осуществляется системой, включающей в себя устройство управления двигателем и/или трансмиссией, блок определения положения с системой планирования маршрутов для разработки маршрута движения транспортного средства, центральный процессор. Система получает информацию о топографии, в частности, высотном профиле и свойствах почвы по всему планируемому маршруту движения средства, отслеживает положение средства на маршруте движения и направляет устройству управления сигнал о необходимости изменения мощности двигателя или режима работы трансмиссии за некоторое время до изменения условий окружающей среды [13].

Другим направлением повышения экологических показателей мобильных энергетических средств является применение систем для использования альтернативных видов топлива, например, природного сжатого газа и биотоплива, которые также позволяют существенно снизить выбросы вредных веществ [2]. Так, например тракторы Fendt 200 T4F/N/V приспособлены к работе на биодизельном топливе без необходимости внесения каких-либо доработок [9].

Несмотря на прикладываемые исследователями и конструкторами усилия по совершенствованию дизельных двигателей, перспектива их использования остается под вопросом, что связано с рядом недостатков двигателей внутреннего сгорания. В первую очередь, это высокая токсичность выхлопных газов дизельных двигателей. Постоянно ужесточающиеся экологические нормы требуют от производителей применения новых технологических решений, которые приводят к усложнению конструкции, удорожанию и снижению мощности двигателей. Другим недо-

статком является низкий КПД дизельных двигателей, который не превышает 40–55%, при этом существенная часть получаемой от сгорания топлива энергии теряется в виде тепла, уходящего в атмосферу. На текущем этапе развития науки и техники устранить данные недостатки не удастся.

На протяжении последних лет учеными проводятся исследования по созданию более эффективных и экологичных источников энергии. В качестве альтернативного пути развития энергетических установок для транспорта, коммунальных, дорожно-строительных и сельскохозяйственных самоходных машин рассматривается применение гибридного и электрического приводов, преимущественно на аккумуляторных батареях или водородных топливных элементах [14]. Данная тенденция наиболее четко отмечена в транспорте. В этом направлении уже сформирована целая индустрия электромобилестроения, а в гонку включились мировые лидеры отрасли. При этом создают не только легковой транспорт, но и большегрузные электромобили [15, 16].

На фоне интенсивно развивающегося электрического транспорта правительства различных стран заявляют о планах отказаться от использования двигателей внутреннего сгорания в транспортных средствах. Проведен анализ стратегических и программных документов различных стран мира, в которых рассматривают вопрос ограничения использования двигателей внутреннего сгорания (таблица) [17–20].

Приведенные в таблице данные показывают, что большинство развитых стран мира планирует к 2035–2040 г. ввести запрет на продажу транспортных средств с двигателем внутреннего сгорания, обеспечивая тем самым снижение выбросов отработавших газов и экологической нагрузки от транспорта. Высока вероятность, что данные ограничения в последствии коснутся тракторов и специальной техники.

Страны, объявившие о введении ограничений на применение двигателей внутреннего сгорания

Год начала реализации	Страна (ассоциация)	Принимаемые меры
с 2025 г.	Норвегия	Запрет на продажу новых автомобилей с ДВС
с 2025 г.	Южная Корея	Обеспечение увеличения доли электромобилей и автомобилей на водороде до 5,5 %
с 2030 г.	Великобритания, Нидерланды, Дания, Швеция, Исландия, Ирландия, Италия, Словения, Израиль, Германия, Греция, Индия	Запрет на продажу новых автомобилей с ДВС
с 2032 г.	Шотландия	Запрет на продажу новых автомобилей с ДВС
с 2035 г.	Великобритания	Запрет на продажу новых гибридных автомобилей
с 2035 г.	Канада, Калифорния, Южная Корея, Япония, Бельгия, Польша, Турция, США	Запрет на продажу новых автомобилей с ДВС
к 2035 г.	Китай	50 % рынка всех продаваемых в стране автомобилей должны быть электромобилями, электромобилями на топливных элементах (водород) и подключаемыми гибридами с большим пробегом на электродвигателе, а вторые 50 % — неподключаемыми гибридами
к 2035 г.	США	Запрет на продажу новых автомобилей с ДВС
с 2040 г.	Франция, Испания, Португалия, Австрия, Азербайджан, Сингапур	Запрет на продажу новых автомобилей с ДВС

Отказаться от применения двигателей внутреннего сгорания планируют и сами производители автомобильного транспорта. Так, компании Daimler, Scania, Man, Volvo, Daf, Iveco и Ford, входящие в Ассоциацию европейских производителей автомобилей (ACEA), ставят перед собой цель перейти с 2040 г. к выпуску грузовых автомобилей, оснащенных электромоторами или двигателями на топливных элементах.

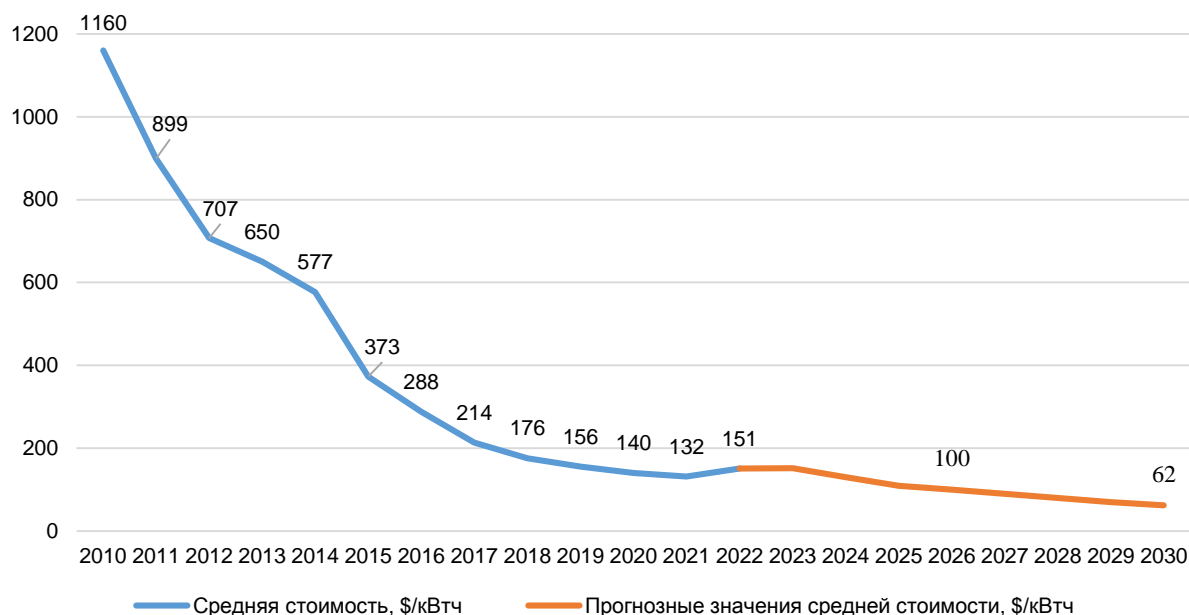
Однако значительную часть стоимости транспортного средства с электрическим приводом (до 60 %) составляет стоимость электрических батарей. Только при существенном снижении их стоимости транспортное средство с электрическим приводом сможет конкурировать с транспортным средством с ДВС по цене, имея при этом ряд дополнительных существенных конкурентных преимуществ [15, 16].

