

УДК 574.4:539.163:51-76

**Сергей Александрович Калининко¹, Роман Алексеевич Ненашев²,
Александр Николаевич Никитин³**

¹канд. биол. наук, ведущий науч. сотрудник отдела радиационно-экологического мониторинга
Полесского государственного радиационно-экологического заповедника

²ст. науч. сотрудник отдела радиационно-экологического мониторинга
Полесского государственного радиационно-экологического заповедника

³канд. с.-х. наук, зав. лабораторией радиоэкологии, зам. директора по научной работе
Института радиобиологии Национальной академии наук Беларуси

Sergey Kalinichenko¹, Roman Nenashev², Aleksandr Nikitin³

¹PhD (Biology), Leading researcher of the Department of Radioecological monitoring of State Environmental Research Institution «Polesye State Radiation-Ecological Reserve»

²Senior researcher of the Department of Radioecological monitoring
of State Environmental Research Institution «Polesye State Radiation-Ecological Reserve»

³PhD (Agriculture), Deputy Director for scientific, Work head of the laboratory
of Radioecology of State Scientific Institution «Institute of Radiobiology
of the National Academy of Sciences of Belarus»

[e-mail: s-a-k@list.ru](mailto:s-a-k@list.ru)

ЛАТЕРАЛЬНАЯ МИГРАЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ ЧЕРНОБЫЛЬСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ В ПОЧВЕ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ

Изучены особенности латерального распределения ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am в верхнем слое почвы различных биогеоценозов на территории зоны отчуждения ЧАЭС. Было установлено, что наименьшими коэффициентами вариации количества ¹³⁷Cs в верхнем слое почвы отличался сосновый лес ($V = 25,7\%$), а наибольшими – березняк ($V = 27,4\%$). Это связано с различиями лесорастительных условий и режимов увлажнения. Наиболее высокая изменчивость содержания в верхнем слое почвы в лесных биогеоценозах характерна для ⁹⁰Sr ($V = 48,3-75,2\%$). Промежуточное положение в варьировании содержания ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ²⁴¹Am в почве наблюдается на залежном лугу, что зависит от структуры сформированного сообщества и отсутствия древесного яруса. В биогеоценозе со значительным для белорусского Полесья перепадом высот (15,1 м) больше всего в верхнем слое почвы также изменяется содержание ⁹⁰Sr ($V = 51,9\%$), меньше всего варьирует содержание ¹³⁷Cs (21,6%). Обнаружено снижение значений коэффициента вариации (V) со временем, прошедшим после аварии. Подтверждается логнормальный характер распределения в почве радионуклидов чернобыльских выпадений.

Ключевые слова: латеральная миграция, почва, коэффициент вариации, радионуклиды.

Lateral Migration of Radionuclides of the Chernobyl Origin in the Soil of Exclusion Zone

The features of the lateral distribution of ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am in the upper soil layer of various biogeocenoses in the territory of exclusion zone of the CNPP are studied. Established, that smallest coefficients of the variation of the quantity of the radionuclides ¹³⁷Cs in the soil differed the pine forest ($V=25,7\%$), and the greatest birch forest ($V = 27,4\%$). It is connected with distinctions of forest vegetation conditions and modes of moistening. The big variability of contents in the upper soil layer in forest biogeocenoses belongs ⁹⁰Sr ($V = 48,3- 75,2\%$). The intermediate position in change of quantity ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ²⁴¹Am in the soil is observed on former agricultural lands that depends on structure of the created community and lack of forest. In the biogeocenosis situated on the site with a significant for Belarusian Polesye difference in height (15,1 m) the activity of ⁹⁰Sr in the upper soil layer changes with a greater extent and has the coefficient of variation 51,9%. Variability of ¹³⁷Cs activity in the soil is much less ($V = 21,6\%$).

Key words: lateral redistribution, soil, coefficient of variation, radionuclides.

Введение

Особенностью поставленной ситуации, сложившейся на загрязненных территориях вследствие аварии на ЧАЭС, является высокая степень гетерогенности радиоактивных веществ, выброшенных из аварийного блока, по радионуклидному составу и физико-

химическим формам, миграционной среды и пространственного распределения радионуклидов на загрязненной территории. В настоящее время неоднородность распределения радионуклидов обусловлена вторичными процессами, связанными с горизонтальным переносом в пределах элементарных ландшафтов. Следовательно, радиоэкологическая обстановка загрязненных радионуклидами территорий определяется не только уровнем и количеством выпавших радиоактивных элементов с аэрозолями и частицами реакторного топлива, но также погоднo-климатическими и ландшафтными условиями, контролирующими биотическую и абиотическую миграцию радионуклидов. Формирование пространственного загрязнения поверхности почвы ближней зоны ЧАЭС является динамическим процессом, способным существенно изменить ситуацию с течением времени, прошедшего от момента выпадения радиоактивных осадков. Такие изменения зависят от ряда факторов как живой, так и неживой природы: погоднo-климатических воздействий, ландшафтной дифференциации, сукцессионных процессов, деятельности живых организмов [1–5]. В начальный период после аварии загрязнение почвы экосистем зоны отчуждения радионуклидами характеризовалось высоким коэффициентом вариации (V) (до 60 % и выше) [2; 3]. В настоящее время, по мнению многих авторов, значения V должны быть значительно ниже [6–10].

Изучение ландшафтной дифференциации техногенных радионуклидов остается актуальным при организации радиационного мониторинга и планировании реабилитационных мероприятий на загрязненных территориях. Ландшафтный анализ и оценка распределения радионуклидов являются важным элементом системы радиационной безопасности, направленной на оздоровление радиоэкологической обстановки [3; 4]. Немаловажным фактором при этом является тип и степень лесорастительного покрытия исследуемого биогеоценоза. Специфика перераспределения радионуклидов будет существенно различаться в зависимости от типа формирования верхнего органогенного слоя, где в качестве биологического материала может выступать как быстро разлагающаяся подстилка лиственного леса, так и мощная многолетняя и многослойная подстилка сосняка. Иначе происходит пространственное перераспределение радионуклидов на поверхности участков, лишенных лесорастительного покрытия (луга, залежи, суходолы) и участков, характеризующихся значительными колебаниями высот [6; 7].

В связи с этим основной целью наших исследований явился анализ степени варьирования распределения ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{241}Am в поверхностном слое почвы различных биогеоценозов зоны отчуждения ЧАЭС. В статье мы рассматриваем определяющие факторы как для начального периода выпадений, так и для отдаленного (восстановительного): тип лесопокровения или его отсутствие, степень увлажнения поверхностных слоев почвы и значительные перепады высот. Это в дальнейшем позволит выявить различия в процессах пространственной миграции и формирования гетерогенности распределения радионуклидов различных экосистем.

