

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ПОЧВ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ (НА ПРИМЕРЕ г.ОБНИНСКА)

Н.Н. Павлова, Ю.В. Кулиш

Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ «МИФИ», г. Обнинск



Проведен комплексный анализ пространственно-временных изменений биологической активности почв в районе расположения предприятия атомной энергетики. Найдены зависимости изменения ферментативной активности от содержания в почве ряда тяжелых металлов, радионуклидов, органического вещества, кислотности и механического состава почв. Оценен вклад этих факторов в пространственную вариабельность биологических показателей, выявлены многолетние направленные тренды, дающие представление о динамике функционирования почвенной биоты.

Ключевые слова: биологическая активность почв, экологический мониторинг, радионуклиды, тяжелые металлы.

Key words: soil biological activity, ecological monitoring, radionuclides, heavy metals.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема экологии малых городов, которые характеризуются низким уровнем техногенного загрязнения, не стоит особенно остро на фоне глобальных экологических проблем. Однако регулярный мониторинг и поиск удобных и надежных систем контроля состояния окружающей среды для своевременного принятия управленческих решений весьма актуальны как в научном, так и в практическом плане.

В качестве модели для выявления закономерностей изменения экологического состояния малых городов был выбран г.Обнинск Калужской области, который является уникальным научным городом, расположенным в 100 км к юго-западу от Москвы. Градообразующим предприятием является ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт, на территории которого уже более 60-ти лет действует ряд производств, связанных с обоснованием и разработкой объектов атомной энергетики. В Обнинске расположены четырнадцать научно-исследовательских учреждений, работа большинства из которых связана с атомной энергетикой и радиационны-

ми технологиями. В городскую черту входит промзона, выбросы предприятий которой являются источниками загрязнения, в том числе тяжелыми металлами (ТМ). В Обнинске на 100 тыс. человек зарегистрировано 32 тыс. автомашин. Рядом с Обнинском проходит киевская автотрасса федерального значения, интенсивность движения по которой в час пик достигает 200 автомашин в минуту, и железная дорога, также характеризующаяся интенсивным движением [8].

Почва является одним из основных аккумуляторов загрязняющих веществ. Все виды антропогенной деградации почв сказываются на состоянии почвенных микроорганизмов, вызывая изменение функциональной и биохимической активности биоты [9]. В литературе имеется огромное множество сведений о влиянии тяжелых металлов и радионуклидов на изменение биологической, в первую очередь, ферментативной активности почв [4, 5, 11, 13].

Цель работы заключалась в изучении закономерностей пространственно-временных изменений биологической активности почв на территории г. Обнинска и его окрестностей.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Оценку биологической активности почв г. Обнинска проводили в 2002–2010 гг. Отбор образцов почв осуществляли в относительно нетронутых экотопах стандартным методом конверта с глубины 0–10 см в июне каждого года в 60-ти рандомизированно выбранных точках на территории санитарно-защитной зоны (СЗЗ) ГНЦ РФ-ФЭИ, вблизи хранилища радиоактивных отходов (РАО), очистных сооружений города, вдоль основных улиц не далее 10–20 м от проезжей части, в лесных массивах, скверах, парках и дворах. Почвы исследуемой территории дерново-подзолистые [1].

В образцах почв анализировали содержание тяжелых металлов Cd, Cu, Pb атомно-абсорбционным методом [15, 16], удельную активность ^{137}Cs – гамма-спектрометрическим методом [14], актуальную и потенциальную кислотность – потенциометрическим методом, механический состав – по методу Рутковского и содержание органического вещества – методом прокаливания [6, 18]. Анализ биологической активности почв проводили по изменению таких ферментативных показателей как дегидрогеназная, каталазная, уреазная и инвертазная активности газометрическим и фотоколориметрическими методами [20].

Результаты обработаны статистически методом наименьших квадратов с использованием корреляционного и регрессионного анализа. Для поиска оптимальных регрессионных моделей использовали метод пошаговой регрессии с последовательным включением независимых переменных. Оценку средних значений биологических и химических показателей, дисперсий, стандартных отклонений и достоверных интервалов проводили стандартными статистическими методами [3].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлена динамика изменения исследуемых биологических показателей, усредненных для каждого фермента по точкам пробоотбора. Видно, что показатели каталазной (а) и инвертазной (б) активностей достоверно снижаются во времени. Активность уреазы (в) после существенного повышения в 2005 г. резко снижается в 2006–2010 гг. Активность дегидрогеназ (г) на протяжении всего периода наблюдения повышается. Таким образом, наблюдается рост активности дыхательных ферментов (дегидрогеназ) и снижение активности гидролаз (инвертазы, уреазы), что может косвенно указывать на снижение влияния аэрозольного загрязнения почв и «заглубление» накопленных токсичных веществ.