Согласно данным американской компании Bloomberg, с увеличением объемов производства литиевых батарей их стоимость снижается достаточно высокими темпами (рис. 2) [20—23]. Ожидается, что данная тенденция сохранится до 2030 г. и, согласно прогнозу, стоимость литиевых батарей снизится более чем в 2 раза по сравнению с 2020 г. Данный фактор может стать серьезным стимулом для развития не толь-

ко электрического транспорта, но и электрических тракторов.

Перевод тракторов на электрический привод позволит не только исключить выбросы CO<sub>2</sub>, но и снизить затраты на эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт такой техники по сравнению с традиционной. Все эти факторы безусловно подталкивают к развитию электрических энергетических средств, и ведущие производители техники заинтересованы в финансировании данных разработок.

На выставке «Agritechnica 2017» серебряную медаль получил электрический трактор Fendt e100 Vario (рис. 3) [16]. Мощность трактора составляет 50 кВт, в качестве источника энергии выступают литий-ионные батареи с напряжением 650 В и емкостью 100 кВт·ч, что позволяет обеспечить до 5 ч непрерывной работы. Электрический трактор оснащен дополнительно силовыми разъемами для подключения машин с электроприводом, который способен выдавать пиковые мощности в 150 кВт. Трансмиссия трактора позволяет осуществлять точное управление скоростными и тяговыми характеристиками. Максимальный крутящий момент трансмиссии и ВОМ развивается фактически с нуля оборотов.



Примечание. \*Построено авторами на основании [20—23].

Рис. 2. Динамика изменения стоимости литиевых аккумуляторных батарей с прогнозными значениями до 2030 г.



Рис. 3. Электрический трактор Fendt e100 Vario

Фирмой John Deere создан полностью электрический трактор Sustainable Energy Supply for Agricultural Machinery (SESAM) (рис. 4).



Рис. 4. Электрический трактор John Deere SESAM

Питание трактора осуществляется от литий-ионных батарей мощностью 130 кВт. Трактор оснащен двумя электрическими двигателями, один из которых передает крутящий момент на колеса через автоматическую механическую трансмиссию DirectDrive, а второй служит для привода машин через BOM. Запаса энергии хватает на 4 ч работ или для передвижения по шоссе на расстояние 55 км, на заряд батарей уходит 3 ч [5].

Наряду с созданием электрических тракторов на аккумуляторных батареях рассматриваются другие источники энергии, в частности использование водородных топливных элементов, вырабатывающих электрическую энергию при окислении водорода.

В начале 2010 г. был представлен экспериментальный трактор с водородными топливными элементами New Holland NH2.140, созданный на базе серийной модели New Holland T6.140. В исследовании принимали участие специалисты исследовательского центра компании Fiat (рис. 5) [6]. Трактор оснащен баллоном, в котором хранится 8,2 кг водорода под давлением 350 атм, тремя блоками топливных элементов суммарной мощностью 100 кВт, которые питают два электромотора максимальной мощностью по 100 кВт каждый. Один электромотор служит для привода трансмиссии, другой — для привода вспомогательного и навесного оборудования через гидравлическую систему. Для сглаживания пиковых нагрузок установлена аккумуляторная батарея емкостью 12 кВт·ч и максимальной мощностью 50 кВт. Запас водорода позволяет обеспечить 3 ч непрерывной работы [6].



Рис. 5. Трактор с водородными топливными элементами New Holland NH2.140

Для использования в реальных условиях электрических тракторов, транспортных средств и спецтехники с водородными топливными элементами необходимо обеспечить выработку водорода в достаточных объемах и по приемлемым ценам, а также создать инфраструктуру заправочных станций.

Широкое применение электрических транспортных средств потребует создания инфраструктуры зарядных станций и дополнительной выработки электрической энергии. Дополнительных затрат энергии потребует и производство водорода, в частности при его получении методом электролиза. Результаты исследований показывают, что технические ограничения или ограничения мощности в электроэнергетическом секторе не должны стать препятствием для повсеместной замены автомобилей с двигателями внутреннего сгорания на электромобили. Сценарий Международного энергетического агентства предполагает, что дополнительная генерация, необходимая для удовлетворения спроса на электромобили, составит всего 1,5 % от общего спроса на электроэнергию в 2030 г. Аналогичным образом в сценарии Bloomberg New Energy Finance на 2040 г. отмечается, что потребление электроэнергии электромобилями будет составлять лишь 5 % от прогнозируемой к выработке мировой электрической мощности в 2040 г. [23]. Переход к использованию электрических мобильных энергетических средств, суммарная мощность которых значительно ниже, чем суммарная мощность транспортных средств, также не повлечет существенного увеличения потребления электрической энергии.

Необходимо отметить, что, говоря об экологической безопасности использования электрических транспортных и мобильных энергетических средств на аккумуляторных батареях или водородных топливных элементах, следует оценивать экологическую нагрузку полного жизненного цикла аккумуляторных