Материалы и методы исследований

Исследования были проведены в 2011–2019 гг. на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника в белорусском секторе зоны отчуждения ЧАЭС. Были изучены особенности горизонтального распределения ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{241}Am в почве биогеоценозов с различными лесорастительными условиями и существенным для Белорусского Полесья перепадом высот. Исследования проведены на территории гидроморфного смешанного лиственного леса с преобладанием березы (березняка), бывшего сельхозугодия (залежи) с автоморфным типом почвы, соснового леса с низким УГВ и урочища Ясева Гора с диапазоном колебания высот 15,2 м.

Все экспериментальные полигоны расположены в ближней зоне отчуждения ЧАЭС, в районе исследовательской станции «Масаны» на расстоянии около 10–12 км

от эпицентра аварии. При изучении пространственной неоднородности радиоактивных выпадений был использован метод вложенных квадратов. Размер экспериментальных полигонов составил 100×100 м. Внутри основной экспериментальной площадки были выбраны малые (размером 10×10 м), с которых проводился отбор смешанных образцов почвы стандартным пробоотборником диаметром 4 см на глубину 20 см. При этом одновременно были проведены измерения мощности дозы γ -излучения (МД) на высоте 1 м и 3–4 см от поверхности почвы при помощи дозиметра-радиометра МКС-1117 (EL117A). Исследование особенностей содержания ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{241}Am в подстилочном слое почвы экспериментальных полигонов было проведено по методу пересекающихся трансект. Полевые исследования были проведены в сухую погоду в весенний период до отрастания травянистой растительности.

В лабораторных условиях смешанные образцы почвы (5 уколов) высушивали при температуре 20–25 °С и гомогенизировали. Определение ^{137}Cs и ^{90}Sr проводили инструментальным методом на γ - β -спектрометре МКС-АТ1315 (Атомтех, Беларусь) с блоком детектирования для регистрации γ -излучения на основе сцинтилляционного кристалла NaI (Тl) размерами $\varnothing 63 \times 63$ мм. Для регистрации β -излучения использовался органический сцинтиллятор на основе полистирола, активированного паратерфинилом, размерами $\varnothing 128 \times 9$ мм. Определение ^{241}Am проводили на γ -спектрометре Canberra (Canberra Industries, Inc., USA) с детектором из особо чистого германия с композитным углеродным окном с регистрацией γ -излучения в диапазоне энергий 20–2000 кэВ. Ошибка измерений не менее 20 %. Анализ варьирования содержания радионуклидов в почве проводили при помощи коэффициента вариации К. Пирсона (V). Статистическая обработка результатов была проведена стандартными биометрическими методами (вариационная статистика и корреляционный анализ) [11].

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенные измерения МД на высоте 1 м в березняке показали невысокую вариабельность ($V = 11,9$ %). На высоте 3–4 см от поверхности почвы коэффициент вариации значений МД составил 18,7 %. При этом коэффициенты корреляции (r_{xy}) между МД на различной высоте и содержанием ^{137}Cs в почве значительно варьировали, что связано со сложным режимом увлажнения. Измерения МД на высоте 1 м на территории залежи показали $V = 8,5$ %, на высоте 3–4 см $V = 14,6$ %. Коэффициент корреляции (r_{xy}) с МД на высоте 1 м при этом составил 0,71. Среднее значение МД на высоте 1 м в сосновом лесу составило 3,27 мкЗв/ч, на поверхности почвы – 3,99 мкЗв/ч, коэффициент вариации при этом составил 5,5 %, на высоте 3–4 см от поверхности почвы $V = 9,5$ %. При этом r_{xy} с МД на высоте 1 м составляет 0,51. Коэффициент вариации значений МД на территории экспериментального полигона «Ясева гора» на высоте 3–4 см составил 12,3 %, на высоте 1 м от поверхности почвы вариабельность была еще несколько ниже ($V = 9,1$ %), что связано с нивелированием значений эманации от точечных источников с увеличением высоты. При этом коэффициент корреляции между значениями МД на высоте 1 м и на поверхности почвы составляет 0,79, что аналогично полученным нами данным для других экспериментальных полигонов.

Анализ МД на территории экспериментального полигона в березняке позволил судить о зависимости степени увлажнения поверхностных слоев почвы и лесопокрывания на формирование γ -фона в биогеоценозе. Наименьшие уровни МД характерны для сильно увлажненных или полностью покрытых водой залесенных почв. Заметное изменение радиационной обстановки происходило по мере выхода на сухие участки поверхности с травянистой растительностью и не имеющие высоких деревьев. На характер флуктуации МД влияют не только факторы обводнения и залесения территории, но и

процессы первоначального выпадения аэрозолей на поверхность с последующим перераспределением радионуклидов. Естественно предположить, что в начальный период аварии максимумом осадков характеризовались именно участки поверхности почвы, не покрытые лесом. Однако это не означает статический сценарий дальнейшего изменения радиоэкологической ситуации, когда наибольшее влияние оказывает исключительно физический распад. В ряде случаев в зависимости от гетерогенности микрорельефа, типа и свойств почвы, деятельности живых организмов латеральная миграция может существенно ускоряться и значительно изменять радиационную обстановку. В связи с этим имеет место большая вероятность, что в будущем гидроморфные участки лесной поверхности, покрытые древесной растительностью, могут содержать наибольший запас радиоактивности, никак себя не проявляющий, пока не изменится режим увлажнения.

Изменение значений МД на территории биогеоценоза залежного луга на поверхности почвы имеет высокую положительную корреляцию и схожую тенденцию проекционных следов с МД на высоте 1 м. Естественно, еще более высокая точность сходимости невозможна из-за увеличения интегральности формирования величины МД с высотой. На данном экспериментальном полигоне характер распределения уровней МД обусловлен в основном процессами первоначального выпадения аэрозолей на поверхность с последующим перераспределением радионуклидов с участием в нем биоты и климата. На момент радиоактивных выпадений данный участок представлял собой типичный агроценоз с минимальным набором травянистой растительности, вплоть до монокультуры. Это обстоятельство позволяет нам рассматривать данный полигон в качестве примера влияния естественных сукцессионных процессов на горизонтальное перераспределение радионуклидов за время, прошедшее с момента аварии, в отличие от участков, покрытых лесом. Гетерогенность микрорельефа и режим увлажнения в данном случае не могут оказывать существенного влияния на изменение радиационной обстановки, так как перепады высот незначительны и нивелируются роющей деятельностью копытных и других животных.