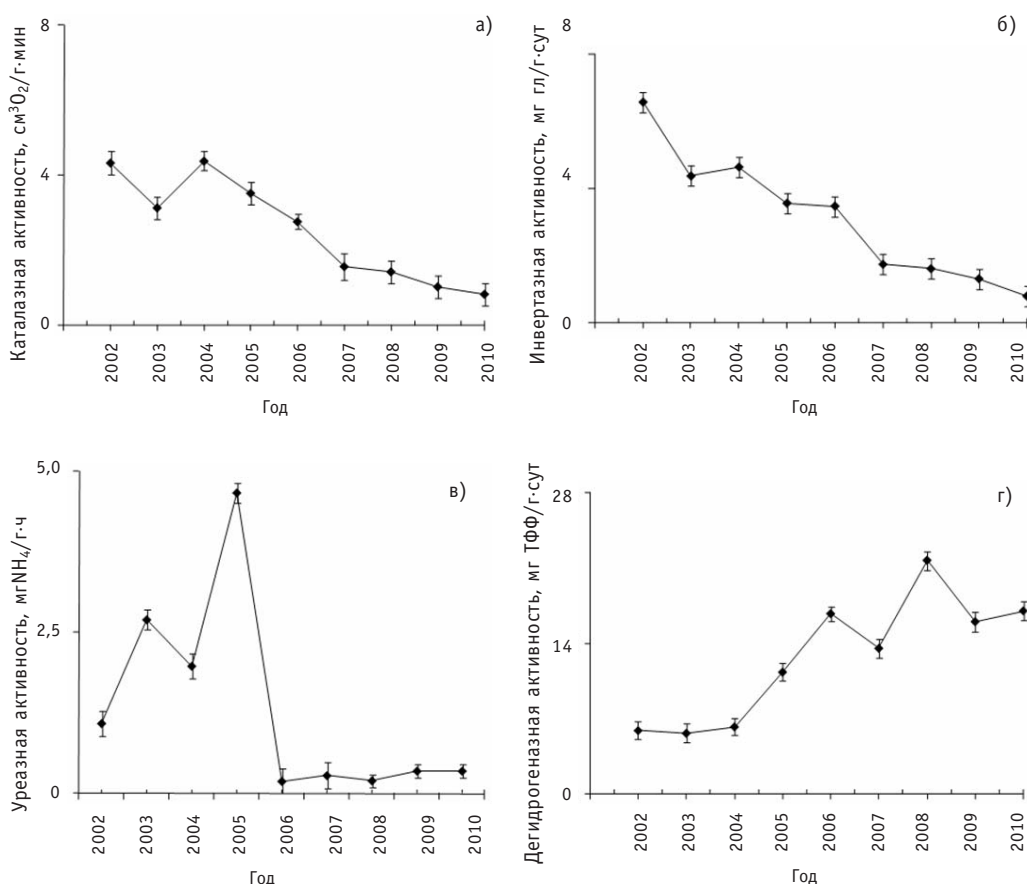


Рис. 1. Динамика во времени изменения каталязой (а), инвертазой (б), уреазой (в) и дегидрогеназой (г) активностей почв г.Обнинска в 2002–2010 гг.

Для выяснения причин изменения биологической активности нами по ежегодным отчетам Министерства природных ресурсов и экологии РФ за 2001–2009 гг. [17] проведен анализ динамики выбросов в атмосферу г.Обнинска вредных химических веществ и радионуклидов, которые локализуются в почвенных горизонтах. За анализируемый период серьезных аварийных ситуаций на исследуемой территории не зафиксировано. Уровни загрязнения основными поллютантами территории г.Обнинска и сопредельных территорий не превышали допустимых значений [17, 19].