батарей от производства до утилизации, а также экологическую безопасность способа получения электрической энергии. Данные вопросы требуют серьезного изучения и оценки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Окружающая среда: Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194>, (дата обращения: 19.12.2022).
2. Овчинников Е. В., Овчаренко А. С. Проблемы и пути снижения выбросов углекислого газа от транспорта, промышленного производства и коммунального хозяйства // Экология промышленного производства. 2021. № 4(116). С. 28—32. DOI: 10.52190/2073-2589\_2021\_4\_28. EDN VMUUDT.
3. Davydova S. A., Starostin I. A. Compliance of modern agricultural tractors presented on Russian market with global emission standards // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. № 659. P. 012119. DOI: 10.1088/1755-1315/659/1/012119.
4. Tractors — Deutz-Fahr [Электронный ресурс]. URL: <https://www.deutz-fahr.com/ru-ru/products/tractors>, (дата обращения: 16.09.2020).
5. Новые гусеничные и колесные тракторы John Deere [Электронный ресурс]. URL: <https://www.deere.ru/ru/тракторы/>, (дата обращения: 22.09.2020).
6. Сельскохозяйственные машины и техника New Holland [Электронный ресурс]. URL: <https://agriculture.newholland.com/apac/ru-ru>, (дата обращения: 18.10.2022).
7. Федоренко В. Ф., Гольяпин В. Я. Тракторы сельскохозяйственного назначения за рубежом: тенденции развития и инновационные разработки // Техника и оборудование для села. 2016. № 1. С. 2—7.
8. Тракторы Claas [Электронный ресурс]. URL: <https://www.claas.ru/produktsiya/traktory>, (дата обращения: 19.10.2022).
9. Тракторы Fendt Vario для эффективной работы [Электронный ресурс]. URL: <https://www.fendt.com/ru/modelny-i-ryad>, (дата обращения: 18.10.2022).
10. Тракторы Case IH [Электронный ресурс]. URL: <https://www.caseih.com/apac/ru-ru/products/tractors>, (дата обращения: 27.10.2022).
11. World Intellectual Property Organization [Электронный ресурс]. URL: <https://patentscope.wipo.int>. (дата обращения: 17.01.2023) [in Russian].
12. Вихорст Ян Карстен, Элэр Кристьян. Способ и система для определения рабочего режима сельскохозяйственного транспортного средства и сельскохозяйственное транспортное средство. Патент № 2017133012 Российская Федерация. МПК B60W 40/12. Заявл. 21.09.2017. Оpubл. 21.03.2019.
13. Вихорст Ян Карстен, Биркманн Кристиан, Фелде Томас. Сельскохозяйственная рабочая машина и способ опережающего регулирования приводной мощности и/или приводной трансмиссии. Патент № 2015138969 Российская Федерация. МПК A01D 41/00. Заявл. 14.09.2015. Оpubл. 20.03.2017.
14. Старостин И. А., Стадник А. В. Тенденции развития электрических тракторов сельскохозяйственного назначения: сб. статей мат. Междунар. науч. конф. молодых учёных и специалистов, посвящённой 135-летию со дня рождения А. Н. Костякова. Москва, 06—08 июня 2022 г. — М.: Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К. А. Тимирязева, 2022. С. 647—651.
15. Хитрых Д. Электромобили: мировые тренды, проблемы и перспективы // Энергетическая политика. 2021. № 1(155). С. 22—33. DOI: 10.46920/2409-5516\_2021\_1155\_22. EDN UHCGEH.
16. Дхакал Т., Мин К. С. Макроанализ и прогноз перспектив распространения электромобилей // Форсайт. 2021. Т. 15. № 1. С. 67—73. DOI: 10.17323/2500-2597.2021.1.67.73. EDN YIFZNN.
17. Michael Woodward, Dr. Bryn Walton, Dr. Jamie Hamilton, Geneviève Alberts, Saskia Fullerton-Smith, Edward Day, James Ringrow. Electric vehicles Setting a course for 2030. Deloitte Touche Tohmatsu Limited [Электронный ресурс]. URL: <https://www2.deloitte.com/us/en/insights/focus/future-of-mobility/electric-vehicle-trends-2030.html>. (дата обращения: 26.10.2022).
18. Мир электромобилей: какие страны и когда должны отказаться от ДВС // E-CARS.TECH [Электронный ресурс]. URL: <https://e-cars.tech/analitika/mir-elektromobiley-kakie-strany-i-kogda-dolznoy-otkazatsya-ot-dvs/>. (дата обращения: 09.01.2023).
19. Индия отказывается от автомобилей с ДВС // Avtoportal.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://avtoportal.ru/news/1001-indiya-otkazivaetsya-ot-avtomobiley-s-dvs.html>. (дата обращения: 14.12.2022).
20. Baldwin Roberto. California to Ban Sale of New Gasoline Vehicles in 2035, Favoring EVs. Newsletter "Car and driver" [Электронный ресурс]. URL: <https://www.caranddriver.com/news/a34129129/california-ban-internal-combustion-vehicles-2035/> (дата обращения: 14.12.2022).
21. Electricity, Electric Vehicles, And Public Policy: Eight Key Takeaways. The Oxford Institute for Energy Studies [Электронный ресурс]. URL: <https://www.oxfordenergy.org/publications/electricity-electric-vehicles-public-policy-eight-key-takeaways/> (дата обращения: 14.12.2020).
22. Мировая энергетическая статистика "Yearbook" [Электронный ресурс]. URL: <https://yearbook.enerdata.ru/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html>, (дата обращения: 15.12.2020).
23. Bloomberg New Energy Finance [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bloomberg.com> (дата обращения: 16.12.2020).

## Analysis of global trends in reducing the environmental load when using mobile energy facilities in public utilities, road construction and agriculture

I. A. STAROSTIN, E. V. OVCHINNIKOV, A. V. ESHCHIN  
Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

*This article discusses the analysis of global trends in reducing environmental impacts when using technology in various fields of application. The main objects of analysis are tractors of Western manufacturers, using technical solutions to reduce the negative impact on the atmosphere.*

**Keywords:** ecology, harmful emissions, internal combustion engines, mobile power vehicles.

**Bibliography** — 23 references.

*Received February 3, 2023*



УДК 556.11

DOI: 10.52190/2073-2589\_2023\_3\_61

EDN: PBHQKC

## Методы нечеткой логики на службе водно-экологических исследований

О. М. РОЗЕНТАЛЬ, д-р техн. наук

Институт водных проблем Российской академии наук, Москва, Россия

В. Х. ФЕДОТОВ, канд. хим. наук

Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

*Предлагается использовать альтернативные методы нечеткой логики, которые продемонстрировали свою полезность в разных предметных областях, конечно при учете факторов неопределенности. Эти методы дают возможность оценить и спрогнозировать вероятность тех или иных событий на основе набора правил, позволяющих учитывать не только официальные статистические данные, но и индивидуальный опыт экспертов-профессионалов. Приведен пример расчета прогнозных значений показателей качества воды в р. Чусовой с применением нечеткой оценки концентраций различных загрязнителей.*

**Ключевые слова:** качество природных вод, водно-экологическая информация, методы нечеткой логики, прогноз вероятности, водохозяйственные решения, экспертные заключения.

### Обоснование целесообразности использования нечеткого подхода к оценке водно-экологической информации

Потребность в достоверной водно-экологической информации является первостепенной, но нерешенной задачей устойчивого водопользования [1]. Поскольку неопределенность такой информации становится не только экономической и экологической, но также и социальной проблемой, поясним подробнее причины сложившейся ситуации. Это позволит лучше обосновать необходимость перехода к более совершенным методам водно-экологического исследования, в частности, с использованием нечеткой логики.

Трудности водно-экологического оценивания объясняются, прежде всего, высокой динамичностью контролируемых показателей, исследуемых средствами выборочного контроля, а также неопределенностью результатов каждого измерения. Так, например, приписанные нормы погрешности измерений, достигающие десятков процентов [2] для большинства токсичных загрязнителей, резко снижают точность получаемой информации. В частности, из рис. 1 видно, что при относительной погрешности  $\delta = \pm 40\%$  нельзя доверять выводам о соответствии или несоответствии концентрации  $C$  загрязняющих веществ ее предельно допустимой концентрации

(ПДК) при условии, что величина  $C/\text{ПДК}$  лежит в диапазоне  $0,75 \div 1,75$ , а при  $\delta = 70\%$  —  $0,5 \div 3,3$   $C/\text{ПДК}$  [2].

