

ISSN 0869-8031

Том 63, Номер 2

Март - Апрель 2023



РАДИАЦИОННАЯ БИОЛОГИЯ РАДИОЭКОЛОГИЯ



www.sciencejournals.ru



СОДЕРЖАНИЕ

Том 63, номер 2, 2023

Изучение последствий радиационных аварий

Зависимость частоты транслокаций в лимфоцитах крови от дозы и возраста на начало облучения у жителей прибрежных сел реки Теча

Е. И. Толстых, А. В. Возилова, М. О. Дегтева, А. В. Аклев

115

Радиационная генетика

Цитогенетические эффекты в костном мозге животных, обитающих в условиях повышенного естественного радиационного фона

Л. А. Башлыкова, О. В. Раскоша

128

Радиационная биохимия

Минорные фракции фосфолипидов в механизме адаптации диких грызунов к повышенному радиационному фону

Л. Н. Шишкина, А. Г. Кудяшева

138

Радиобиология растений

Кинетика прорастания семян как информативный показатель для оценки воздействия ионизирующего излучения (на примере АБК-мутантных линий *Arabidopsis thaliana*)

*Е. В. Бондаренко, Д. Д. Бабина, М. Ю. Подобед, А. С. Миценых,
П. Ю. Волкова*

146

Радиоэкология

Дозиметрические показатели поражения пищеварительного тракта моногастричных животных инкорпорированными радиоактивными частицами

С. Г. Шаповалов, Г. В. Козьмин

157

Динамика коэффициентов перехода ^{137}Cs в сельскохозяйственную продукцию после аварии на ЧАЭС: зерно, картофель и овощи

*С. В. Фесенко, П. В. Прудников, Е. С. Емлютина, И. Э. Епифанова,
И. Е. Титов, О. А. Шубина*

172

Радионуклиды

Загрязнение ^{137}Cs в почвах и растениях городских экосистем вблизи Электростальского завода тяжелого машиностроения

Д. Н. Липатов, В. А. Вараченков, Д. В. Манахов, С. В. Мамихин, А. И. Щеглов

186

Мониторинг ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K в серых лесных почвах и растениях реперных участков Владимирской области

А. А. Уткин

199

Рецензии

Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Крышев И.И. Моделирование радиоэкологических процессов в окружающей среде. М.: ООО "Маска", 2022. 638 с.

С. В. Мамихин

211

Хроника

Юбилейная конференция "Актуальные проблемы радиационной биологии. К 60-летию создания Научного совета РАН по радиобиологии" (25–27 октября 2022 г., Дубна, ОИЯИ)

В. И. Найдич

213

Академику РАН Ильину Леониду Андреевичу – 95 лет

220

Юрий Евгеньевич Дубровá (13 апреля 1955–26 января 2023)

223

Contents

Vol. 63, No. 2, 2023

Study of the Consequences of Radiation Accidents

Dependence of the Translocation Frequency in Blood Lymphocytes on the Dose and Age at the Onset of Exposure in Residents of the Techa Riverside Settlements

E. I. Tolstykh, A. V. Vozilova, M. O. Degteva, A. V. Akleev

115

Radiation Genetics

Cytogenetic Effects in the Bone Marrow of Animals Living in Conditions of Increased Natural Radiation Background

L. A. Bashlykova, O. V. Raskosha

128

Radiation Biochemistry

Minor Fractions of Phospholipids in Mechanism of the Wild Rodent Adaptation to Increased Radiation Phone

L. N. Shishkina, A. G. Kudyasheva

138

Radiobiology of Plants

Seed Germination Kinetics as an Informative Tool for Assessing the Impact of Ionizing Radiation (on the Example of *Arabidopsis Thaliana* Aba-Mutant Lines)

E. V. Bondarenko, D. D. Babina, M. Yu. Podobed, A. S. Mitseniyk, P. Yu. Volkova

146

Radioecology

Dosimetric Indicators of Damage to the Digestive Tract of Monogastric Animals by Incorporated Radioactive Particles

S. G. Shapovalov, G. V. Kozmin

157

Dynamics of ^{137}Cs Transfer Factors to Agricultural Products after the Chernobyl Accident: Grain, Potatoes, and Vegetables

S. V. Fesenko, P. V. Prudnikov, E. S. Emlyutina, I. E. Epifanova, I. E. Titov, O. A. Shubina

172

Radionuclides

^{137}Cs Pollution in Soils and Plants of Urban Ecosystems Near the Elektrostal Heavy Machinery Plant

D. N. Lipatov, V. A. Varachenkov, D. V. Manakhov, S. V. Mamikhin, A. I. Shcheglov

186

Monitoring of ^{137}Cs , ^{90}Sr and ^{40}K in Gray Forest Soils and Plants of Reference Sites of the Vladimir Region

A. A. Utkin

199

Reviews

Sazykina T.G., Kryshev A.I., Kryshev I.I. Modeling of Radioecological Processes in the Environment. Moscow: LLC "Mask", 2022. 638 s.

S. V. Mamikhin

211

Chronicle

Anniversary Conference "Actual Problems of Radiation Biology. On The 60th Anniversary of the Establishment of the Scientific Council of the Russian Academy of Sciences on Radiobiology" (October 25–27, 2022, Dubna, JINR)

V. I. Naidich

213

Academician of the Russian Academy of Sciences Leonid Ilyin is 95 Years Old!

220

Yuri Evgenievich Dubrova (April 13, 1955 – January 26, 2023)

223

ИЗУЧЕНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ РАДИАЦИОННЫХ АВАРИЙ

УДК 612.112.94:575.224.23:614.876:539.1.047

ЗАВИСИМОСТЬ ЧАСТОТЫ ТРАНСЛОКАЦИЙ В ЛИМФОЦИТАХ КРОВИ ОТ ДОЗЫ И ВОЗРАСТА НА НАЧАЛО ОБЛУЧЕНИЯ У ЖИТЕЛЕЙ ПРИБРЕЖНЫХ СЕЛ РЕКИ ТЕЧА

© 2023 г. Е. И. Толстых^{1,*}, А. В. Возилова¹, М. О. Дегтева¹, А. В. Аксеев^{1,2}

¹ Уральский научно-практический центр радиационной медицины
Федерального медико-биологического агентства Российской Федерации, Челябинск, Россия

² Челябинский государственный университет, Челябинск, Россия

*E-mail: evgenia.tolstykh@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.06.2022 г.

После доработки 16.12.2022 г.

Принята к публикации 21.12.2022 г.

Оценка влияния возраста на частоту радиационно-индуцируемых транслокаций, регистрируемых методом FISH в циркулирующих в Т-лимфоцитах в отдаленный период после облучения, имеет как теоретический, так и практический интерес для целей биодозиметрии. Целью нашей работы был анализ дозовой зависимости частоты транслокаций в Т-лимфоцитах периферической крови у доноров различного возраста, подвергшихся облучению в прибрежных селах р. Теча ($n = 197$). В цитогенетических исследованиях использовали цельно-хромосомные зонды для окрашивания трех пар хромосом. Всего было просчитано 104721 геном-эквивалентов (GE) и обнаружено 2540 транслокаций. Для каждого донора индивидуальные дозы облучения, поглощенные в органах и тканях к моменту забора крови, были рассчитаны с использованием дозиметрической системы р. Теча. Кроме того, были рассчитаны дозы на Т-лимфоциты и их предшественников с использованием оригинального модельного подхода с учетом возрастной динамики Т-лимфоцитов; именно с этими дозами были связаны возрастные зависимости частоты транслокаций. Основными источниками облучения доноров были ^{89,90}Sr, накапливающиеся в кости и практически локально облучающие костный мозг. Для оценки параметров зависимости доза–эффект использовали линейную регрессионную модель. После учета фоновых значений наименьшая частота транслокаций на 1000 GE на Гр была выявлена у доноров в возрасте 0–5 лет на момент облучения (9.3 ± 1.3), что статистически значимо ниже, чем у детей 6–18 лет (15.3 ± 1.5), но не у взрослых (11.9 ± 2.9). Значение для взрослых (>18 лет) характеризовалось максимальным разбросом, но оказалось близким к величинам, полученным в международном исследовании профессионалов после внешнего облучения (11.6 ± 1.6). Значения фоновых частот транслокаций, определенных в различных возрастных группах, соответствуют опубликованным значениям, полученным в объединенном международном исследовании по необлученным донорам. Мы также подтвердили отсутствие влияния пола на частоту транслокаций.