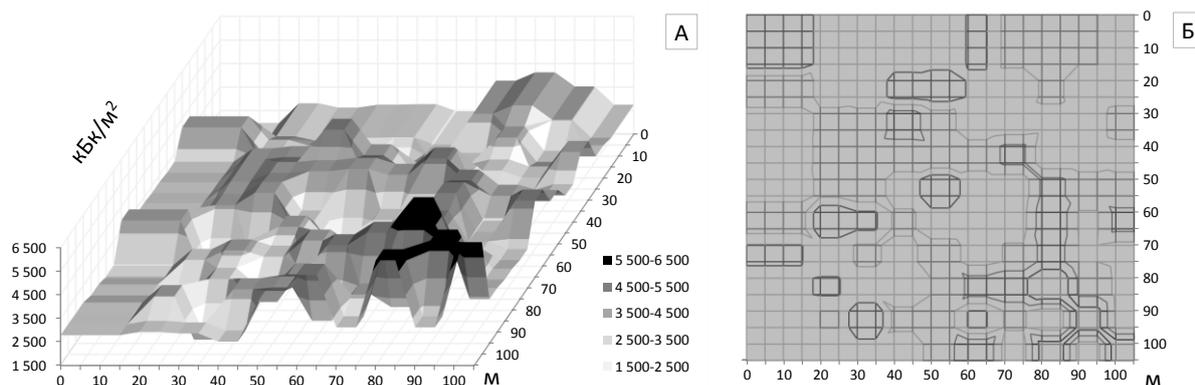
На экспериментальном полигоне в сосновом лесу с момента радиоактивных выпадений не происходило глобальных сукцессионных процессов, поэтому на горизонтальное перераспределение радионуклидов за время, прошедшее с момента аварии, влияли лишь естественные колебания в смене возрастной структуры леса, погодно-климатические условия и роющая деятельность животных. Гетерогенность микрорельефа и режим увлажнения сосняка также не могут в данном случае оказывать существенного влияния на изменение радиационной обстановки, т. к. перепады высот незначительны.

Формирование γ -фона на участке урочища Ясева Гора в значительной степени происходит под влиянием вторичного перераспределения радионуклидов в поверхностном слое почвы с течением времени, прошедшим с момента чернобыльских выпадений. Под действием ветров, атмосферных осадков, механического воздействия живых организмов и биогенной миграции на поверхности холма идет изменение микрорельефа поверхности, факторов биологической и химической трофности. Вместе с этим происходит вертикальное и горизонтальное перемещение радионуклидов, перераспределение их между различными типами смежных ландшафтов и образование градиентов концентраций при перепаде высот в понижениях и водоотводящих канавках. В результате этих процессов обычно наблюдается заметное снижение значений МД на вершине холма и увеличение на его склонах и в понижениях.

Оценка содержания радионуклидов в почве показала, что максимальные значения плотности загрязнения выбранного полигона на территории березняка составили: для ^{137}Cs – 6 315,2 кБк/м² (170,7 Ки/км²), для ^{90}Sr – 3 908,3 кБк/м² (105,6 Ки/км²), для ^{241}Am – 146,9 кБк/м² (4,0 Ки/км²). На территории залежи: для ^{137}Cs – 8 079,4 кБк/м² (212,4 Ки/км²), для ^{90}Sr – 4 550,9 кБк/м² (123,0 Ки/км²), для ^{241}Am – 148,9 кБк/м²

(4,0 Ки/км²). В почве соснового леса: для ¹³⁷Cs – 5 820,9 кБк/м² (157,3 Ки/км²), для ⁹⁰Sr – 2 109,9 кБк/м² (57,0 Ки/км²), для ²⁴¹Am – 133,0 кБк/м² (3,6 Ки/км²). Максимальные же значения содержания радионуклидов в поверхностном слое почвы полигона на территории урочища Ясева Гора составили: для ¹³⁷Cs – 6 342,7 кБк/м² (171,4 Ки/км²), для ⁹⁰Sr – 1 779,6 кБк/м² (48,1 Ки/км²), для ²⁴¹Am – 184,7 кБк/м² (5,0 Ки/км²).

Анализ латеральной дифференциации ¹³⁷Cs в верхнем 20-сантиметровом слое почвы березняка не выявил существенной неоднородности. Разница между минимальным и максимальным значениями составила 3,8 раза (рисунок 1).



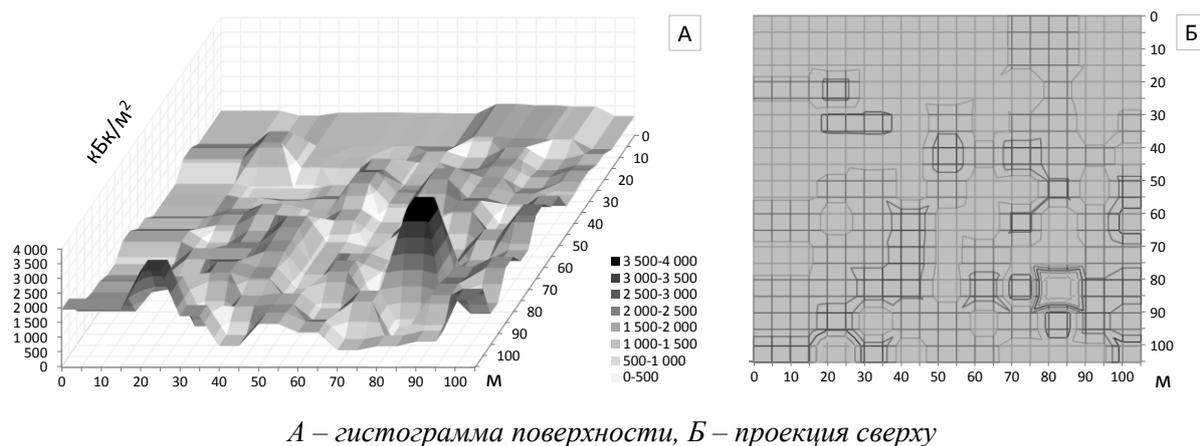
А – гистограмма поверхности, Б – проекция сверху

Рисунок 1. – Латеральное распределение ¹³⁷Cs в верхнем (20 см) слое почвы березняка, кБк/м²

Коэффициент вариации ¹³⁷Cs для экспериментального полигона в березняке составил 27,4 %, что является закономерным для отдаленного периода радиационной аварии и условий повышенной увлажненности. Представленные данные распределения ¹³⁷Cs указывают на определенное соответствие плотности загрязнения пробных площадей результатам γ -съемки. Участки с максимальными параметрами МД на высоте обнаруживают наиболее высокое содержание ¹³⁷Cs в почве. При этом эмпирический коэффициент корреляции между МД на высоте 1 м и содержанием ¹³⁷Cs в почве составил 0,21, для высоты 3–4 см $r_{xy} = 0,16$. Отклонения в формировании контурных следов связаны с особенностями микрорельефа, расположением зон повышенного увлажнения и геометрией измерения МД γ -излучения с высотой.