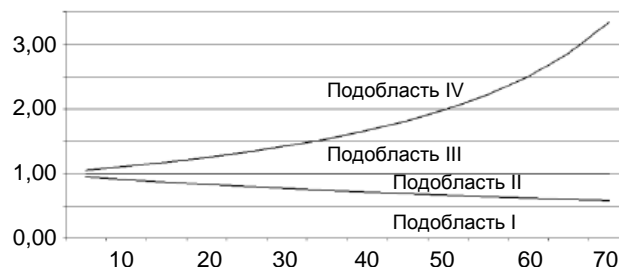


Рис. 1. Подобласти относительно достоверной (I, IV) и недостоверной (II, III) оценки величины  $C/\text{ПДК}$  в зависимости от относительной погрешности  $\delta$  (%)

Еще одной крупной причиной недостоверности информации являются ошибки выборочного водного контроля (мониторинга). Известно жесткое регулирование периодичности отбора проб для анализа сырья и продукции, когда риск брака составляет доли процента [3]. Но ничего подобного нет при водно-экологическом контроле и прогнозе, хотя здесь опасения нарушения установленных требований, как правило, особенно значительны. Концентрация загрязняющих водные объекты веществ может изменяться по порядку величины в течение нескольких часов или дней. Тем не менее, на подавляющем большинстве постов Росгидромета анализ качества природной воды осуществляют один раз в месяц в нарушение правил [4], предусматривающих установление периодичности контроля только после предварительных исследований изменчивости показателей.

Розенталь Олег Моисеевич, главный научный сотрудник.

E-mail: omro3@yandex.ru

Федотов Владислав Харитонович, доцент.

E-mail: fvh@inbox.ru

Статья поступила в редакцию 17 апреля 2023 г.

© Розенталь О. М., Федотов В. Х., 2023

Для иллюстрации ошибочности существующего выборочного контроля в условиях нестабильности состава воды на рис. 2 приведены типичные результаты ежемесячных концентрации нефтепродуктов, выполненных постом сети Росгидромета. Здесь же даны еще результаты более частых измерений, выполненных Центром сертификационных испытаний "Акваметрия" (аттестат об аккредитации № РОСС RU.0001.03ЭП00).

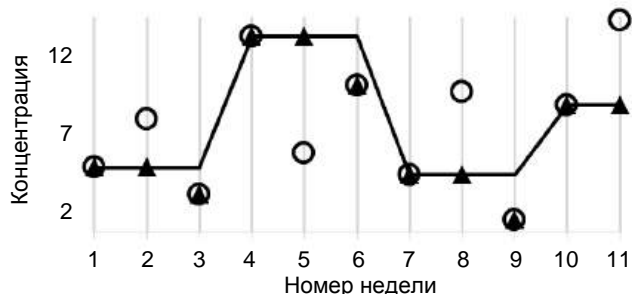


Рис. 2. Результаты измерений концентрации нефтепродуктов, мкг/дм³, в р. Чусовая на створе г. Чусовой, выше впадения р. Архиповка летом 2013 г.: ежемесячные данные (линия), полумесячные (треугольные маркеры) и еженедельные (кольца). Треугольник внутри кольца соответствует точке получения двухнедельных и еженедельных данных одновременно

На приведенном рисунке официальные данные поста Росгидромета, полученные с фиксированной частотой измерений, считались постоянными вплоть до очередного контроля качества воды (отрезки прямых, параллельных оси ординат), т. е. в течение трех недель при измерениях один раз в месяц. Если моменты отбора лабораторных проб постом Росгидромета и ЦСИ "Акваметрия" совпадали, то принимались результаты лаборатории Росгидромета. При несовпадении моментов пробоотбора учитывали данные ЦСИ "Акваметрия".

Из рис. 2 видно, что при ежемесячных измерениях упускают отклонения контролируемых показателей, наблюдаемые при полумесячных измерениях (точки 3, 6, 9), и тем более — при еженедельных (точки 2, 5, 8, 11). При этом все же остается невыясненным вопрос о более высокочастотной вариации концентрации загрязнений, чем еженедельные.

Описанные ошибки, возникающие как при каждом единичном измерении (рис. 1), так и при выборочном контроле (рис. 2), относятся к числу неустраняемых составляющих погрешности [5]. Помимо них имеются также промахи, ошибки персонала, сбои систем измерений, воздействие иных неслучайных факторов, непредусмотренных при планировании эксперимента. В итоге невозможно получить точный результат путем обработки массивов полученных результатов. А использование статистической процедуры, несоответствующей действительному уровню априорной информации об изменчивости контролируемых показателей, не позволяет правильно выбрать алгоритм обработки и обосновать требования к точности измерений.

В описанных условиях более объективными способами оценки качества воды представляются подходы, основанные на методах нечеткой логики (НЛ), позволяющие существенно снизить описанные потери достоверности экспериментальной информации.

### Демонстрация возможностей нечеткой логики

Методы НЛ относят к интеллектуальным методам анализа данных средствами неклассической многозначной логики. Управляющая экспертная НЛ-система состоит из некоторого набора ключевых факторов (нечетких объектов) и характеризующих их свойства нечетких правил продукционного типа "что будет, если ...". Эти составляющие НЛ могут быть сформированы достаточно субъективно, но должны быть основаны на опыте экспертов в заданной предметной области. Описание нечетких объектов (фаззификация) и операции с имеющимися данными проводят по законам нечеткой (многозначной) логики [6, 7], являющейся неклассической альтернативой классическим вероятностно-математическим методам. Результатом "работы" такой системы является возможность получения нечетких логических выводов (НЛ-прогнозов), построенных по заданному алгоритму [7] и согласованных с правилами, заданными экспертами.

Для составления информативного прогноза необходимо построить достаточно представительный набор выводов, позволяющих составить более или менее объективное представление о свойствах и эволюции исследуемого явления. При необходимости нечеткие выводы нетрудно преобразовать в четкие оценки с помощью операции дефаззификации, однако информативность и достоверность нечетких прогнозов при этом может понизиться. В целом же экспертная НЛ-система может быть использована как хорошая альтернатива для проведения водно-экологических исследований с учетом описанной неточности анализируемой исходной статистической информации, мобилизации опыта и неформальных знаний специалистов-экспертов.

Продемонстрируем возможность НЛ на примере нечеткого прогноза качества воды р. Чусовой, створ г. Чусового (выше впадения р. Архиповки).