Ключевые слова: циркулирующие Т-лимфоциты, хромосомные aberrации, транслокации, возраст человека, биодозиметрия

DOI: 10.31857/S086980312302011X, **EDN:** EPDGBV

Возрастные особенности формирования радиационно-индуцируемых транслокаций в лимфоцитах периферической крови изучались в публикациях [1, 2]. Сложность получения однозначных результатов связана с тем, что с возрастом увеличивается число фоновых транслокаций, возникающих спонтанно за счет эндогенных клеточных процессов или в результате воздействия мутагенных агентов окружающей среды [3]. При этом С.Е. Рубе et al. [4] отмечают снижение с возрастом способности лимфоцитов репарировать радиационно индуцированные повреждения ДНК,

особенно выраженные у пожилых. Ответ на вопрос, как влияет возраст на число радиационно индуцируемых транслокаций, регистрируемых в отдаленный период, имеет как теоретический, так и практический интерес для целей биодозиметрии, поскольку Т-лимфоциты периферической крови являются объектом изучения хромосомных aberrаций, вызванных воздействием облучения на тело человека.

Для оценок частоты aberrаций используются различные методы, в том числе и метод флуоресцентной *in situ* гибридизации (FISH). Его приме-

няют как для ретроспективной оценки доз в случае профессионального облучения [5, 6], так и при аварийном облучении, например, жителей прибрежных сел р. Теча, пострадавших вследствие сбросов жидких радиоактивных отходов в период 1949–1956 гг. [7–9]. В последнем случае имело место неравномерное многолетнее внутреннее и в меньшей степени внешнее облучение, причем вклад $^{89,90}\text{Sr}$, инкорпорированного в костную ткань, был определяющим в формировании дозы на красный костный мозг (ККМ). В ситуации на р. Теча облучению подверглись лица широкого возрастного диапазона.

Цитогенетические исследования жителей прибрежных сел методом FISH начались в 1996. В результате многолетней работы в УНПЦ РМ были накоплены данные, позволяющие оценить зависимости частоты хромосомных aberrаций (транслокаций) от дозы облучения, описанные в ряде работ [7–9]. Наиболее важным можно считать вывод о том, что при локальном облучении костного мозга $^{89,90}\text{Sr}$ доза на ККМ, оцененная на основе частоты транслокаций с использованием стандартных калибровочных кривых, была существенно ниже дозы на ККМ, основанной на прямых измерениях содержания ^{90}Sr в организме [8]. Это наблюдение послужило причиной разработки модели облучения Т-лимфоцитов и их предшественников на основе концепции Т-клеточного рода (TG), который объединяет всех потомков конкретного предшественника Т-клеток, достигающего тимуса [10, 11]. Данная модель позволяет оценивать дозу, которая характеризует облучение Т-предшественников в ККМ, а также облучение циркулирующих Т-лимфоцитов при их пребывании в четырех компартментах тела: ККМ, тонкий кишечник, толстый кишечник, остальные внескелетные лимфоидные ткани (доза для них соответствует дозе на мягкие ткани, такие как мышцы) [12]. Кроме того, эта модель оценивает относительную долю в пробе крови Т-лимфоцитов, чьи прогениторы получили высокую дозу в ККМ, и Т-лимфоцитов, облучившихся только при циркуляции. Эти модельные оценки делаются с учетом инволюционных изменений тимуса и возрастного снижения его продукции. На важность использования модельного подхода при анализе цитогенетических данных указывается, в частности, и в обзоре Европейской группы по радиационной дозиметрии EURADOS [13].

За последние годы регистр измерений FISH жителей прибрежных сел р. Теча был пополнен. Кроме того, были разработаны новые подходы к уточнению доз облучения жителей, родившихся в период максимальных сбросов в р. Теча [14]. Таким образом, целью нашей работы является анализ дозовой зависимости частоты транслокаций в Т-лимфоцитах периферической крови у доноров

различного возраста. Доза на ткань-мишень, с облучением которой мы связывали появление транслокаций в Т-лимфоцитах, — это сумма доз на прогениторы и циркулирующие Т-лимфоциты (ПЦТЛ), вклад которых взвешен в соответствии с динамикой выхода прогениторов из ККМ и долями Т-лимфоцитов, сформированных до и после начала облучения.

Для достижения цели решались следующие задачи: 1) оценка для каждого донора индивидуальных доз облучения ККМ и других лимфоидных тканей на основе последних дозиметрических подходов, а также оценка на их основе доз на ПЦТЛ; 2) анализ зависимостей доза–эффект для частоты транслокаций в трех возрастных группах: 0–5 лет, 6–18 лет и старше 18 лет.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Характеристика доноров, жителей прибрежных сел р. Теча, обследованных методом FISH

Выборка доноров включает 197 человек, для которых было сделано 212 обследований методом FISH. Некоторые доноры были обследованы дважды в разное время в период 1994–2021 гг. Настоящая выборка включает людей, ранее описанных в работах [11] ($n = 178$), а также дополнительное число доноров (19 человек), подсчет транслокаций которых был проведен в последние годы. Число проб мужчин — 72, женщин — 140. Средний возраст на момент начала облучения (в 1950 г.) составил 11.8 лет, диапазон минимальных и максимальных значений: 0–38 лет. Средний возраст на момент забора крови для анализа FISH составил 66.9 (42–87) лет.

Цитогенетические методы оценки числа транслокаций

Протоколы FISH и подробные описания подсчета хромосомных aberrаций были даны в предыдущих работах [7, 15]. Во всех случаях использовали цельно-хромосомные зонды для окрашивания трех пар хромосом. Подсчет aberrаций был выполнен в цитогенетических лабораториях нескольких научных центров при окрашивании следующих пар хромосом: в УНПЦ РМ (в том числе все исследования последних пяти лет) и лаборатории Public Health England (Великобритания), пары — 2, 3, 5; в Институте радиобиологии им. Гельмгольца (Германия), пары — 1, 4, 12; а также в Лейденском университетском медицинском центре (Нидерланды), пары — 1, 4, 8. Всего было просчитано 104721 GE (геном-эквивалентов) и обнаружено 2540 транслокаций.

Оценка доз облучения доноров

Все доноры при проживании в прибрежных селах р. Теча подвергались внешнему γ -облучению и внутреннему β, γ -облучению, последнее в основном за счет $^{89,90}\text{Sr}$ и ^{137}Cs [16, 17]. Помимо $^{89,90}\text{Sr}$ и ^{137}Cs учитывались дозы облучения от $^{141,144}\text{Ce}$, ^{95}Zr , ^{95}Nb , $^{103,106}\text{Ru}$. Для индивидуализации доз внутреннего облучения использовали результаты прижизненных измерений содержания ^{90}Sr в организме на спектрометре излучений человека (СИЧ-9.1), если таковые имелись для конкретного индивида. Для индивидуализации доз внешнего облучения были использованы данные о месте проживания человека в конкретном населенном пункте (расстояние дома от уреза воды). Всего 147 человек (75%) либо сами измерялись на СИЧ-9.1, либо измерялись члены их семей, поэтому дозы их внутреннего облучения были ранее индивидуализированы (оценены индивидуальными уровнями поступления радионуклидов). Для 14 человек (24% доноров из группы 0–5 лет) дозы впервые были индивидуализированы на основании измерений β -активности передних зубов с помощью зубного датчика [14].

Расчет доз на КKM, тонкий и толстый кишечник и другие внескелетные лимфоидные ткани (BT, соответствуют дозе на мышцы) для всех доноров был проведен с использованием последней версии дозиметрической системы р. Теча (TRDS-2016) [16]. Дозы рассчитывали с момента начала облучения до даты отбора проб крови, кроме того, при расчете доз на ПЦТЛ использовали годовые мощности доз, как это описано ниже. Следует отметить, что более 70% дозы на КKM от $^{89,90}\text{Sr}$ было получено в течение первых 5 лет облучения.