При исследовании перераспределения ⁹⁰Sr в пространстве наблюдается некоторая тенденция соотношения его содержания с ¹³⁷Cs, однако участки с повышенной концентрацией ⁹⁰Sr более локальны, а уровни их загрязнения имеют более существенную разницу по сравнению со средним значением, чем это обнаружено в отношении ¹³⁷Cs (рисунок 2).

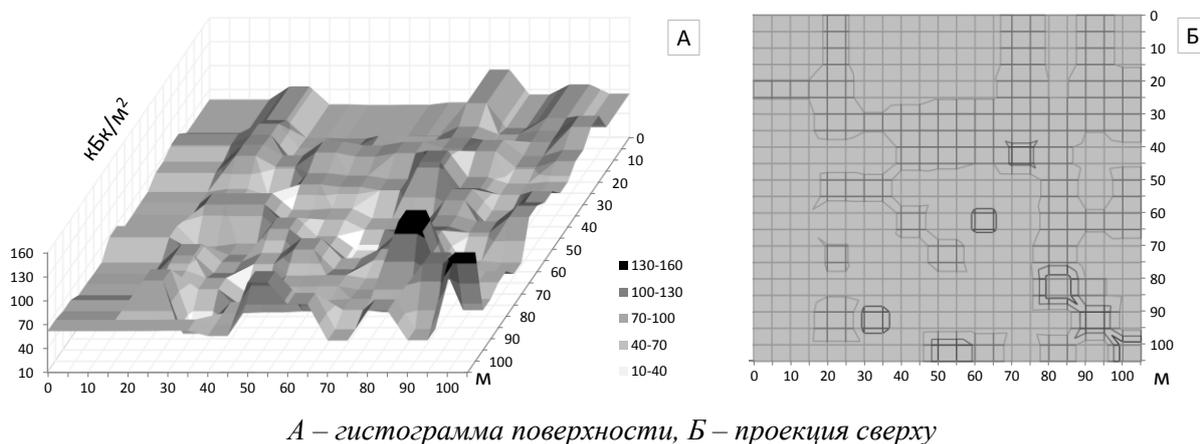
Для ⁹⁰Sr в березняке $V = 48,3$ %, что характеризует более локальный характер его пространственного распределения. Как видно из проекции плотности загрязнения ⁹⁰Sr данной территории, участок с наиболее высокими уровнями содержания соседствует с участками, где его содержание в 15 раз ниже. Данное обстоятельство, вероятнее всего, объясняется нахождением данного радионуклида в ближней зоне аварии на ЧАЭС в составе матрицы топливных частиц. Различия в генезисе ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr ближней зоны также подтверждаются очень низким коэффициентом положительной корреляции ($r_{xy} = 0,08$). Между плотностью загрязнения территории ⁹⁰Sr и МД γ -излучения $r_{xy} = 0,34$.



А – гистограмма поверхности, Б – проекция сверху

Рисунок 2. – Латеральное распределение ^{90}Sr в верхнем (20 см) слое почвы березняка, $\text{кБк}/\text{м}^2$

Аналогичный характер поведения при латеральной миграции ^{90}Sr был зафиксирован и для ^{241}Am . Однако дифференциация по плотности загрязнения в данном случае выражена несколько ниже, чем для ^{90}Sr (рисунок 3).



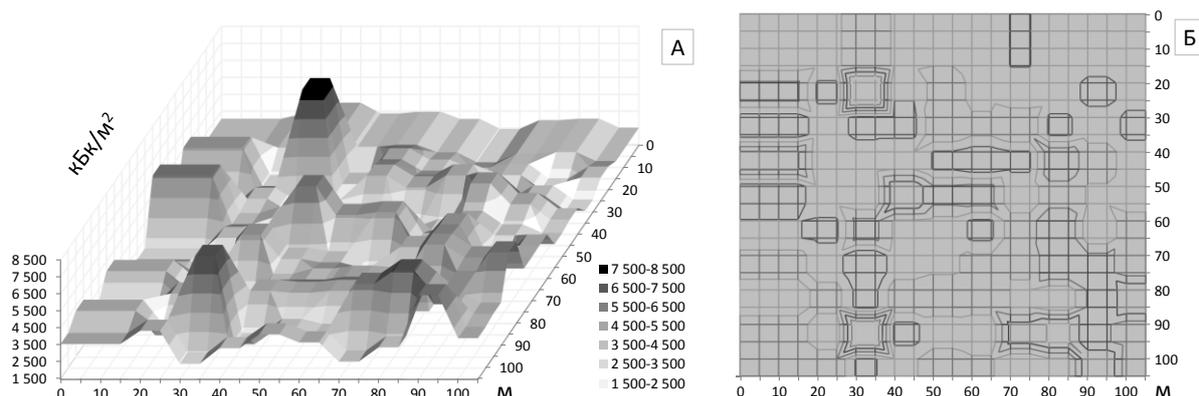
А – гистограмма поверхности, Б – проекция сверху

Рисунок 3. – Латеральное распределение ^{241}Am в верхнем (20 см) слое почвы березняка, $\text{кБк}/\text{м}^2$

Это объясняется более низкими мобильными свойствами ^{241}Am и способностью образовывать комплексы с тонкодисперсной фракцией почвы. В дальнейшем также необходимо учитывать постоянное увеличение со временем содержания ^{241}Am в почве вследствие физического распада ^{241}Pu , что может отразиться на характеристиках горизонтального распределения. По характеру варьирования содержания в почве ^{241}Am занимает промежуточное положение между ^{137}Cs и ^{90}Sr ($V = 28,7\%$). Наибольшая положительная корреляция для ^{241}Am наблюдается при сравнении с ^{137}Cs ($r_{xy} = 0,68$). При сравнении со ^{90}Sr $r_{xy} = 0,45$.

Анализ латеральной дифференциации ^{137}Cs в верхнем 20-сантиметровом слое почвы залежи обнаружил участки с различными уровнями загрязнения, причем разница между минимальным и максимальным значениями составила 5 раз (рисунок 4).