Отделом РБ и ООС ФЭИ был проведен гамма-спектрометрический анализ уровней удельной активности ^{137}Cs в исследуемых образцах почв, который показал изменения от 1,8–17,0 Бк/кг в районе города до 23,0–33,0 Бк/кг в СЗЗ ФЭИ и в районе хранилища РАО. Эти значения превышают уровень удельной активности ^{137}Cs дерново-подзолистых почв (1,5 Бк/кг), расположенных в заповедной зоне [12]. Однако проведенный регрессионный анализ не выявил достоверной зависимости изменения исследуемых биологических показателей от загрязнения почв радиоцезием.

Оценка загрязнения городских почв ТМ показала, что содержание кадмия на всей исследуемой территории варьировало в период наблюдения от 0,1 до 6,6 мг/кг, свинца – от 0,04 до 16,6 мг/кг, меди – от 0,03 до 10,8 мг/кг. В шести точках отбора проб содержание ТМ превышало предельно допустимые концент-

рации (ПДК) в среднем в 1,5–3 раза по каждому металлу. Причем в 40% этих загрязненных проб обнаружено сочетанное загрязнение по двум металлам (превышение ПДК в 2–3 раза по каждому). Большая часть загрязнения локализована в промышленной зоне (четыре точки), две точки с превышением ПДК выявлено в придорожной зоне. Полученные данные позволили характеризовать уровень загрязнения почв исследуемой территории как низкий.

Построенная простая линейная регрессионная модель связала с действием ТМ не более 15% изменений биологической активности почв ($r = 0.394$). Коэффициент множественной корреляции, полученный методом пошаговой линейной регрессии, был равен $r = 0,499$. С учетом нелинейности отклика биологических систем на загрязнение не более 25% изменений показателей ферментативной активности почв можно связать с действием ТМ.

Полученный за весь период наблюдения массив биологических данных нормировали к среднему значению по каждому году исследования. Весь массив данных по ТМ в исследуемых почвах нормировали к среднему содержанию каждого металла во всех образцах. Нормировку проводили, чтобы убрать межгодовые тренды и провести анализ пространственных изменений биологической активности почв.

Методом кластерного анализа на исследуемой территории было выделено пять зон с разным характером ферментативной активности почв. Однако выделенные группы не имели четкой пространственной локализации, и даже самые контрастные по загрязнению зоны заметно перекрывались.

Для выявления вклада загрязнения территории ТМ в динамику ферментативной активности почв были сопоставлены изменения биологических показателей не только по годам, но и между точками пробоотбора внутри каждой зоны и между зонами. Анализировали нормированные показатели. Результаты исследования, проведенного иерархическим дисперсионным методом, представлены в табл. 1.

Видно, что наибольший вклад в изменения ферментативной активности вносит мелкомасштабная пространственная вариабельность (различия в значениях биологических показателей между точками пробоотбора внутри зон). В среднем по всем ферментным системам она составляет 43%. Межгодовые изменения вносят в среднем 30-процентный вклад в общую изменчивость, а различия между зонами не более 18%. Проведенные исследования продемонстрировали, что биологическая активность почв исследуемого района динамично изменяется как во времени, так и в пространстве. Возможно, имеющиеся на исследуемой территории уровни загрязнения ТМ не оказывают доминирующего влияния на изменение выбранных нами показателей биологической активности почв, и выявленные многолетние тренды (см. рис. 1) зависят не только от техногенного загрязнения.

Таблица 1

Доля вариабельности показателей ферментативной активности почв

Показатель ферментативной активности почв	Источник вариаций			
	Межгодовые, %	Пространственные, %		Необъясненная дисперсия (ошибка), %
		между зонами	внутри зоны	
Каталазная	29,1	24,4	36,1	10,4
Инвертазная	53,6	17,3	22,9	6,1
Уреазная	17,8	8,8	68,0	5,5
Дегидрогеназная	19,3	24,4	44,0	12,3