Лица, родившиеся после начала радиоактивного загрязнения (после 1949 г.), получили также дозу внутриутробного облучения (15 человек), которая оценивалась с использованием отдельного блока TRDS-2016. Средняя доза (min-max) на КKM для них составила 0.072 (0–0.266) Гр, внутриутробные дозы на другие ткани не учитывались в расчетах, так как их вклад был несущественным.

Дозы на ПЦЛТ были рассчитаны с использованием программы “Лимфоциты” по алгоритму, описанному ранее [11]. В модели были отражены следующие особенности формирования пула циркулирующих Т-лимфоцитов [10]:

1. Все Т-лимфоциты происходят от Т-клеточных предшественников – прогениторов, которые формируются в КKM. Через кровеносное русло часть из них переходит в тимус, где происходит формирование Т-лимфоцитов с уникальными Т-клеточными рецепторами. Т-лимфоциты в периферических лимфоидных тканях образуют многоклеточные и часто долгоживущие клоны клеток с одинаковыми Т-клеточными рецепторами; репертуар Т-кло-

нов формируется в детстве и остается довольно стабильным в течение жизни (до 70 лет).

2. При облучении Т-прогенитора в КKM потенциальный груз хромосомных aberrаций несут все его потомки, т.е. целый набор Т-клонов с уникальными Т-клеточными рецепторами. Все потомки одного прогенитора и сам прогенитор объединяются в Т-клеточный род или Т-Genus (TG), который является объектом моделирования.

Принималось, что продукция TG прямо пропорциональна продукции тимусом Т-лимфоцитов. Потеря TG в течение жизни не оказывает существенного влияния на возрастное соотношение представителей различных TG в периферической крови, поскольку предполагалось, что потеря TG пропорциональна их продукции. В свою очередь, для оценки зависящей от возраста продукции тимусом Т-лимфоцитов, которое определяется по числу недавних тимусных эмигрантов (recent thymus emigrants RTE), использовали результаты моделирования I. Bains [18, 19]. Эта модель базируется на экспериментальных данных по скорости пролиферации различных фракций Т-лимфоцитов, их количеству в периферической крови, возрастной динамике и т.п. Были выделены следующие возрастные периоды в соответствии с продукцией тимуса. От рождения до 1 года: продукция тимусом Т-лимфоцитов увеличивается, достигая максимума к 1 году; от 1 года до 8 лет: падение продукции тимуса идет со скоростью 12% в год; от 8 до 20 лет: падение продукции со скоростью 4% в год; от 20 до 70 лет: снижение продукции тимуса со скоростью 8% в год. Эти оценки использовались нами как модельные параметры для оценки возрастной динамики TGs в относительных единицах (рис. 1).

Для доли TG, сформированных до начала облучения (рис. 1, б, в, левая светлая часть) учитывали только дозу, накопленную лимфоцитами и их потомками при циркуляции. Для доли TG, сформированных после начала облучения (рис. 1, б, в, правая темная часть) учитывали два компонента облучения: дозу, накопленную в период пребывания прогениторов в КKM, и дозу, накопленную лимфоцитами (потомками прогениторов) в период их циркуляции. Для удобства рассчитывали отдельно дозу на прогениторы и дозу на циркулирующие лимфоциты.

Средневзвешенная доза на прогениторы (D_{LP}) представляет собой дозу, накопленную прежде, чем прогениторы покинули КKM и начали генерировать Т-лимфоциты в тимусе, рассчитывается как среднее значение, взвешенное в соответствии с долей потомков каждого прогенитора в периферической крови на момент забора пробы:

$$D_{LP} = \frac{1}{P_{TG}(age_s)} \int_{t_1}^{t_s} [f(age) \times D_{KKM}(t, age)] dt; \quad (1)$$

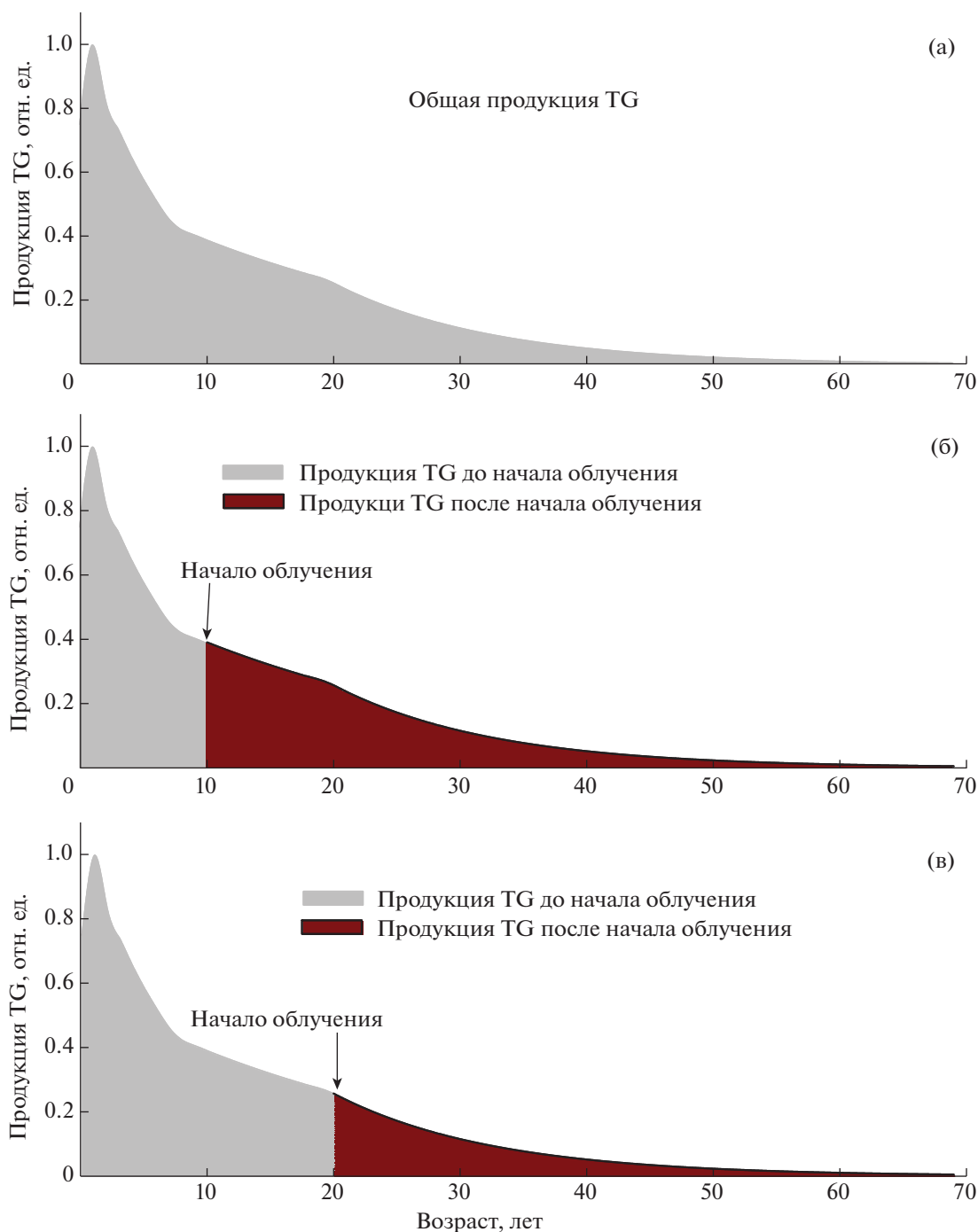


Рис. 1. Возрастная зависимость продукции ТГ; площади под кривыми отражают суммарные значения ТГ: а – за период от рождения до 70 лет; б – до и после начала облучения в возрасте 10 лет; и в – до и после начала облучения в возрасте 20 лет.

Fig. 1. Age dependence of TGs production; the areas under the curves reflect the total values of TGs: (a) for the period from birth to the age of 70; (б) before and after the onset of exposure at 10 years of age; and (в) before and after the onset of exposure at the age of 20.