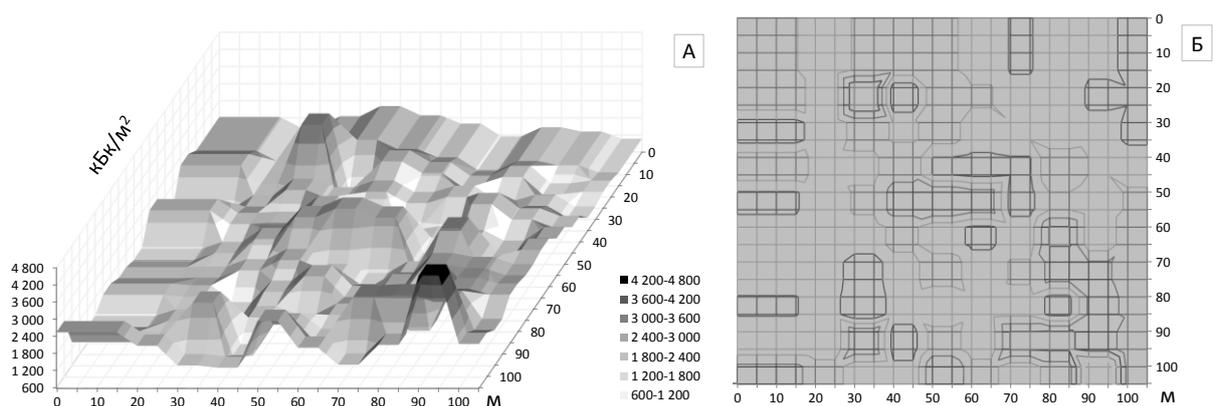
Коэффициент вариации ^{137}Cs для экспериментального полигона на залежи составил 34,0 %, что характерно для отдаленного периода радиационной аварии. Значение коэффициентов корреляции между МД и содержанием ^{137}Cs в почве приближается к 0. Только графическое сравнение проекционных следов указывает на явную тенденцию выделения участков с наиболее высокими и низкими уровнями радиоактивного загрязнения в границах нашего экспериментального полигона.



А – гистограмма поверхности, Б – проекция сверху

Рисунок 4. – Латеральное распределение ^{137}Cs в верхнем (20 см) слое почвы залежного луга, $\text{кБк}/\text{м}^2$

При исследовании перераспределения ^{90}Sr на поверхности почвы залежного луга наблюдается тенденция соотношения его содержания с ^{137}Cs . Пробные площади с высокими и низкими плотностями загрязнения почвы радионуклидами чаще всего совпадали (рисунок 5).



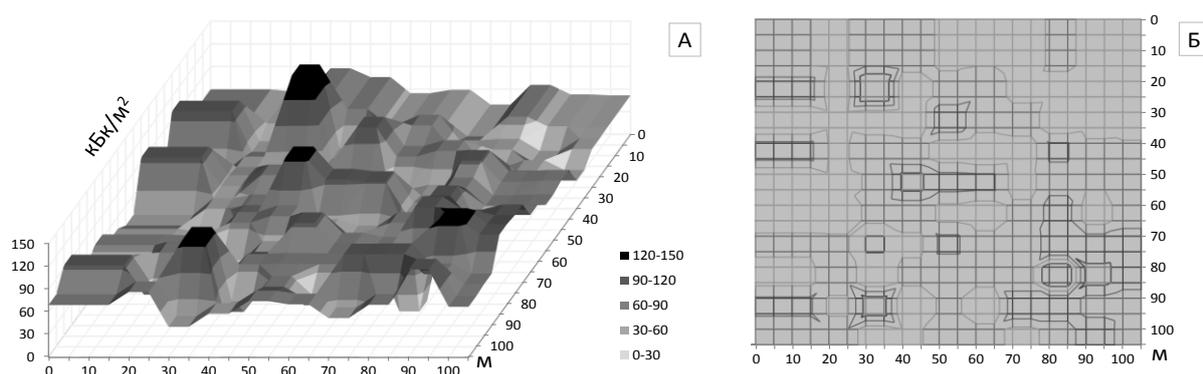
А – гистограмма поверхности, Б – проекция сверху

Рисунок 5. – Латеральное распределение ^{90}Sr в верхнем (20 см) слое почвы залежного луга, $\text{кБк}/\text{м}^2$

Коэффициент вариации ^{90}Sr для экспериментального полигона на залежи составил 36,0 %, что в значительной степени согласуется с таковым для ^{137}Cs . Данное обстоятельство указывает на идентичный характер происхождения и весьма схожие процессы латеральной миграции ^{137}Cs и ^{90}Sr на данном полигоне. Это подтверждается и достаточно высоким коэффициентом положительной корреляции ($r_{xy} = 0,81$). Различие между минимальным и максимальным значением плотности загрязнения почвы ^{90}Sr в данном случае составило 6,5 раза, что выше по сравнению с таковым для ^{137}Cs . Корреляция же между плотностью загрязнения территории ^{90}Sr и МД γ -излучения так же, как и в случае с ^{137}Cs , незначительна и указывает лишь на общие тенденции перераспределения радионуклидов в пространстве.

В отношении ^{241}Am на залежи был обнаружен аналогичный характер поведения при латеральной миграции, как и для ^{137}Cs , ^{90}Sr (рисунок 6).

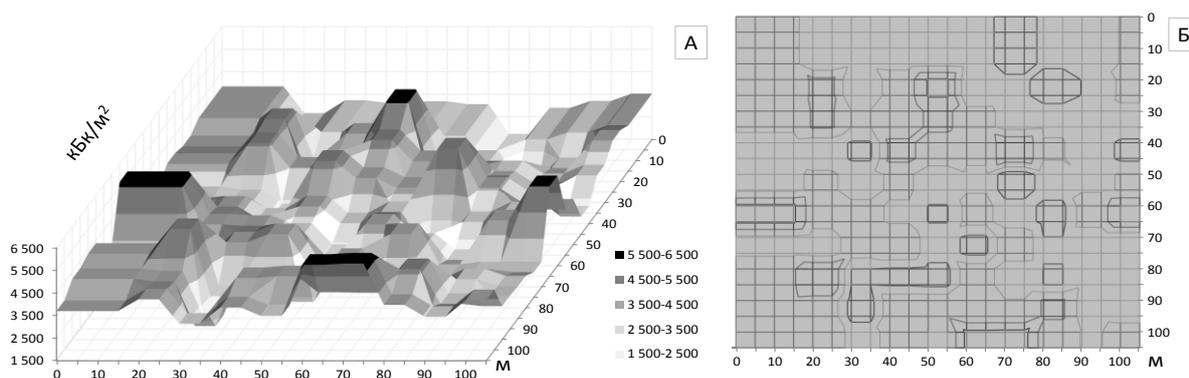
Размах варыравання мінімальнага і максымальнага значэнняў па шчыльнасці загрязнення паверхні пячвы в даным случае значыльна вышэ па сраўненню с такім для ^{137}Cs і ^{90}Sr і саставляе 32,4 разо. Это звязана с нахождением ^{241}Am в пячве в саставе матрыцы топливных частиц и его способностью к комплексообразованию, что ограничивает его миграционные свойства. Коэффициент вариации ($V = 37,5 \%$) содержания ^{241}Am в пячве залежи незначительно выше таких для ^{137}Cs и ^{90}Sr , что также подтверждает идентичную картину распределения всех трех исследуемых радионуклидов в пячве участка. На это же указывает и высокий коэффициент положительной корреляции уровней радиоактивного загрязнения пячвы ^{241}Am при сраўненіи с такими для ^{137}Cs ($r_{xy} = 0,90$) и ^{90}Sr ($r_{xy} = 0,81$).