Пусть для водно-экологического исследования и прогноза представляют интерес следующие задачи:

Задача 1. Оценить влияние средних значений концентрации железа в воде на концентрацию нефтепродуктов, т. е.  $\bar{C}(\text{Fe})$  на  $\bar{C}(\text{Oil})$ ;

Задача 2: влияние  $\bar{C}(\text{NH}_4)$  на  $\bar{C}(\text{NO}_3)$ ;

Задача 3: влияние  $\overline{\text{ХПК}}$  на  $\overline{\text{БПК}_5}$ ;

Задача 4: влияние расхода воды  $\bar{Q}$  на концентрации  $\bar{C}(\text{NO}_3)$ ,  $\bar{C}(\text{Fe})$ ,  $\bar{C}(\text{Oil})$ .

Пусть также имеется возможность воспользоваться экспериментальными данными постов сети Росгидромета, полученными в 1-м полугодии 2014 года и данными, приведенными в табл. 1.

Таблица 1

Результаты ежемесячных измерений контролируемых показателей

Номер месяца года	$C(Fe)$ , мг/дм <sup>3</sup>	$C(Oil)$ , мг/дм <sup>3</sup>	$C(NH_4)$ , мг/дм <sup>3</sup>	$C(NO_3)$ , мг/дм <sup>3</sup>	ХПК, мг/дм <sup>3</sup>	БПК5, мг/дм <sup>3</sup>	Q, м <sup>3</sup> /с
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0,10	0,01	0,19	0,50	10,6	0,6	47,2
2	0,11	0,02	0,20	0,53	11,0	0,6	40,7
3	0,12	0,02	0,20	0,61	10,4	0,8	39,3
4	0,27	0,01	0,29	0,9	13,9	0,6	421
5	0,29	0,01	0,24	0,27	20,1	0,8	864
6	0,27	0,05	0,34	0,07	18,2	0,9	371

Для решения первой из числа поставленных задач рис. 3 демонстрирует НЛ-систему, построенную на основе нечеткой сети типа Мамдани, где заданы имена и типы нечетких объектов (*input* — входные,

*output* — выходные), а также свойства нечетких операций.

Детализация свойств входных объектов показана на рис. 4, 5.

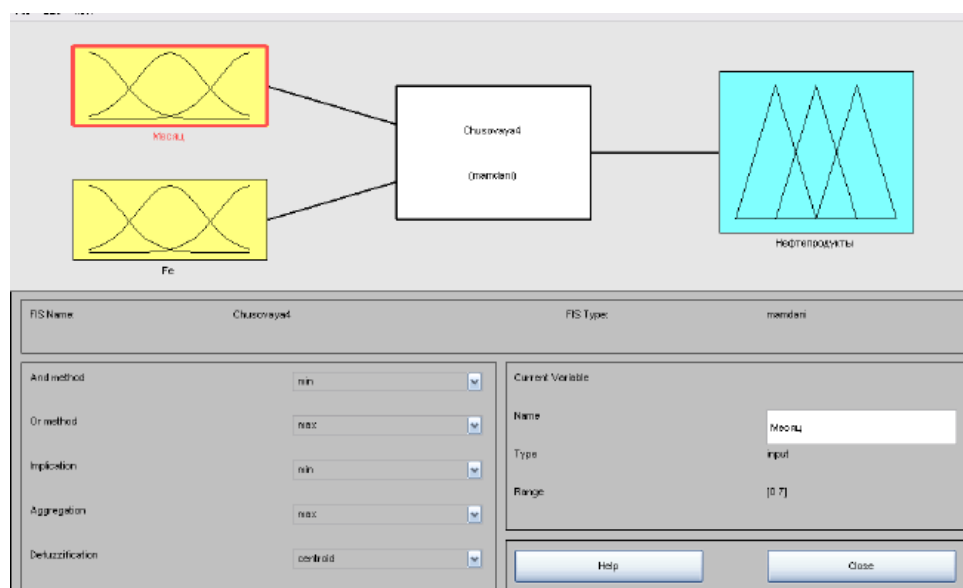


Рис. 3. Структура НЛ-системы "Чусовая". Желтые прямоугольники — входные объекты, синий — выходной, белый — нечеткий процессор. Линии на прямоугольниках символизируют функции распределения, красная рамка — текущий объект "Месяц", свойства которого отражены ниже на сером фоне, где приведены название сети "Chusovaya", тип сети (mamdani [6, 7]), принятые обозначения алгоритмов нечетких операций (And method = min; Or method = max; Implication = min; Aggregation = max; Defuzzification = centroid — дефаззификация центроидным методом; тип текущего объекта = input — входной; шкала изменения текущего объекта = [0, 7] — номера месяцев

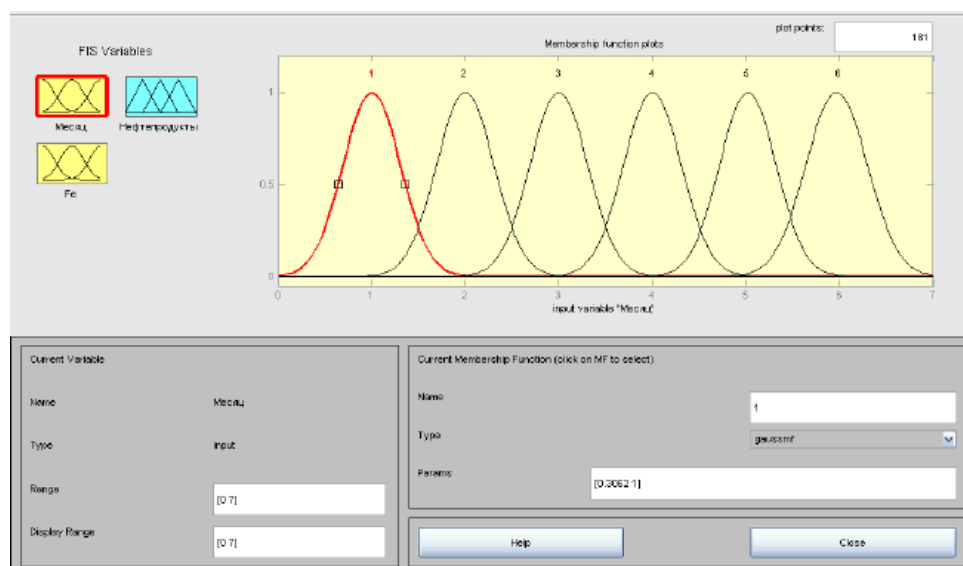


Рис. 4. Функции принадлежности нормального вида, выбранные для фактора "Месяц". Тип — входной. Интервал [0—7], характеризующий шкалу значений, отображает номер месяца в первом полугодии "с запасом влево и вправо"