где t – календарное время (годы); t_1 – первый год накопления дозы с начала облучения; t_s – год забора пробы; t_{birth} – год рождения донора; $age = t - t_{birth}$ – возраст донора (годы), который варьи-

рует от возраста на момент начала облучения $age_1 = t_1 - t_{birth}$ до возраста на момент забора крови $age_s = t_s - t_{birth}$; $P_{TG}(age)$ – общее число Т-клеточных родов, произведенных в период от рождения

до указанного возраста (в относительных единицах), определяется как интеграл функции $f_{TG}(age)$,

которая описывает возрастную динамику производства TG:

$$P_{TG}(age) = \int_0^{age} f_{TG}(t) dt; \quad (2)$$

$$f_{TG}(age) = \begin{cases} 0.5 + 0.5age, & 0 \leq age \leq 1 \\ \exp(-0.12(age - 1)), & 1 < age \leq 8 \\ 0.4317 \exp(-0.04(age - 8)), & 8 < age \leq 20 \\ 0.2671 \exp(-0.08(age - 20)), & 20 < age \end{cases} \quad (3)$$

$D_{KKM}(t, age)$ — поглощенная доза на ККМ, накопленная к возрасту age с момента начала облучения, рассчитывается с учетом возраста и истории облучения донора (проживания на загрязненных территориях).

Средневзвешенная доза на циркулирующие лимфоциты D_{LC} рассчитывается с учетом их пребывания в четырех компартментах: ВТ, ККМ, толстый кишечник (*col*), тонкий кишечник (*small*) в отношении 0.853; 0.10; 0.025; 0.022 [12]:

$$D_{LC} = \frac{1}{P_{TG}(age_s)} \int_{t_1}^{t_s} P_{TG}(age) [0.85 \dot{D}_{BT}(t, age) + 0.1 \dot{D}_{KKM}(t, age) + 0.025 \dot{D}_{col}(t, age) + 0.022 \dot{D}_{small}(t, age)] dt, \quad (4)$$

где $P_{TG}(age)$ — рассчитывается согласно уравнению (2) и (3) в относительных единицах;

$\dot{D}_{KKM}(t, age)$ — годовая мощность поглощенной дозы в ККМ, которая является функцией календарного времени, возраста и истории облучения конкретного донора;

$\dot{D}_{col}(t, age)$ — годовая мощность поглощенной дозы в толстом кишечнике;

$\dot{D}_{small}(t, age)$ — годовая мощность поглощенной дозы в тонком кишечнике.

Таким образом, полная средневзвешенная доза на ПЦТЛ рассчитывается на основе уравнений (1) и (4) как сумма $D_{LP} + D_{LC}$.

Если донор был облучен в период внутриутробного развития, т.е. его мать в период беременности проживала на радиоактивно загрязненных территориях, то доза внутриутробного облучения ККМ прибавляется к дозе на Т-прогениторы (D_{LP}).

Статистическая обработка данных

Вычисления стандартных параметров проводили с помощью лицензионных программ Microsoft Excel и SigmaPlot на персональном компьютере. Кроме этого, для оценки связи между суммарной дозой облучения ПЦТЛ и частотой

транслокаций был использован модуль AMFIT программного пакета EPICURE [20], позволяющий построить линейную регрессионную зависимость, используя распределение Пуассона и пуассоновское среднее для группированных данных:

$$Y(age_1, age_s, sex, dose) = Y_0(age_s, sex) + \beta \times dose, \quad (5)$$

где $Y(age_1, age_s, sex, dose)$ — ожидаемая частота транслокаций на GE, зависит от возраста на начало облучения age_1 ; возраста на момент забора крови age_s , пола sex и накопленной дозы облучения $dose$; $Y_0(age_s, sex)$ — ковариантно-специфическая фоновая частота транслокаций на GE, зависящая от возраста age_s на момент забора крови и пола sex ; β — увеличение частоты транслокаций на GE (угол наклона линии регрессии).

Переменные были распределены по следующим категориям. Возраст на момент забора крови age_s (годы) — четыре категории: <50; 50–60; 60–70; >70; возраст на начало облучения age_1 (годы) — три категории: 0–5; 6–18; >18. Доза $dose$ рассматривалась как непрерывная переменная.

Во всех случаях значения параметров вычисляли с помощью метода максимального правдоподобия, а значения P оценивали на основании двухсторонних тестов. Так как в группе доноров не было лиц с нулевыми дозами облучения, значения фоновой частоты транслокаций (параметр Y_0) получали методом экстраполяции линейной регрессии к нулевой дозе. Для каждого параметра определяли среднее значение, стандартную ошибку (SE), уровень значимости (p), 95%-ный доверительный интервал (CI).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты оценки индивидуальных доз облучения доноров

Для всех доноров были рассчитаны индивидуальные дозы облучения. В табл. 1 представлены дозовые характеристики выборки. Как следует из табл. 1, наибольшие дозы характерны для ККМ. Это связано с тем, что вклад изотопов стронция в суммарную дозу на ККМ для многих доноров со-

Таблица 1. Значения доз облучения лимфоидных органов/тканей на момент забора крови в зависимости от возраста, Гр**Table 1.** Values of exposure doses to lymphoid organs/tissues at the time of blood sampling depending on age, Gy

Орган-мишень	Дозы в возрастных группах по годам; среднее (95% CI)			
	0–5	5–18	18–38	вся выборка
ККМ	1.01* (0.07–2.53)	1.19 (0.14–2.95)	0.61 (0.02–2.28)	1.02 (0.04–2.83)
ВТ	0.27 (0.01–0.80)	0.24 (0.01–0.72)	0.24 (0.01–0.68)	0.25 (0.01–0.73)
Толстый кишечник	0.37 (0.02–0.93)	0.33 (0.03–0.9)	0.27 (0.01–0.79)	0.33 (0.02–0.92)
Тонкий кишечник	0.3 (0.01–0.82)	0.26 (0.02–0.75)	0.23 (0.01–0.67)	0.27 (0.01–0.78)
ПЦТЛ	0.83 [#] (0.05–2.08)	0.64 (0.08–1.51)	0.33 (0.01–0.92)	0.62 (0.03–1.51)

Примечание.* Включает внутриутробную дозу на ККМ для облучившихся *in utero*; [#] доза на ККМ, полученная *in utero*, учтена как прибавка к дозе на прогениторы D_{LP} .

ставлял более 90%. Промежуточное положение занимают дозы на ПЦТЛ. Более низкие средние дозы на органы по сравнению с другими группами характерны для взрослых (почти в 2 раза ниже, чем в группе 6–18 лет). Это связано с возрастными особенностями метаболизма стронция, с преимущественным его накоплением в растущей костной ткани. Следует отметить, что верхние границы 95% CI в возрастных группах отличаются не столь значительно.

На рис. 2 показано накопление дозы на ПЦТЛ в течение 30 лет после начала облучения на примере донора в возрасте $age_1 = 10$, проживавшего в среднем течении р. Теча, где более 90% дозы было обусловлено $^{89,90}\text{Sr}$. Как показывают расчеты, к возрасту 10 лет (начало облучения) около половины TG, вырабатываемых в течении жизни донора, уже сформировано (рис. 1, б). Это означает, что около половины прогениторов покинули ККМ до начала радиационного воздействия и дали начало в тимусе Т-лимфоцитам с разными Т-клеточными рецепторами. Рисунок 2, а иллюстрирует накопление дозы в этой доле TG (потомство необлученных прогениторов), которые циркулировали и пролиферировали в тканях организма с начала облучения до момента забора крови. Составляющие эту долю Т-лимфоциты (представители TG) получили одинаковую дозу D_0 , которая представляет собой сумму доз, накопленных при циркуляции через ВТ, ККМ, толстый и тонкий кишечник в соответствии с долей времени, проведенной в этих органах и тканях. Накопленная доза для этой доли TG составляет около 90 мГр за 30 лет (рис. 2, а).