А – гистограмма поверхности, Б – проекция сверху

Рисунок 6. – Латеральное распределение ^{241}Am в верхнем (20 см) слое пячвы залежного луга, кБк/м²

Анализ латеральной дифференциации ^{137}Cs в верхнем 20-сантиметровом слое пячвы сосняка обнаружил участки с различными уровнями загрязнения. Разница между минимальным и максимальным значениями составила 3,7 раза (рисунок 7).



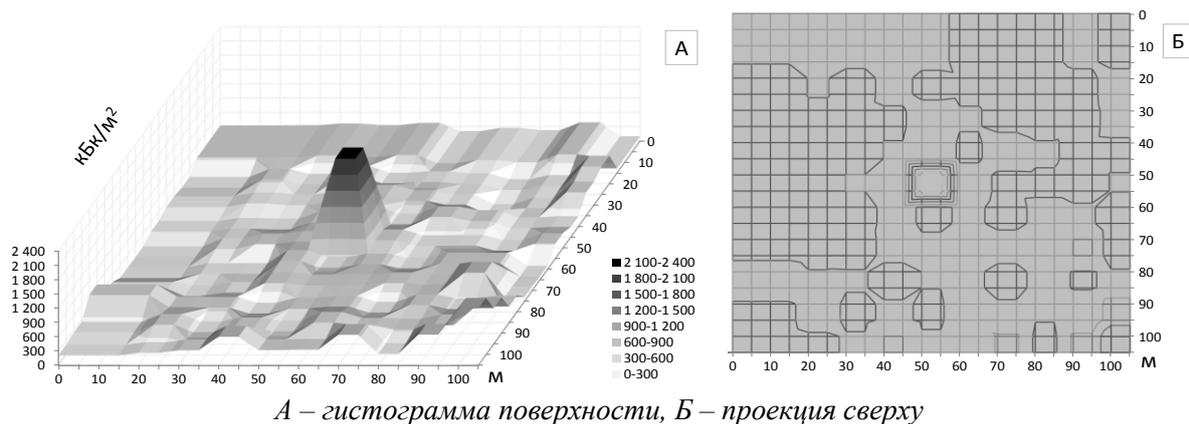
А – гистограмма поверхности, Б – проекция сверху

Рисунок 7. – Латеральное распределение ^{137}Cs в верхнем (20 см) слое пячвы соснового леса, кБк/м²

Коэффициент вариации ^{137}Cs для пячвы сосняка составил 25,7 %, что характерно для отдаленного периода радиационной аварии. Значение коэффициента корреляции, как и в предыдущих случаях, приближается к 0.

При исследовании горизонтального распределения ^{90}Sr в почве соснового леса ситуация была не так однозначна. При некотором наблюдаемом соотношении проекционных следов обнаруживается значительная дискретность в отношении полученных данных по плотности загрязнения почвы (рисунок 8).

Обращает на себя внимание несоответствие более низкого содержания ^{137}Cs , ^{90}Sr в верхнем 20-сантиметровом слое почвы сосняка по сравнению с другими полигонами, но при этом более высокие значения мощности загрязнения. Это можно объяснить нахождением значительной части радионуклидов в мощной хвойной подстилке сосняка. Коэффициент вариации ^{90}Sr для сосняка составил 75,2 %, что не является характерной величиной для отдаленного периода аварии.

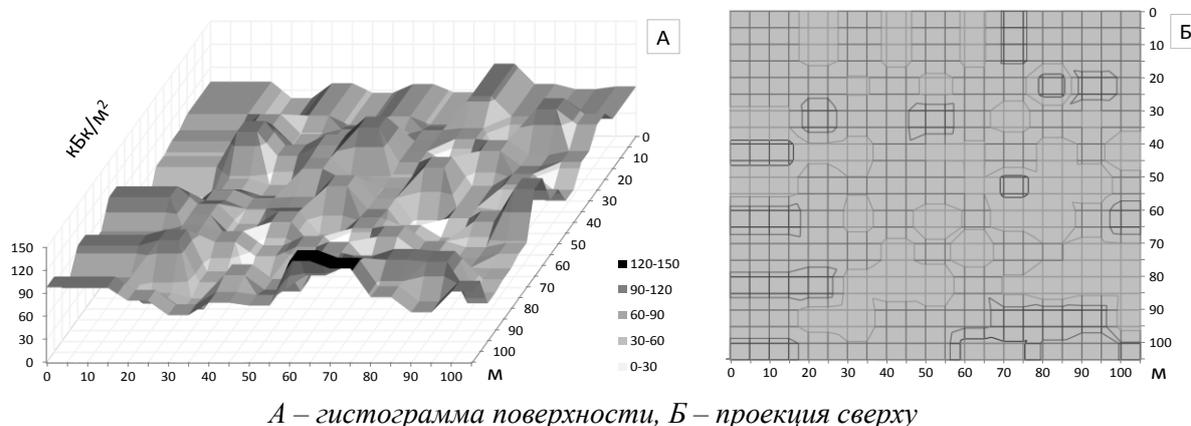


А – гистограмма поверхности, Б – проекция сверху

Рисунок 8. – Латеральное распределение ^{90}Sr в верхнем (20 см) слое почвы соснового леса, $\text{кБк}/\text{м}^2$

Возможно, несмотря, на идентичный характер происхождения и схожие процессы латеральной миграции ^{137}Cs и ^{90}Sr в других биогеоценозах, сосняки обладают своими особенностями, связанными со структурной организацией. Это подтверждается и низким коэффициентом корреляции ($r_{xy} = 0,06$) с распределением ^{137}Cs . Различие между минимальным и максимальным значением плотности загрязнения почвы ^{90}Sr в данном случае составило 115 раз. Корреляция же между плотностью загрязнения территории ^{90}Sr и МД γ -излучения так же как и в случае с ^{137}Cs , незначительна и указывает лишь на общие тенденции перераспределения радионуклидов в пространстве.

В отношении ^{241}Am в сосняке был обнаружен аналогичный характер поведения при латеральной миграции, как и для ^{137}Cs (рисунок 9).



А – гистограмма поверхности, Б – проекция сверху

Рисунок 9. – Латеральное распределение ^{241}Am в верхнем (20 см) слое почвы соснового леса, $\text{кБк}/\text{м}^2$

Разница между минимальным и максимальным значениями плотности загрязнения в данном случае несколько выше по сравнению с таковым для ^{137}Cs и гораздо ниже, чем для ^{90}Sr (в 6,7 раза). Соответственно, и коэффициент вариации содержания ^{241}Am в почве сосняка (31,9 %) выше такового для ^{137}Cs и значительно ниже, чем для ^{90}Sr . Естественны в данных обстоятельствах и различия в значениях коэффициентов корреляции уровней радиоактивного загрязнения почвы ^{241}Am , которые составили при сравнении с таковыми для ^{137}Cs ($r_{xy} = 0,68$) и ^{90}Sr ($r_{xy} = 0,20$).