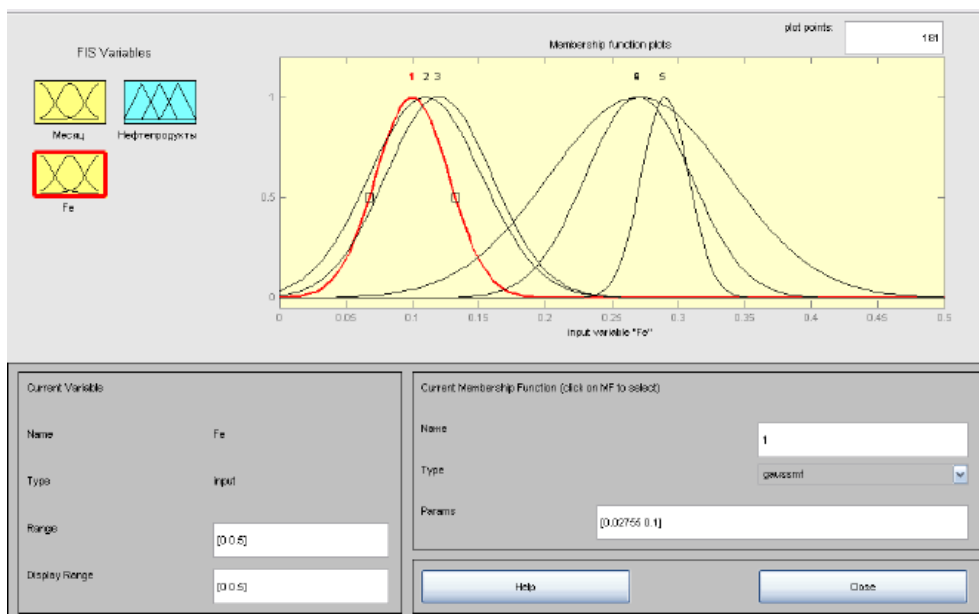


Рис. 5. Функции принадлежности нормального вида для железа в воде (Fe). Тип — входной. Шкала значений в интервале [0-0.5] учитывает статистические данные "с запасом влево и вправо"

База правил для заданных функций принадлежности и данных столбцов 2, 3 табл. 1 представлена в табл. 2.

Таблица 2

Правила, характеризующие влияние номера месяца года и концентрации железа C(Fe) на концентрацию нефти C(Oil)

Правило	№ месяца	C(Fe)	C(Oil)
1	1	Низкая (0,10)	Низкая (0,01)
2	2	Средняя (0,11)	Средняя (0,02)
3	3	Выше среднего (0,12)	Средняя (0,02)
4	4	Высокая (0,27)	Низкая (0,01)
5	5	Очень высокая (0,29)	Низкая (0,01)
6	6	Высокая (0,27)	Высокая (0,05)

Приведенные в таблице правила используют для обучения нечеткой экспертной системы; для простоты анализа здесь и в дальнейшем они вводятся с одинаковым уровнем значимости (весом). Структура и состояние такой системы при средних значениях входных переменных приведены на рис. 6.

Сформированная НЛ-система способна отвечать на вопросы типа "Что будет, если...?", т. е. оценивать значение искомой величины для любых заданных значений входных факторов по алгоритмам имеющихся нечетких операций. Например, можно получить ответ системы на вопрос "Что будет с концентрацией нефтепродуктов в середине каждого месяца в зависимости от содержания железа в реке".

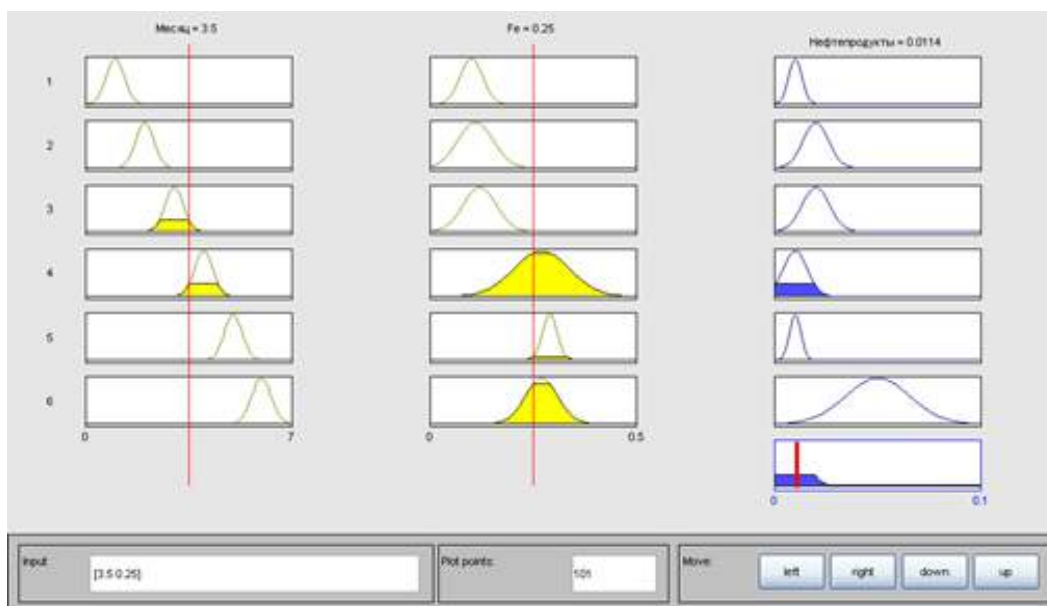


Рис. 6. Структура экспертной НЛ-системы.

Первый столбец — свойства входного фактора "Месяц" и ее среднее значение 3,5 (вертикальная линия).  
 Второй столбец — свойства входного фактора "Fe" и его среднее значение 0,25 (вертикальная линия).  
 Третий столбец — свойства выходного фактора "Нефтепродукты" и его дефазифицированное значение 0,0114, рассчитанное по величине входных факторов с учетом заданных нечетких операций

На рис. 6 показано, что в середине апреля месяца при средней концентрации  $C(Fe) \approx 0,25 \text{ мг/дм}^3$  ожидаемое дефазифицированное значение (прогноз) концентрации нефтепродуктов  $\approx 0,0114 \text{ мг/дм}^3$  (красный столбик). Здесь погрешность оценки составляет  $\pm 5\%$ . Это следует из того, что ширина синей горки внизу красного столбика составляет примерно 10 % от интервала изменения.

Вариацией значений входных переменных (номера месяца и концентрации железа в воде) нетрудно получить достаточно информативные данные для водопользователя, желающего прогнозировать содержание нефтепродуктов, например, в целях подготовки систем доочистки воды. Такие данные сведены в столбцы 2 и 3 табл. 3, всего в количестве  $5^2 = 25$  значений для заданной дискретности измерений.