На рис. 2, б представлено накопление дозы в другой части TG, присутствующих в образце крови донора. Эти TG произошли от прогениторов, облученных в ККМ, которые потенциально передали своим потомкам груз хромосомных aberrаций. Прогениторы покидали ККМ в различное время (t_1, t_2, t_3) после начала облучения. Достигая тимуса, они в короткое время давали начало

Т-лимфоцитам, продолжавшим облучение при циркуляции в теле. Результирующие дозы (D_1, D_2, D_3) представляют собой сумму доз на прогениторы и лимфоциты-потомки. Максимальная доза D_3 (более 900 мГр) наблюдалась, если прогениторы провели длительное время (25 лет) в ККМ. Однако число прогениторов, достигающих тимуса и дающих начало новым Т-лимфоцитам (RTE), резко уменьшается с возрастом, поэтому вклад потомков таких “высокодозовых” прогениторов в пул циркулирующих лимфоцитов не велик.

Таким образом, на момент забора крови все циркулирующие лимфоциты получили ту или иную дозу облучения, которая взвешивается в соответствии с их долей. С учетом всех вкладов, средневзвешенная доза на ПЦТЛ для данного донора составила 490 мГр, при этом различные фракции лимфоцитов получили дозу от 90 до 950 мГр.

Возрастная зависимость частоты транслокаций в отдаленные сроки после начала облучения

В табл. 2 показаны рассчитанные нами фоновые значения частоты транслокаций в зависимости от возраста. Уровень значимости оценки параметра во всех случаях был высоким ($p < 0.001$). Для сравнения в табл. 2 приведены величины, полученные в рамках обширного международного исследования [3], где число доноров интересующего возрастного диапазона составило $n = 817$.

Как следует из табл. 2, во всех случаях наблюдается увеличение фоновой частоты с увеличением возраста. Найденные нами оценки не отличаются от фоновых значений для необлученных доноров [3] ($p > 0.05$), что говорит об адекватности используемого модельного подхода.

Хотя наши предыдущие исследования не обнаружили влияния пола на частоту радиационно-индуцированных транслокаций [21], мы провели оценку параметров регрессии отдельно для мужчин и женщин. В табл. 3 показаны значения ча-

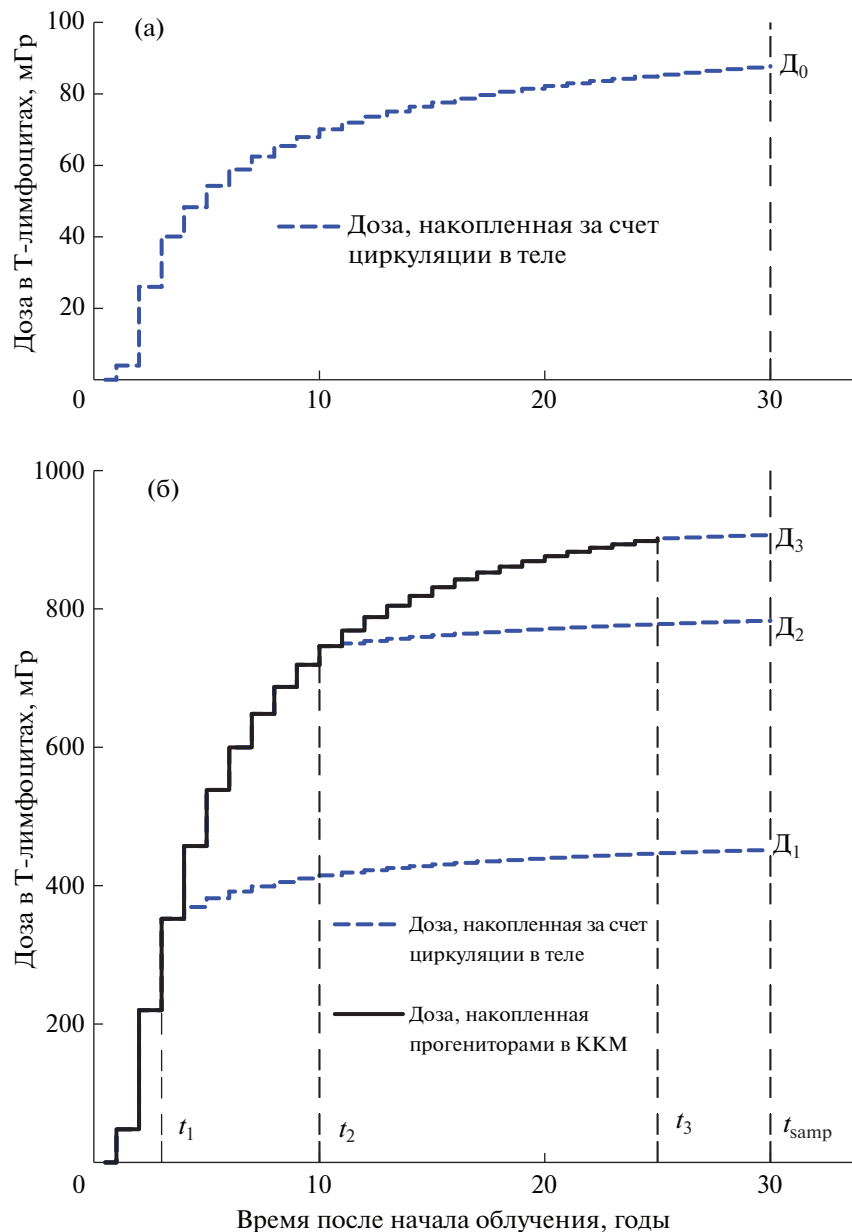


Рис. 2. Схема, показывающая принцип формирования поглощенной дозы к моменту забора крови (t_{samp}) в гетерогенной популяции Т-лимфоцитов: а – формирование годовых поглощенных доз в Т-лимфоцитах, которые уже находились в периферическом пуле в начале облучения (потомки необлученных прогениторов); они получали одинаковую “циркуляционную” дозу (D_0) из-за циркуляции в организме; б – формирование доз в Т-лимфоцитах, которые являются потомками облученных прогениторов, покинувших ККМ в разное время (t_1 , t_2 , t_3); эти Т-лимфоциты получили разные дозы (D_1 , D_2 , D_3), которые являются суммой “прогениторной дозы” и “циркуляционной дозы”.

Fig. 2. Scheme showing the principle of the absorbed dose formation at the time of blood sampling (t_{samp}) in a heterogeneous population of T-lymphocytes: а – formation of annual absorbed doses in T-lymphocytes that have already been in the peripheral pool at the beginning of exposure (descendants of unexposed progenitors); they received the same dose (D_0) due to circulation in the body; б – the formation of doses in T-lymphocytes, which are the descendants of exposed progenitors that left the RBM at different time (t_1 , t_2 , t_3); these T-lymphocytes received different doses (D_1 , D_2 , D_3), which are the sum of the “progenitor dose” and the “circulating dose”.

стоты транслокаций на 1000 GE на 1 Гр дозы с учетом базовых фоновых значений, для мужчин и женщин. Во всех случаях уровень значимости оценки параметра $p < 0.001$. Как следует из табл. 3, значения β у мужчин и женщин достоверно не от-

личаются, но наблюдается тенденция более высоких значений для мужчин.

В табл. 4 представлены возрастные зависимости частоты транслокаций на 1000 GE на 1 Гр дозы с учетом базовых фоновых значений; уровень

Таблица 2. Фоновая, зависящая от возраста, частота транслокаций на 1000 GE в сопоставлении опубликованными данными**Table 2.** Background age-dependent translocation frequency per 1000 GE in comparison to published data

Возраст, годы	Настоящее исследование, оба пола, среднее (95% CI),	Данные [3], оба пола, среднее (95% CI)
<50	9.1 (4.0–11.9)	7.9 (7.0–10.4)
50–60	9.3 (5.13–11.8)	8.9 (8.0–13.5)
60–70	14.9 (13.79–18.1)	12.1 (10.5–13.8)
>70	16.0 (15.4–19.4)	16.1 (13.6–21.4)

значимости оценки параметра для всех групп $p < 0.001$. Как видно, число транслокаций на 1 Гр дозы в группе детей 0–5 лет значимо ниже, чем в группе 6–18 лет, но не в группе взрослых. Мы не получили статистически значимых отличий между значениями β для детей 0–5 лет и лиц старше 18 лет, хотя значение для взрослых было выше в 1.3 раза. Таким образом, если облучение произошло в раннем возрасте, то впоследствии регистрируется более низкая частота транслокаций относительно остальных возрастов.