При анализе латеральной дифференциации ^{137}Cs в верхнем 20-сантиметровом слое почвы на территории урочища Ясева Гора не обнаружено значительных перепадов значений плотности загрязнения. Разница между минимальным и максимальным значениями составила 3,4 раза. Коэффициент вариации содержания ^{137}Cs при этом для экспериментального полигона составил 21,6 %. Оценка совместимости содержания ^{137}Cs с высотными уровнями полигона обнаружила низкую положительную корреляцию ($r_{xy} = 0,27$). Большую роль при этом играют особенности микрорельефа с перераспределением областей повышенного увлажнения и формированием зон выноса и концентрирования химических элементов, в том числе и радионуклидов. В качестве зон выноса, чаще всего, выступают трансэлювиальные и трансэлювиально-аккумулятивные ландшафты, а зон концентрирования или геохимических барьеров элювиальные и аквальные ландшафты различного типа и генезиса. Распределение ^{90}Sr в верхнем 20-сантиметровом слое почвы Ясевой Горы, как и ^{137}Cs , также обнаруживает значительную мозаичность. Однако перепады его содержания в почве гораздо существеннее. Разница между минимальным и максимальным значениями составила 63,8 раза. Коэффициент вариации ^{90}Sr для экспериментального полигона составил 51,9 %, причем графический анализ указывает на несоответствие участков локализации максимального содержания с таковым для ^{137}Cs . Различия в генезисе ^{137}Cs и ^{90}Sr ближней зоны подтверждается низким коэффициентом корреляции ($r_{xy} = 0,06$). Оценка совместимости содержания ^{90}Sr с высотными уровнями полигона обнаружила еще более низкую корреляцию ($r_{xy} = 0,19$). Латеральная дифференциация ^{241}Am в пределах исследуемого полигона обнаружила значительное его сходство с локализацией наибольших количеств ^{137}Cs . При этом коэффициент корреляции ^{241}Am при сравнении с распределением ^{137}Cs составил 0,70. Самая низкая корреляционная взаимосвязь была обнаружена между распределением в почве ^{241}Am и ^{90}Sr ($r_{xy} = 0,10$). По характеру варьирования содержания в почве ^{241}Am занимает промежуточное положение между ^{137}Cs и ^{90}Sr ($V = 33,1$ %). Разница между минимальным и максимальным значениями составила 10,3 раза. Оценка совместимости содержания ^{241}Am с высотными уровнями полигона обнаружила такую же низкую положительную корреляцию, как и в отношении ^{137}Cs ($r_{xy} = 0,27$).

Расчет значений доверительного интервала в большинстве случаев показал значительное отклонение от величины средних значений при характерном для таких исследований уровне значимости ($P \leq 0,05$), что говорит о высокой достоверности проведенных исследований. Менее всего варьировал такой показатель, как МД, представляя собой производный результат измерения от нескольких источников. По всем исследуемым площадкам значения варьирования МД у поверхности почвы более чем на 30 % выше, чем на высоте 1 м, наименьшими V отличался сосновый лес, а наибольшими – березняк, что связано как с различиями в лесорастительных условиях, так и в режимах увлажнения. Анализ кривых распределения показал, что при заданных объемах выборок для значений содержания радионуклидов в почве расчеты критериев достоверности оценок (t_{As} , t_{Ex}) и полученные величины медианы и моды указывают на логнормальный характер распределения значений плотности загрязнения экспериментальных полигонов. Только в случае с анализом МД γ -излучения можно говорить о распределении эмпирических данных

по нормальному закону. Это подтверждает проверка по биометрическим таблицам и проверка распределения на соответствие нормальному закону при помощи теста Колмогорова – Смирнова. Анализ пространственного распределения радионуклидов обнаружил правостороннюю (положительную) асимметрию вариационных гистограмм, направленную в сторону образцов с наибольшими значениями, что подтверждает значительную неоднородность в мультифрактальной структуре чернобыльских выпадений. В отношении ^{241}Am наблюдаются выбросы с максимальными значениями, почти в 3 раза превышающими средние, что может быть связано с различными формами нахождения радионуклидов в почве экспериментального полигона. Данное обстоятельство также является одним из факторов, сдерживающих формирование окончательной квазиравновесной картины распределения радионуклидов в пространстве и, соответственно, приуроченность их содержания к различным ландшафтам и элементам микрорельефа.

Заключение

Различия в распределении исследуемых радионуклидов по поверхности экспериментальных полигонов обусловлены как особенностями их нахождения в составе чернобыльского выброса, так и различиями в миграционных свойствах. Проведенный анализ характера варьирования показал, что в лесных биогеоценозах в большей степени изменчивости содержания в верхнем слое почвы подлежит ^{90}Sr . Это подтверждается наибольшим коэффициентом вариации. Наименше различий в варьировании содержания ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am в верхнем слое почвы наблюдается на залежном лугу, что в большей степени зависит от структуры сформированного сообщества и отсутствия древесного яруса. Полученные результаты указывают, с одной стороны, на более высокую мобильность ^{90}Sr в почвах зоны отчуждения, по сравнению с другими радионуклидами чернобыльского происхождения, с другой стороны, на способность биотических компонентов изучаемых лесных формаций в большей степени задействовать данный химический элемент в обменных процессах, происходящих в экосистеме, чем другие радионуклиды.