Для оценки вклада природных составляющих в изменения биологической активности исследуемых почв были проанализированы результаты изменения кислотности почв, содержания органического вещества и механического состава. Обнаружено, что в 40% исследуемых образцов почв pH смещена в щелочную область, в 60% – в кислую. По данным, приведенным в [8], на территории Калужской области преобладают кислые почвы с pH 5,1–5,9. Химические свойства городских почв и, в первую очередь, кислотность обычно отличаются от соответствующих показателей в естественных почвах [2]. Различия обусловлены как особенностями строения профиля городских почв, так и процессами, вызванными техногенным воздействием на почвы (загрязнение ТМ, хлорорганическими соединениями и др.). Для городских почв характерны изменения pH в сторону подщелачивания, вызванные попаданием в почву хлоридов кальция и натрия в результате посыпания ими зимой дорог и тротуаров; высвобождением кальция из различных строительных материалов и отходов (известь, цемент, кирпич, строительный мусор и т.п.), что характерно, например, для промышленной зоны г.Обнинска. Известно, что сдвиг pH в щелочную сторону приводит к изменению физико-химических, геохимических и биологических процессов в почвенном профиле [10]. В гумусовых горизонтах увеличивается содержание обменных катионов, что приводит к повышению буферности почв. Возрастает поглощательная способность, и уменьшается вынос загрязняющих веществ. Наблюдается образование вторичных минералов, уменьшение или полное прекращение миграции коллоидов из верхних горизонтов и утяжеление гранулометрического состава. Известно также, что подщелачивание почв снижает подвижность большинства тяжелых металлов, их доступность растениям и поступление в грунтовые воды. Основные почвенные компоненты – органическое вещество, железистые и глинистые минералы во многом определяют способность почвы к прочному закреплению металлов и снижению их миграционной способности, а также биологической доступности [7].

Для изучения влияния кислотности на изменение биологической активности исследуемых почв была проведена оценка корреляционных связей. Результаты показали, что с кислотностью почв достоверно положительно коррелирует дегидрогеназная активность. Однако следует подчеркнуть, что коэффициент корреляции между изменением активности дегидрогеназы и кислотностью в исследуемых почвах является значимым, но невысоким ($r = 0,37$). Тем не менее, этот факт необходимо принимать во внимание при проведении экологического мониторинга. По всем остальным исследуемым показателям биологической активности почв зависимости их изменений от pH не выявлено.

Содержание органического вещества в исследуемых образцах изменяется от 4 до 10%. По механическому составу в 70% точек пробоотбора почва супесчаная и в 30% – легкосуглинистая.

С помощью регрессионного анализа нами изучен вклад исследованных техногенных (ТМ) и природных (pH, органическое вещество и механический состав) факторов в изменение ферментативной активности почв г.Обнинска. В таблице 2 приведены регрессионные модели, которые наиболее полно описывают изменения биологических показателей.

Анализ регрессионных моделей показал, что органическое вещество на щелочных почвах оказывает стимулирующее влияние на все анализируемые нами биологические показатели. На кислых почвах с ростом содержания органики снижаются дегидрогеназная, инвертазная и уреазная активности. Частицы крупных фракций ($>0,5$ мм) влияют на снижение каталазной активности, а глинистые фракции – на снижение активности дегидрогеназ. Суммарное содержание исследуемых ТМ

Таблица 2

Зависимость изменений ферментативной активности почв от техногенных и природных факторов

Показатель биологической активности почв	Регрессионная модель	$D, \%$	r
Каталазная	$0,10 \cdot C_{\text{орг. вещ.-ва}} - 0,03 \cdot C_{\text{круп. фр.}}$	25	0,50
Инвертазная	$0,04 \cdot C_{\text{орг. вещ.-ва}} \cdot (K - 7,2) - 0,37 \cdot C_{\text{TM}}$	37	0,61
Уреазная	$0,02 \cdot C_{\text{орг. вещ.-ва}} \cdot (K - 7,0) - 0,05 \cdot C_{\text{TM}}$	41	0,64
Дегидрогеназная	$0,53 \cdot C_{\text{орг. вещ.-ва}} \cdot (K - 5,31) - 1,9 \cdot C_{\text{глин. фр.}} - 3,93 \cdot C_{\text{TM}}$	55	0,74

$C_{\text{круп. фр.}}$ – содержание частиц крупных фракций; $C_{\text{глин. фр.}}$ – содержание частиц глинистых фракций; $C_{\text{орг. вещ.-ва}}$ – содержание органического вещества; K – актуальная кислотность; C_{TM} – суммарное содержание тяжелых металлов; D – доля объясненной дисперсии; r – коэффициент корреляции

достоверно снижает активность всех рассматриваемых ферментных систем кроме каталазной, изменение активности которой нельзя связать с техногенным загрязнением.