ОБСУЖДЕНИЕ

Применение модели облучения Т-лимфоцитов и их предшественников для расчетов дозы на ПЦТЛ

При интерпретации наших цитогенетических данных мы связываем эффект (частота транслокаций) с дозой на ПЦТЛ, которая отражает возрастную динамику формирования Т-лимфоцитов и учитывает неравномерность облучения органов и тканей основным источником облучения доноров — $^{89,90}\text{Sr}$. Мы впервые применили разработанную нами модель облучения Т-лимфоцитов, позволяющую рассчитывать дозы на ПЦТЛ, для изучения возрастных зависимостей формирования транслокаций. Учтены следующие компоненты дозы — доза на прогениторы, полученная в ККМ, а также доза, полученная Т-лимфоцитами в процессе их циркуляции в организме (последнее относится к потомкам облученных и необлученных прогениторов). Кроме того, учтен относительный вклад каждого компонента дозы, который зависит от возраста. С увеличением возраста на начало облучения наблюдается снижение вклада про-

гениторной дозы, что косвенно отражает резкое снижение продукции тимуса с возрастом.

В плане верификации предложенного нами модельного подхода мы сопоставили частоту транслокаций на 1 Гр дозы с опубликованными данными по внешнему γ -облучению. Частота транслокаций на 1 Гр дозы является важным показателем/коэффициентом, который позволяет перейти от подсчитанных транслокаций в Т-лимфоцитах конкретного донора к дозе облучения. Поскольку в случае внешнего γ -облучения доза на Т-лимфоциты и ККМ практически совпадает, то коэффициент позволяет перейти к дозе облучения ККМ. В случае неравномерного внутреннего облучения радиоизотопами стронция доза на ПЦТЛ близка к дозе облучения ККМ только для детей младшего возраста, для старших возрастов различия между дозами на ПЦТЛ и ККМ уже весьма существенны (табл. 1). В этой связи представляет интерес сравнить полученные нами значения β для взрослых с опубликованными данными по внешнему γ -облучению [5]. Такие данные были получены в результате международного исследования по оценке частоты транслокаций у работников ядерного предприятия в Селлафилде (Sellafield nuclear facility, Cumbria, UK; $n = 459$), подвергавшихся преимущественно внешнему облучению [5]. Работники, как и в случае с донорами из когорты р. Теча, подвергались пролонгированному облучению с небольшой мощностью дозы. Кроме того, при анализе результатов в этой работе использовали те же статистические подходы, т.е. для расчетов параметров регрессии был использован модуль Amfit программы EPICUR и дозы на ККМ. На рис. 3 показано сопоставление полученных нами значений β и аналогичной величины из работы [5]: $\beta = 11.6 \pm 1.6$. Как следует из рис. 3, полученные нами значения, как для взрослых (18–38 лет), так и для всей выборки (0–38 лет), практически совпадают с экспериментальными данными по внешнему облучению, что говорит о приемлемости нашей модели.

Правомерность использованного модельного подхода также подтверждает хорошее согласование рассчитанных нами фоновых частот транслокаций с опубликованными данными (табл. 2).

Таблица 3. Значения угла наклона регрессии доза—эффект для мужчин и женщин**Table 3.** Dose-response regression slope values for men and women

Группа	Число транслокаций на 1000 GE на 1 Гр $\beta \pm \text{SE}$ (95% CI)
Мужчины	14.0 ± 1.6 (11.0–17.1)
Женщины	11.0 ± 1.2 (8.6–13.5)

Таблица 4. Значения угла наклона регрессии доза–эффект в возрастных группах**Table 4.** Dose-response regression slope values in the age groups

Группы#	Возраст на начало облучения, годы	<i>n</i>	Число транслокаций на 1000 GE на 1 Гр $\beta \pm SE$ (95% CI)
1	0–5	58	9.3 ± 1.3 (6.7–11.9)
2	5–18	108	$15.3 \pm 1.5\#$ (12.4–18.3)
3	18–38	46	11.9 ± 2.9 (6.3–17.8)

Статистически значимые различия относительно группы 0–5 лет.

Применение модельного подхода ставит вопрос о неопределенностях дозовых оценок на ПЦТЛ, однако это является отдельной задачей, которая будет решаться в дальнейшем. В настоящее время мы можем указать на основные источники неопределенностей и общие подходы к их оценке:

1. *Неопределенность оценки доз на органы и ткани (ККМ, ткани кишечника), рассчитанных по системе TRDS-2016.* В настоящем исследовании использованы детерминированные (точечные) оценки индивидуальной дозы на органы и ткани [16] для обследованных доноров. Создание стохастической версии TRDS-2016 позволяет определить границы неопределенности индивидуальных оценок доз на основе стохастического моделирования с использованием характеристик статистического распределения значений каждо-

го параметра [22]. Работа над стохастической версией сейчас близка к завершению.

2. *Неопределенность использованной модели возрастной динамики TG, соответствующей динамике (RTE) [18].* Оценки неопределенности возрастной динамики RTE были сделаны автором модели I. Bains [18, 19]. Следует также отметить, что существуют и другие подходы к моделированию динамики Т-лимфоцитов (но не динамики TG), представленные, к примеру, в работах [23–25]. Преимущество использованной нами модели I. Bains [18, 19] в том, что она описывает динамику RTE в течение жизни и хорошо согласуется с большим набором экспериментальных данных количеству наивных Т-клеток в крови человека, включая данные о пациентах с тимэктомией. По мере накопления знаний о формировании иммунной системы в онтогенезе возможно измене-

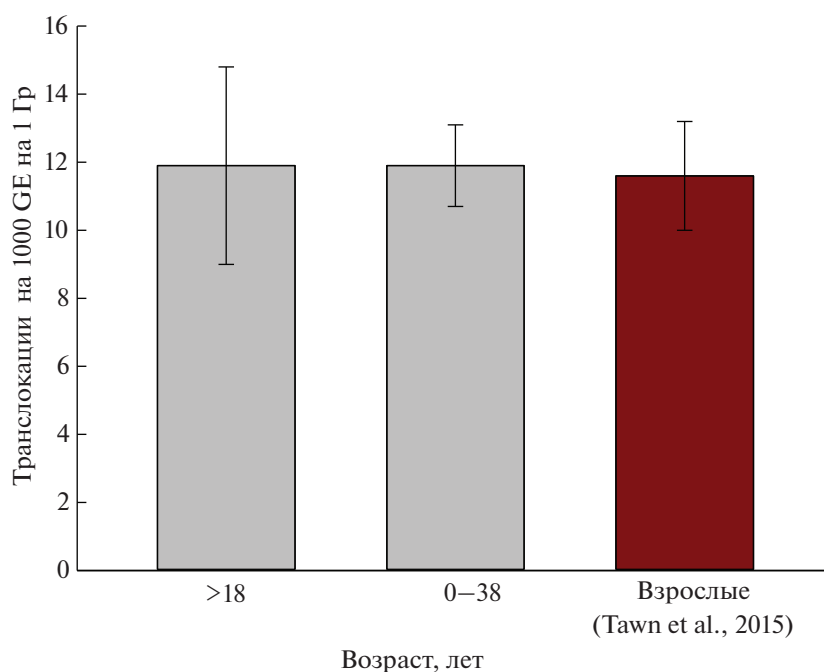


Рис. 3. Значения β для группы старше 18 лет и всей выборки (светлые столбики), а также согласно [5] (темный столбик). Вертикальные линии отражают диапазон ошибки среднего.

Fig. 3. The values of β for the age group over 18 years and the entire sample (light bars), as well as according to [5] (dark bar). The error bars show the range of standard error.

ние параметров модели и более точное количественное описание динамики ТГ.

3. *Неопределенность, которую вносит допущение, что потеря ТГ в течение жизни не оказывает существенное влияние* на соотношение представителей различных ТГ в периферической крови на момент ее забора. Другими словами, это предполагает, что потеря ТГ всегда составляет одинаковую долю от произведенных ТГ независимо от возраста. Мы планируем смоделировать влияние изменений скорости потери ТГ в разные возрастные периоды на соотношение представителей различных ТГ в периферической крови и, соответственно, на дозовые оценки.