Исходя из проведенного статистического анализа, можно заключить, что так как распределение ^{137}Cs ближе всего по своим параметрам к нормальному закону, то в данном случае можно говорить об определенной стабилизации обстановки, на которую будет оказывать влияние в большей степени только физический распад. Снижение вариабельности содержания ^{137}Cs в почвенном горизонте свидетельствует об уменьшении темпов миграции из-за его фиксации на глинистых минералах почвы и выравнивании градиентов загрязнения на локальном уровне. В отношении же ^{90}Sr обстановка представляется наиболее сложной, что связано с выходом его из состава матрицы топливных частиц и увеличением количества подвижных форм. По всей видимости, эти процессы в настоящее время продолжают. Что касается ^{241}Am , то скорость процессов горизонтальной миграции данного радионуклида, несмотря на продолжающееся увеличение его количества в почве, ниже, чем для ^{90}Sr , что связано с более низкой биогенной миграцией и перераспределением его с биотой. При этом необходимо также учитывать и специфику радиоактивного загрязнения поверхности биогеоценоза (тип выпадений, радионуклидный состав и т. д.). Находясь в почве в определенных формах и обладая различными физико-химическими свойствами, каждый радионуклид будет в разной степени реагировать на влияние того или иного фактора среды, будь то влияние биоты или фактора неживой природы. Исследуемые показатели варьирования отражают процессы трансформации радионуклидов с учетом специфики свойств выбранного ландшафта.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лес. Человек. Чернобыль. Лесные экосистемы после аварии на Чернобыльской АЭС: состояние, прогноз, реакция населения, пути реабилитации / В. А. Ипатьев [и др.] ; под общ. ред. В. А. Ипатьева. – Гомель : Ин-т леса НАН Беларуси, 1999. – 454 с.
2. Линник, В. Г. Ландшафтно-географические исследования в связи с аварией на ЧАЭС / В. Г. Линник // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, География. – 1996. – № 1. – С. 38–44.
3. Линник, В. Г. Ландшафтная дифференциация техногенных радионуклидов: геоинформационные системы и модели : автореф. дис. ... д-ра геогр. наук : 25.00.23 / В. Г. Линник ; МГУ им. М. В. Ломоносова. – М., 2008. – 40 с.
4. Линник, В. Г. Принципы ландшафтно-геохимического и радиоэкологического картографирования территорий, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС (проект РАДЛАН) / В. Г. Линник, Л. М. Хитров, Е. М. Коробова. – М. : ГЕОХИ АН СССР, 1991. – 50 с.
5. Иванов, Ю. А. Анализ факторов, определяющих долговременную динамику миграции радионуклидов в почвенно-растительном покрове / Ю. А. Иванов // Проблемы чернобыльской зоны отчуждения : науч.-техн. сб. – Чернобыль, 2009. – Вып. 9. – С. 23–39.
6. Алексахин, Р. М. Ядерная энергия и биосфера / Р. М. Алексахин. – М. : Энергоиздат, 1982. – 216 с.
7. Soil contamination with ^{90}Sr in the near zone of the Chernobyl accident / V. A. Kashparov [et al.] // Journal of Environment Radioactivity. – 2001. – Vol. 56, nr 3. – P. 285–298.
8. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля : пер. с англ. / Л. Д. Апплби [и др.] ; под ред. Ф. Уорнера и Р. Харрисона. – М. : Мир, 1999. – 512 с.
9. Калиниченко, С. А. Характеристика латерального распределения ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am в поверхностном слое почвы различных биогеоценозов белорусского сектора зоны отчуждения Чернобыльской АЭС / С. А. Калиниченко // Изв. Гомел. гос. ун-та им. Ф. Скорины. Естеств. науки. – 2018. – № 3 (108). – С. 42–48.
10. Особенности латерального перераспределения ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am в поверхностном слое почвы геохимически сопряженных ландшафтов при значительном для белорусского Полесья перепаде высот / С. А. Калиниченко [и др.] // Изв. Гомел. гос. ун-та им. Ф. Скорины. Естеств. науки. – 2019. – № 3 (114). – С. 29–35.
11. Лакин, Г. Ф. Биометрия : учеб. пособие для биол. специальностей вузов / Г. Ф. Лакин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1980. – 293 с.

REFERENCES

1. Lies. Chieloviek. Chiernobyl'. Liesnyje ekosistemy poslie avarii na Chiernobyl'skoj AES: sostojanije, prognoz, rieakcija nasielienija, puti rieabilitacii / V. A. Ipat'jev [i dr.] ; pod obshch. ried. V. A. Ipat'jeva. – Gomieli' : In-t liesa NAN Bielarusi, 1999. – 454 s.
2. Linnik, V. G. Landshaftno-geografichieskije issliedovanija v sviazi s avariej na ChAES / V. G. Linnik // Viestn. Mosk. un-ta. Sier. 5. Geografija. – 1996. – № 1. – S. 38–44.
3. Linnik, V. G. Landshaftnaja diffierenciacija tiekhnogiennykh radionuklidov: geoinformacionnyje sistemy i modeli : avtorief. dis. ...d-ra geogr. nauk : 25.00.23 / V. G. Linnik ; MGU im. M. V. Lomonosova. – M., 2008. – 40 s.
4. Linnik, V. G. Principy landshaftno-geohimichieskogo i radioekologichieskogo kartografirovanija tierritorij, zagriaznionnykh radionuklidami v riezul'tatie avarii na Chernobyl'skoj AES (projekt RADLAN) / V. G. Linnik, L. M. Khitrov, Ye. M. Korobova. – M. : GEOKhI AN SSSR, 1991. – 50 s.

5. Ivanov, Yu. A. Analiz faktorov, opriedieliajushchikh dolgoviemiennuju dinamiku migracii radionuklidov v pochvienno-rastitel'nom pokrove / Yu. A. Ivanov // Problemy chier-nobyl'skoj zony otchuzhdenija : nauch.-tiekhn. sb. – Chier-nobyl', 2009. – Vyp. 9. – S. 23–39.
6. Alieksahin, R. M. Jadiernaja energija i biosfiera / R. M. Alieksahin. – M. : Energo-izdat, 1982. – 216 s.
7. Soil contamination with ^{90}Sr in the near zone of the Chernobyl accident / V. A. Kash-parov [et al.] // Journal of Environment Radioactivity. – 2001. – Vol. 56, nr 3. – P. 285–298.
8. Puti migracii iskusstviennykh radionuklidov v okruzhajushchiej sriedie. Radioeko-logija poslie Chier-nobylija : pier. s angl. / L. D. Appllbi [i dr.] ; pod ried. F. Uornera i R. Khar-risona. – M. : Mir, 1999. – 512 s.
9. Kalinichienko, S. A. Kharakteristika lateral'nogo raspriedielienija ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am v povierkhnostnom sloje pochvy razlichnykh biogiecenezov bieloruskogo siektora zony otchuzhdenija Chier-nobyl'skoj AES / S. A. Kalinichienko // Izv. Gomial. gos. un-ta im. F. Sko-riny. Jestiestv. nauki. – 2018. – № 3 (108). – S. 42–48.
10. Osobiennosti lateral'nogo pierieraspriedielienija ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{241}Am v povierkhnost-nom sloje pochvy gieohimichieski sopriazhonnykh landshaftov pri znachitel'nom dlia bieloruskogo Polies'ja pieriepadie vysot / S. A. Kalinichienko [i dr.] // Izv. Gomial. gos. un-ta im. F. Skoriny. Jestiestv. nauki. – 2019. – № 3 (114). – S. 29–35.
11. Lakin, G. F. Biometrija : uchieb. posobije dlia biol. spiecial'nostiej vuzov / G. F. Lakin. – 3-je izd., pierierab. i dop. – M. : Vyssh. shk., 1980. – 293 s.

Рукапіс наступіў у рэдакцыю 19.04.2021