Из таблицы 2 видно, что построенные регрессионные модели объясняют от 25 до 55% общей вариабельности ферментативной активности почв исследуемой территории.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Биологическая активность почв г. Обнинска и его окрестностей характеризуется выраженными пространственно-временными изменениями. Основной вклад в эти изменения вносит мелкомасштабная пространственная мозаичность исследованных биологических показателей, связанная с локальными (в пределах точек пробоотбора) особенностями почв (содержание органического вещества, механический состав, кислотность). Исследованная территория характеризуется низким уровнем загрязнения тяжелыми металлами (Cu, Pb и Cd), что оказывает слабое влияние на биологическую активность почв. Эффекты загрязнения маскируются локальными особенностями почв в точках пробоотбора. Статистически значимое влияние загрязнения исследуемых почв радиоцезием на биологическую активность почв не выявлено. Однако на фоне пространственной мозаичности наблюдаются устойчивые направленные многолетние изменения (тренды) показателей биологической активности почв, косвенно характеризующие снижение влияния аэрозольного загрязнения и «заглубление» накопленных токсичных веществ.

Выявленные на примере почв г. Обнинска закономерности могут быть использованы при экологическом мониторинге городских территорий с низким уровнем загрязнения.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают признательность начальнику отдела РБ и ООС ФЭИ В.И. Вайзеру за гамма-спектрометрический анализ удельной активности радиоцезия в исследуемых образцах почв, а также профессору С.В. Круглову за содействие в оценке тяжелых металлов. Авторы благодарны студентам кафедры биологии ИАТЭ НИЯУ МИФИ Н.В. Дмитриевой, М.В. Казаченко за участие в научно-поисковой работе и доценту кафедры биологии Е.И. Сарапульцевой за дискуссии по исследуемому вопросу. Автор выражает признательность д.б.н., доценту МГУ А.И. Азовскому за профессиональные консультации по статистической обработке массива полученных данных.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

Литература

1. Афанасьева Т.В., Василенко В.И., Терешина Т.В., Шеремет Б.В. Почвы СССР / Под ред. Г.В. Добровольского. – М.: Изд-во «Мысль», 1979. – 380 с.
2. Глазовская Н.Ф. Геохимия природных и техногенных ландшафтов СССР. – М.: Высшая школа, 1988. – 287 с.
3. Гланц С. Медико-биологическая статистика / Пер. с англ. – М.: Практика, 1999. – 459 с.
4. Денисова Т.В., Казеев К.Ш., Колесников С.И. и др. Влияние гамма-излучения на биологические свойства почв (на примере чернозема обыкновенного) // Почвоведение. – 2005. – № 7. – С. 877–881.
5. Денисова Т.В., Казеев К.Ш. Восстановление ферментативной активности чернозема после воздействия гамма-излучения // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2006. – Т. 46. – № 1. – С. 89–93.
6. Добровольский В.В. Практикум по географии почв с основами почвоведения. – М.: Просвещение, 1982. – 146 с.
7. Добровольский В.В. Биосферные циклы тяжелых металлов и регуляторная роль почвы // Почвоведение. – 1997. – № 4. – С. 431–441.
8. Доклад о состоянии природных ресурсов и охране окружающей среды на территории Калужской области в 2002–2008 гг. Калуга: Манускрипт, 2002–2008. – 336 с.
9. Звягинцев Д.Г., Бабьева И.П., Зенова Г.М. Биология почв: Учебник. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во МГУ, 2005. – 445 с.
10. Касимов Н.С., Перельман А.И. О геохимии почв // Почвоведение. – 1992. – № 2. – С. 9–26.
11. Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Экологические функции почв и влияние на них загрязнения тяжелыми металлами // Почвоведение. – 2002. – № 12. – С. 1509–1514.
12. Коренков И.П., Прозоров Л.Б., Шатохин А.М., Егоров А.В. Рентгеноспектрометрический метод определения плутония в почве, грунтах и донных отложениях // Гигиена и санитария. – 2006. – № 2. – С. 72–75.
13. Ладонин Д.В., Карпущин М.М. Влияние основных почвенных комплексов на поглощение Cu , Zn и Pb городскими почвами // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. – 2008. – № 3. – С. 33–38.
14. МУ «Методика выполнения измерений содержания гамма-излучающих радионуклидов на сцинтилляционных и полупроводниковых гамма-спектрометрах». – Обнинск: НПП «Радиационный контроль», 1994. – 48 с.
15. Методические указания по определению микроэлементов в почвах, кормах и растениях методом атомно-абсорбционной спектроскопии. – М.: ЦИНАО, 1985. – 96 с.
16. Методические указания по определению тяжелых металлов в кормах и растениях и их подвижных соединений в почвах. Изд-е 2-е перераб. и доп. – М.: ЦИНАО, 1992. – 62 с.
17. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2002–2008 гг. Ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. – Обнинск: Росгидромет, НПО «Тайфун», 2003–2008.
18. Роуэлл Д.Л. Почвоведение: методы и использование / Пер. с англ. Е.К. Кубиковой; под ред. и с предисл. Б.Н. Золотаревой. – М.: Колос, 1998. – 486 с.
19. Силин И.И. Экология и экономика природных ресурсов бассейна р. Протвы. (Московская и Калужская области). – Калуга, 2003. – 323 с.
20. Хазиев Ф.Х. Методы почвенной энзимологии. – М.: Наука, 1990. – 189 с.