4. *Неопределенность, связанная с учетом внутриутробного облучения.* Мы не рассматривали динамику формирования циркулирующих Т-клеток во внутриутробный период. В качестве грубого приближения принимали, что генерация тимусом Т-лимфоцитов началась после рождения, а до этого облучались только прогениторы в костном мозге плода. Эта проблема также требует более детального рассмотрения.

Интерпретация возрастных зависимостей частоты транслокаций в отдаленные сроки после облучения

Гетерогенность циркулирующих Т-лимфоцитов осложняет понимание причин влияния возраста на начало облучения на частоту транслокаций в отдаленные сроки, т.е. через 60 и более лет после начала облучения. Согласно нашим оценкам (табл. 4), в возрасте 0–5 лет формирование транслокаций (на 1 Гр), которые в течение длительного времени проявляются в циркулирующих Т-лимфоцитах, существенно ниже, чем в следующей возрастной группе 5–18 лет. Транслокации являются следствием неверно репарированных двунитевых разрывов ДНК (ДР), не приведших к гибели клетки, т.е. формально они прямо пропорциональны числу ДР после облучения и обратно пропорциональны эффективности репарации. В этой связи представляют интерес опубликованные экспериментальные данные по влиянию возраста на эти процессы. Как показал анализ, эти данные неоднозначны.

Прежде всего, исследования по людям весьма ограничены и касаются облучения клеток *in vitro*. Rube et al., 2011 [4] изучали уровень эндогенных (фоновых) нерепарированных двунитевых разрывов ДНК в гемопоэтических стволовых и прогениторных клетках (ГСК) в зависимости от возраста человека, а также число ДР через 8 и 24 ч после рентгеновского облучения ГСК *in vitro* в дозе 2 Гр. Число нерепарированных ДР регистрировали по числу очагов $\gamma\text{H2AX-foci}$ ¹ на клетку, выделяя группу новорожденных (клетки взяты из пу-

повинной крови, $n = 34$) и взрослых (16–86 года, $n = 68$). В результате было показано, что ГСК новорожденных демонстрировали более низкий (относительно взрослых) фоновый уровень повреждения ДНК (число ДР) и значительно более эффективную репарацию ДНК после облучения. То есть и до, и после облучения число ДР у новорожденных было существенно ниже. R.J. de Boer et al. [26], также изучавшие частоту ДР по $\gamma\text{H2AX-foci}$ в Т-лимфоцитах периферической крови² людей, обнаружили аналогичную возрастную зависимость, т.е. максимальное число ДР было в группе взрослых. Это наблюдалось как в необлученных клетках, так и после облучения в дозе 1 Гр. Важно, однако, отметить, что по данным [26] число зарегистрированных дицентриков после облучения было в 1.5 раза выше у детей (2–5 лет) по сравнению с взрослыми (>20 лет). То есть не обнаружена прямая зависимость числа нестабильных хромосомных aberrаций после радиационного воздействия от частоты ДР и их репарации.

Интересные результаты были также обнаружены в экспериментах на мышах. M. Gomolka et al. [27] отмечают, что после облучения в дозе 4 Гр число ДР в ГСК у детенышей было достоверно ниже, чем у взрослых особей. Увеличение ДР с возрастом авторы связывают с большей выраженностью хронического окислительного стресса после облучения у взрослых, обусловленного провоспалительными состояниями, по сравнению с детенышами. В подробном исследовании K. Ariyoshi et al. [28] изучали радиационный ответ клеток селезенки (у мышей это гемопоэтическая ткань) и обнаружили, что у детенышей и старых взрослых наблюдаются одинаковое число разрывов ДНК и скорость репарации, однако у детенышей наблюдалась значительно более высокая пострadiационная индукция апоптоза.

Для объяснения полученных нами результатов также представляют интерес данные о разной радиочувствительности стволовых кроветворных клеток/прогениторов и периферических Т-лимфоцитов. I.P. Kovalchuk et al. [29], исследовавшие стволовые клетки из пуповинной крови, а также циркулирующие Т-лимфоциты взрослых и новорожденных, отмечают, что у новорожденных как в ГСК, так и в Т-клетках формируется одинаковое число ДР, но скорость репарации выше в стволовых клетках. При сравнении частоты ДР в Т-лимфоцитах новорожденных и взрослых авторы отмечают более высокую частоту ДР в Т-лимфоцитах новорожденных, объясняя это различиями в укладке ядерного хроматина.

¹ Один из ключевых белков, участвующих в репарации ДР.

² Авторы не указывали, что изучали именно Т-лимфоциты, но указанные методики применяются именно для цитогенетических исследований Т-лимфоцитов.

Таким образом, опираясь на опубликованные данные, можно предположить, что обнаруженные нами более низкие значения частоты транслокаций в группе 0–5 лет отражают: 1) более высокую скорость репарации ДР в ГСК (основной источник формирования транслокаций в Т-лимфоцитах для этого возраста) по сравнению с Т-лимфоцитами, вклад которых резко увеличивается с возрастом; и/или 2) более низкую частоту возникновения ДР в прогениторах и Т-лимфоцитах вследствие менее выраженного оксидативного стресса и провоспалительных состояний у новорожденных и детей раннего возраста; и/или 3) более высокую индукцию апоптоза в этой возрастной группе после облучения, что приводит к более эффективному удалению клеток с генетическими повреждениями.

Направления дальнейшей работы

Мы видим два основных направления дальнейшей работы. Во-первых, это накопление данных по частоте хромосомных aberrаций у доноров в группах 0–18 лет на момент облучения. Следует отметить, что группа взрослых на момент облучения (18–38 лет) оказалась самой малочисленной и имеет максимальный разброс значений угла наклона регрессии. К сожалению, эта группа не может быть пополнена, так как объединяет лиц старше 1932 г. р. Во-вторых, это дальнейшее усовершенствование модели облучения Т-лимфоцитов и учет неопределенностей дозовых оценок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были выявлены следующие возрастные зависимости частоты транслокаций в Т-лимфоцитах от дозы на ПЦТЛ: наименьшее число транслокаций на 1000 GE на Гр выявлено у доноров в возрасте 0–5 лет (9.3 ± 1.3), что статистически значимо ниже, чем у детей 6–18 лет (15.3 ± 1.5), но не у взрослых (11.9 ± 2.9). Для взрослых (>18 лет) полученное значение после внешнего характеризовалось максимальным разбросом, но оказалось близким к величинам, полученным в международном исследовании профессионалов облучения (11.6 ± 1.6). Полученные возрастные зависимости требуют дальнейших дополнительных исследований для их интерпретации.