Как видно, содержание нефтепродуктов зимой возрастает одновременно с ростом концентрации железа, а с наступлением весны такая зависимость исчезает и даже, по мере приближения половодья

(апрель и частично май), оказывается на какое-то время прямо противоположной. Но все же повышается летом, достигая своей предельно допустимой концентрации.

При необходимости с использованием описанных методов НЛ может быть решена обратная задача влияния времени года и  $C(Oil)$  на  $C(Fe)$ . Результаты ее решения приведены в столбцах 4, 5 табл. 3. Видно, что концентрация железа зимой растет с накоплением нефтепродуктов в воде, достигая к лету максимума.

Общую картину и отдельные детали перечисленных зависимостей, не приведенных в табл. 3, можно наблюдать на трехмерных графиках рис. 5. Из них следует, в частности, что зимой концентрация нефтепродуктов увеличивается вместе с ростом концентрации железа; с приближением весны эта зависимость падает и в дальнейшем уже слабо связана с содержанием металла, и все время остается на максимуме.

Таблица 3

Прогноз в середине месяца независимых (влияющих) факторов (четные столбцы)  
на зависимые (нечетные столбцы)

Месяц	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Fe	<i>Oil</i>	<i>Oil</i>	Fe	NH <sub>4</sub>	NO <sub>3</sub>	ХПК	БПК <sub>5</sub>	$\bar{Q}$	Fe	$\bar{Q}$	<i>Oil</i>	$\bar{Q}$	NO <sub>3</sub>
Февраль	0,10	18	5	0,11	0,10	0,53	10	0,28	35	0,13	35	13	35	0,52
	0,15	19	20	0,12	0,15	0,53	12	0,26	40	0,13	40	13	40	0,53
	0,20	20	35	0,12	0,20	0,53	15	0,40	400	0,29	400	21	400	0,79
	0,25	21	50	0,15	0,25	0,53	18	0,50	650	0,29	650	21	650	0,78
	0,30	22	65	0,20	0,30	0,53	20	0,50	900	0,36	900	26	900	0,35
Март	0,10	20	5	0,12	0,10	0,56	10	0,33	35	0,14	35	13	35	0,56
	0,15	20	20	0,11	0,15	0,57	12	0,33	40	0,14	40	13	40	0,56
	0,20	20	35	0,12	0,20	0,57	15	0,40	400	0,27	400	16	400	0,84
	0,25	22	50	0,15	0,25	0,57	18	0,50	650	0,28	650	18	650	0,68
	0,30	25	65	0,20	0,30	0,50	20	0,50	900	0,30	900	21	900	0,29
Апрель	0,10	20	5	0,26	0,10	0,66	10	0,33	35	0,14	35	13	35	0,56
	0,15	18	20	0,21	0,15	0,68	12	0,33	40	0,14	40	13	40	0,56
	0,20	15	35	0,11	0,20	0,73	15	0,28	400	0,27	400	13	400	0,85
	0,25	11	50	0,16	0,25	0,73	18	0,36	650	0,27	650	18	650	0,46
	0,30	11	65	0,19	0,30	0,83	20	0,47	900	0,29	900	16	900	0,27
Май	0,10	13	5	0,27	0,10	0,86	10	0,35	35	0,15	35	14	35	0,55
	0,15	12	20	0,27	0,15	0,88	12	0,28	40	0,15	40	14	40	0,55
	0,20	11	35	0,25	0,20	0,79	15	0,28	400	0,27	400	13	400	0,69
	0,25	11	50	0,26	0,25	0,70	18	0,36	650	0,29	650	18	650	0,46
	0,30	11	65	0,27	0,30	0,88	20	0,33	900	0,29	900	13	900	0,27
Июнь	0,10	50	5	0,29	0,10	0,81	10	0,50	35	0,20	35	18	35	0,54
	0,15	50	20	0,27	0,15	0,48	12	0,50	40	0,20	40	18	40	0,53
	0,20	50	35	0,27	0,20	0,28	15	0,50	400	0,27	400	13	400	0,32
	0,25	49	50	0,27	0,25	0,25	18	0,50	650	0,29	650	18	650	0,46
	0,30	46	65	0,27	0,30	0,19	20	0,42	900	0,29	900	13	900	0,27

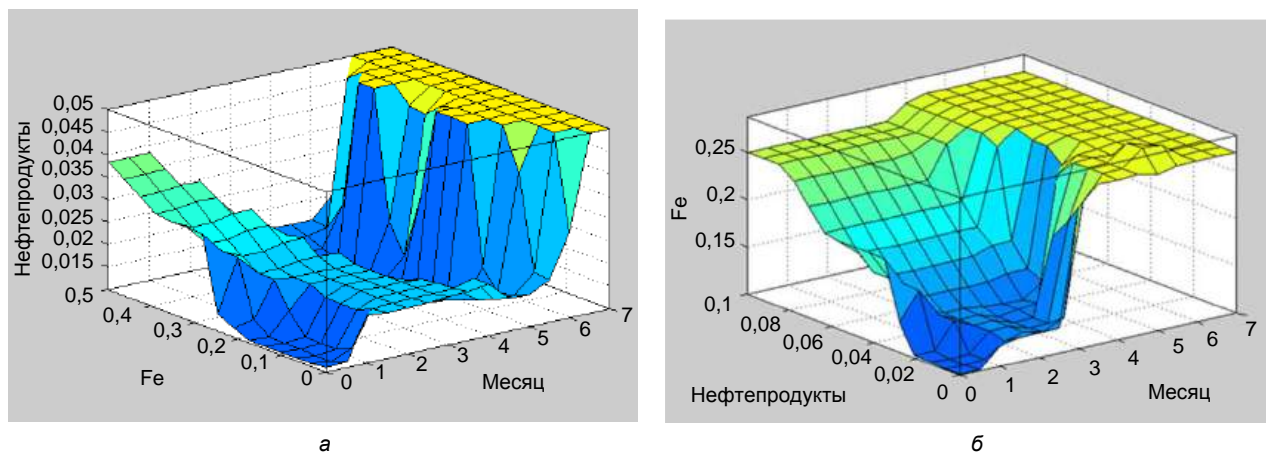


Рис. 5. Концентрация нефтепродуктов в воде как функция содержания железа (а) и обратная зависимость (б) железа от нефти с учетом времени года

Более детально судить о причинах обнаруженных зависимостей между  $\bar{C}(\text{Fe})$  и  $\bar{C}(\text{Oil})$  могут специалисты-гидрологи. Здесь же можно обратить внимание на сезонные колебания состава сбросов в реку Чусовского металлургического завода, а также на возможное неупорядоченное влияние на качество воды утечки нефти из-за повреждений нефтепровода, проходящего в непосредственной близости от пункта наблюдения.