Поступила в редакцию 4.10.2010

problems solution. Authors describe the results of parametric uncertainty analysis for concerned process calculation on KORSAR/GP program code.

УДК 504.064: 631.438

Monitoring Network Optimization on Radioactively Contaminated Territory with the use of Multiobjective Genetic Algorithms and Neural Nets \S.V. Gritsyuk, B.I. Yatsalo, G.I. Afanasev, I.A. Pichugina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 12 pages, 4 tables, 4 illustrations. – References, 29 titles.

Optimization of monitoring network structure for radioactively contaminated territory is considered based on multiobjective optimization with implementation of modified genetic algorithms integrated with neural network. Geographic information system (GIS) of contaminated territory is used within the case study on monitoring network optimization. This work demonstrates effectiveness of integration of multiobjective genetic algorithms with neural networks and GIS within the problems on environmental protection and remediation of contaminated sites.

УДК 502.52:631.4

Patterns of Spatial and Temporal Changes in Soil Biological Activity in the Location of Nuclear Power Plants (on Example of Obninsk-city Soils) \N.N. Pavlova, Yu.V. Kulish; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 2 tables, 1 illustration. – References, 20 titles.

Comprehensive analysis of the spatial and temporal changes in soil biological activity at the location of nuclear power plants was carried out. Found the variation of the enzymatic activity of microbial content in the soil of some heavy metals, radionuclides and organic substances, indicators of acidity and texture of the soil. The contribution of these factors in the spatial variability of biological indicators identified long-term trend direction, giving an idea about the dynamics of the functioning of soil biota.

УДК 621.039.54

Methods Development for Economical Advantages Investigation of VVER-Type Reactors Closed Fuel Cycle \N.I. Geraskin, N.A. Piskunova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 1 table. – References, 5 titles.

The method offered in the article enables to evaluate the economical expediency of enclosing light water reactors fuel cycle in such a way that the obtained results have minimal dependence on three main parameters with most uncertain values – the costs of natural uranium, enrichment and spent fuel reprocessing. Economic expediency criterion for fuel cycle enclosing has been derived from comparison of the electric energy cost fuel factor in the closed and the open fuel cycle. There are also presented the results of this method application for investigation of economical advantages of VVER-1000 reactor closed fuel cycles with uranium and plutonium fuel.

УДК 621.039.543.6

Developing Mathematical Model for Nuclear Energy Fuel Cycle Based on Thermal and Fast Reactors \V.M. Dekusar, V.S. Kagramanyan, A.G. Kalashnikov, V.V. Korobeynikov, V.E. Korobitsyn, D.A. Klinov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 14 pages, 3 tables, 13 illustrations. – References, 14 titles.

The paper describes a nuclear energy (NE) model and computer code CYCLE modules developed for this particular NE pattern. The modules developed enable to model the NE system operating in both open and closed cycles. The current research considers partially closed fuel cycle in terms of Pu and regenerated Uranium. Here it has been assumed that Pu produced by Uranium fueled thermal reactors (VVER in particular) after being cooled down due to keeping irradiated fuel in spent fuel pool and regenerating fuel is 100% used to start and maintain operation of the same reactor types fueled with MOX.

The paper discusses comparable results obtained for VVER-1000 reactor based open fuel cycle and those obtained for partially closed in terms of Pu and regenerated U fuel cycle based on U reactors and VVER-1000 reactor types fueled with MOX of the same installed power.

U-fueled and MOX-fueled reactors ratio has been determined by Pu balance. Mass and ecological fuel cycle parameters as well as the amounts accumulated in spent fuel storages and final repositories have been analyzed and compared.