Аналогичными методами НЛ на основании заданных функций принадлежности, баз правил и данных табл. 1 можно решить и остальные поставленные авторами задачи исследования и прогноза взаимного влияния перечисленных характеристик качества и расхода воды. Результаты приведены в табл. 3. Для задачи 2 (влияние  $\bar{C}(\text{NH}_4)$  на  $\bar{C}(\text{NO}_3)$ ) — в столбцах 6, 7; задачи 3 показано влияния  $\overline{\text{ХПК}}$  на  $\overline{\text{БПК}_5}$  — в столбцах 8, 9; задачи 4: влияния  $\bar{Q}$  на  $\bar{C}(\text{Fe})$ ,  $\bar{C}(\text{Oil})$   $\bar{C}(\text{NO}_3)$  — в столбцах 10—15.

Полученные результаты требуют оценки специалистов, ответственных за принятие управленческих решений. Любопытно, однако, что в отличие от описанных зависимостей между содержанием железа и нефтепродуктов, стабильное и пониженное содержание нитрата зимой не зависит от концентрации аммония, но возрастает весной, особенно в мае в случае высокого содержания этого катиона. Летом же содержание нитрата резко, в 2—4 раза, снижается, причем, опять при повышенной концентрации аммония. Можно предположить, что такова роль органических веществ, в результате разложения которых в природной воде появляются аммиак и другие азотсодержащие соединения.

Из табл. 3 следует некоторая взаимосвязь химического ( $\overline{\text{ХПК}}$ ) и биологического ( $\overline{\text{БПК}_5}$ ) содержания кислорода, где первый показатель характеризует восстановительную активность любых химических веществ, а второй — веществ, относящихся исключительно к биохимически разлагающейся органике. Тем самым подтверждается вывод [8] о том, что можно использовать результаты оценки  $\overline{\text{ХПК}}$  для прогнозирования концентрации  $\overline{\text{БПК}_5}$ . Впрочем, из данных

табл. 3 следует, что это не всегда так, поскольку определяющее влияние могут оказывать времена года. Во всяком случае, в июне месяце зависимость  $\overline{\text{БПК}_5}$  от  $\overline{\text{ХПК}}$  на данном створе реки Чусовой оказалась минимальной. Этот результат может быть связан с повышенным загрязнением водного объекта бытовыми сточными водами.

Представляют определенный интерес полученные зависимости показателей качества воды от ее расхода. Из столбцов 10 и 11 табл. 3 видно, что в данной системе установленных правил НЛ концентрация железа возрастает практически вдвое с более чем 25-кратным ростом расхода воды. Особенно отчетливо этот процесс может быть замечен зимой при маловероятном условии того, что этот расход повысится до уровня половодья. Таков результат временного (сезонного) ухудшения качества воды из-за поступления избыточного количества загрязнений. Впрочем, это мало касается нефтепродуктов, концентрация которых хотя и возрастает с ростом расхода зимой, но практически стабилизируется с приближением лета. В июне месяце даже наблюдается тенденция, противоположная зимней. Еще своеобразнее ведет себя нитрат-ион, концентрация которого, как правило, понижена при высоких и малых ожидаемых расходах воды, и повышена при промежуточных значениях  $\bar{Q}$ .

## Заключение

В данной работе показаны возможности НЛ для оценки и прогноза качества природной воды в условиях реально существующей неопределенности измерительных водно-экологических данных. Работа проиллюстрирована конкретными исследованиями качества воды на реке Чусовой с использованием модуля Fuzzy Logic Toolbox пакета программ MatLab.

Показано, что такой подход позволяет учесть обычные статистические данные (табл. 1), а также индивидуальные мнения экспертов (табл. 2), которые могут быть расплывчатыми, но НЛ-методом формализуются достаточно строго. В результате появляется возможность построить заключения, более достоверные по сравнению с теми, которые могут быть



сделаны на основании непосредственного использования результатов контроля (мониторинга) качества воды.

Подчеркнем, что анализ оценок, рассчитанных НЛ-методами (табл. 3), и их использование для принятия водохозяйственных решений не может быть выполнено без специалистов-гидрологов и водопользователей. Они являются теми экспертами, на основе знаний которых формируются нечеткие выводы и соответствующие им прогнозы.

---

*Работа выполнена в рамках Государственного задания ФГБУН Института водных проблем РАН (тема № FMWZ-2022-0003).*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов-Данильян В. И., Хранович И. Л. Управление водными ресурсами. Согласование стратегий водопользования. — М.: Научный мир, 2010. — 232 с.
2. Розенталь О. М., Авербух А. И. Введение в квалиметрию воды // Водные ресурсы. 2013. Т. 40. № 4. С. 418—432.
3. George M. L. (2003): Lean Six Sigma for Service. How to Use Lean Speed & Six Sigma Quality to Improve Services and Transactions. — N. Y.: McGraw-Hill Co. — 386 p.
4. ИСО 5667-1:2006 Качество воды. Отбор проб. Часть 1. Руководство по составлению программ и методикам отбора проб.
5. ГОСТ Р 8.731-2010 Государственная система обеспечения единства измерений. Системы допускового контроля. Основные положения.
6. Леоненков А. В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. — СПб: БХВ-Петербург, 2003. — 736 с.
7. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. — М: Горячая линия—Телеком, 2007. — 288 с.
8. Винберг Г. Г. Разнообразие и единство жизненно важных явлений и количественных методов в биологии // Журнал общей биологии. 2000. Т. 61(5). С. 549—560.

## Water-ecological research and forecast of river water quality by fuzzy logic methods

O. M. ROSENTAL

Institute of Water Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

V. KH. FEDOTOV

I. N. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia

*It is proposed to use alternative methods of fuzzy logic, which have demonstrated their usefulness in different subject areas, of course, taking into account uncertainty factors. These methods make it possible to evaluate and predict the probabilities of certain events based on a set of rules that allow taking into account not only official statistics, but also the individual experience of professional experts. An example of calculating the forecast values of water quality indicators in the Chusovaya river using a fuzzy assessment of concentrations of various pollutants is given.*

**Keywords:** natural water quality, water-ecological information, fuzzy logic methods, probability forecast, water management solutions, expert opinions.

Bibliography — 8 references.

Received April 17, 2023

Экология промышленного производства: Межотр. науч.-практ. журнал / ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас», 2023. Вып. 3. С. 1—68.

Компьютерная верстка: *Н. В. Ильина, К. В. Трыкина*

Подписано в печать 26.08.2023.

Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 7,9. Уч.-изд. л. 8,2.

Тираж 250 экз. Заказ 2020.

Свободная цена.

Адрес редакции: 125424, Москва,  
Волоколамское ш., 77.

ФГУП «НТЦ оборонного комплекса «Компас».

<http://ntckompas.ru>

Отпечатано: 101000, Москва,

Лубянский проезд, д. 15, стр. 4, помещ. IX, ком. 15, 16

ООО «Спиди-Принт.ру»

Индекс 80090.