Значения фоновых частот транслокаций, определенных в различных возрастных группах, соответствует опубликованным данным, полученным в объединенном международном исследовании по необлученным донорам. Мы также подтвердили отсутствие влияния пола на частоту транслокаций.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность В.А. Кривошапо-ву и С.Б. Епифановой за техническую помощь в работе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tucker J.D.* Low-dose ionizing radiation and chromosome translocations: a review of the major considerations for human biological dosimetry // *Mutat. Res.* 2008. V. 659. № 3. P. 211–20. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2008.04.001>
2. *Vorobtsova I., Semenov A., Timofeyeva N. et al.* An investigation of the age-dependency of chromosome abnormalities in human populations exposed to low-dose ionising radiation // *Mech. Ageing Dev.* 2001. V. 122. № 13. P. 1373–82. [https://doi.org/10.1016/s0047-6374\(01\)00275-5](https://doi.org/10.1016/s0047-6374(01)00275-5)
3. *Sigurdson A.J., Ha M., Hauptmann M., Bhatti P. et al.* International study of factors affecting human chromosome translocations // *Mutat. Res.* 2008. V. 652. № 2. P. 112–21. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2008.01.005>
4. *Rube C.E., Fricke A., Widmann T.A. et al.* Accumulation of DNA Damage in Hematopoietic Stem and Progenitor Cells during Human Aging // *PLoS ONE*. 2011. V. 6. № 3. P. e17487. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0017487>
5. *Tawn E.J., Curwen G.B., Jonas P. et al.* Chromosome Aberrations Determined by FISH in Radiation Workers from the Sellafield Nuclear Facility // *Radiat. Res.* 2015. V. 184. № 3. P. 296–303. <https://doi.org/10.1667/RR14125.1>
6. *Sotnik N.V., Osovets S.V., Scherthan H., Azizova T.V.* mFISH analysis of chromosome aberrations in workers occupationally exposed to mixed radiation // *Radiat. Environ. Biophys.* 2014. V. 53. № 2. P. 347–54. <https://doi.org/10.1007/s00411-014-0536-7>
7. *Vozilova A.V., Shagina N.B., Degteva M.O. et al.* Preliminary FISH-based assessment of external dose for residents exposed on the Techa River // *Radiat. Res.* 2012. V. 177. № 1. P. 84–91. <https://doi.org/10.1667/rr2485.1>
8. *Vozilova A.V., Shagina N.B., Degteva M.O. et al.* FISH analysis of translocations induced by chronic exposure to Sr radioisotopes: second set of analysis of the Techa River Cohort // *Radiat. Prot. Dosim.* 2014. V. 159. № 1–4. P. 34–37. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu131>
9. *Дегтева М.О., Шишкина Е.А., Толстых Е.И. и др.* Использование методов ЭПР и FISH для реконструкции доз у людей, облучившихся на реке Теча // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2017. Т. 57. № 1. С. 34–45. [*Degteva M.O., Shishkina E.A., Tolstykh E.I. et al.* Application of the EPR and FISH Methods to Dose Reconstruction for People Exposed in the Techa River Area // *Radiat. Biol. Radioecol.* 2017. V. 57. № 1. P. 34–45. (In Russ.)] PMID: 30698929
10. *Толстых Е.И., Возилова А.В., Дегтева М.О. и др.* Концепция Т-клеточного рода как основа для анализа результатов цитогенетических исследований при локальном облучении костного мозга // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2020. Т. 60. № 1. С. 12–

25. [Tolstykh E.I., Vozilova A.V., Degteva M.O. et al. Concept of T-Cell Genus as the Basis for the Analysis of FISH Results after Local Bone Marrow Exposure // Radiats. Biol. Radioecol. 2020. V. 60. № 1. P. 12–25 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.31857/S0869803121040111>
11. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Vozilova A.V., Anspaugh L.R. Local bone-marrow exposure: how to interpret the data on stable chromosome aberrations in circulating lymphocytes? (some comments on the use of FISH method for dose reconstruction for Techa riverside Residents) // Radiat. Environ. Biophys. 2017. V. 56. № 4. P. 389–403. <https://doi.org/10.1007/s00411-017-0712-7>
12. Толстых Е.И., Дегтева М.О., Возилова А.В., Аклеев А.В. Подходы к цитогенетической оценке дозы при радиационном воздействии на лимфоидную ткань кишечника // Радиационная биология. Радиоэкология. 2021. Т. 61. № 4. С. 339–352. [Tolstykh E.I., Degteva M.O., Vozilova A.V., Akleyev A.V. Approaches to the Cytogenetic Assessment of the Dose due to Radiation Exposure of the Gut Associated Lymphoid Tissue // Radiats. Biol. Radioecol. 2021. V. 61. № 4. P. 339–352 (In Russ.)]. <https://doi.org/10.31857/S0869803121040111>
13. Giussani A., Lopez M.A., Romm H. et al. Eurados review of retrospective dosimetry techniques for internal exposures to ionising radiation and their applications // Radiat. Environ. Biophys. 2020. V. 59. № 3. P. 357–387. <https://doi.org/10.1007/s00411-020-00845-y>
14. Толстых Е.И., Дегтева М.О., Кривошапов В.А., Нанье Б.А. Метод оценки индивидуальных значений поступления ^{90}Sr с рационом на основе измерений зубного датчика у жителей прибрежных сел р. Теча. // Вопр. радиац. безопасности. 2019. Т. 93. № 4. С. 55–63 [Tolstykh E.I., Degteva M.O., Krivoschapov V.A., Napier B.A. Metod otsenki individual'nykh znacheniy postupleniya ^{90}Sr s ratsionom na osnove izmereniy zubnogo datchika u zhitel'ey pribrezhnykh sol r. Techa // Voprosy radiatsionnoy bezopasnosti. 2019. V. 93. № 4. P. 55–63 (In Russ.)]
15. Bauchinger M., Salassidis K., Braselmann H. et al. FISH-based analysis of stable translocations in a Techa River population // Int. J. Radiat. Biol. 1998. V. 73. № 6. P. 605–12. <https://doi.org/10.1080/095530098141852>
16. Degteva M.O., Napier B.A., Tolstykh E.I. et al. Enhancements in the Techa River Dosimetry System: TRDS-2016D Code for Reconstruction of Deterministic Estimates of Dose From Environmental Exposures // Health Phys. 2019. V. 117. № 4. P. 378–387. <https://doi.org/10.1097/HP.00000000000001067>
17. Дегтева М.О., Шагина Н.Б., Воробьева М.И. и др. Современное представление о радиоактивном загрязнении реки Теча в 1949–1956 гг. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56. № 5. С. 523–534. [Degteva M.O., Shagina N.B., Vorobiova M.I. et al. Contemporary Understanding of Radioactive Contamination of the Techa River in 1949–1956 // Radiats. Biol. Radioecol. 2016. V. 56. № 5. P. 523–534 (In Russ.)] PMID: 30703313. <https://doi.org/10.7868/S0869803116050039>
18. Bains I. Mathematical Modelling of T Cell Homeostasis: A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy of the University College London, 2010. <http://discovery.ucl.ac.uk/20159/1/20159.pdf>
19. Bains I., Yates A.J., Callard R.E. Heterogeneity in thymic emigrants: implications for thymectomy and immunosenescence // PLoS One. 2013. V. 8. № 2. P. e49554. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0049554>
20. Hironsoft. Epicure: Fast, interactive software for the analysis of medical, public health, epidemiologic, econometric, and reliability data V. 2.10. Seattle, WA: Hironsoft International Corporation, 1998.
21. Tolstykh E.I., Degteva M.O., Vozilova A.V. et al. Interpretation of FISH results in the case of nonuniform internal radiation exposure of human body with the use of model approach // Russian J. Genet. 2019. V. 55. № 10. P. 1227–1233. <https://doi.org/10.1134/S1022795419100132>
22. Napier B.A., Degteva M.O., Shagina N.B., Anspaugh L.R. Uncertainty analysis for the Techa River Dosimetry System // Med. Radiol. Radiat. Saf. 2013. V. 58. P. 5–28 (in Engl. and Russ.)
23. Yates A., Chan C.C., Callard R.E. et al. An approach to modelling in immunology // Brief Bioinform. 2001. V. 2. № 3. P. 245–257. <https://doi.org/10.1093/bib/2.3.245>
24. Ye P., Kirschner D.E. Measuring emigration of human thymocytes by T-cell receptor excision circles // Crit. Rev. Immunol. 2002. V. 22. № 5–6. P. 483–497. PMID: 12803323
25. Hazenberg M.D., Otto S.A., van Rossum A.M. et al. Establishment of the CD4+ T-cell pool in healthy children and untreated children infected with HIV-1 // Blood. 2004. V. 104. № 12. P. 3513–3519. <https://doi.org/10.1182/blood-2004-03-0805>
26. De Boer R.J., Perelson A.S. Quantifying T lymphocyte turnover // J. Theor. Biol. 2013. V. 327. P. 45–87. <https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2012.12.025>
27. Gomolka M., Oestreicher U., Rößler U. et al. Age-dependent differences in DNA damage after in vitro CT exposure // Int. J. Radiat. Biol. 2018. V. 94. № 3. P. 272–281. <https://doi.org/10.1080/09553002.2018.1419302>
28. Ariyoshi K., Miura T., Kasai K. et al. Age Dependence of Radiation-Induced Genomic Instability in Mouse Hematopoietic Stem Cells // Radiat. Res. 2018. V. 190. № 6. P. 623–633. <https://doi.org/10.1667/RR15113.1>
29. Kovalchuk I.P., Golubov A., Koturbash I.V. et al. Age-dependent changes in DNA repair in radiation-exposed mice // Radiat. Res. 2014. V. 182. № 6. P. 683–694. <https://doi.org/10.1667/RR13697.1>
30. Vandevoorde C., Vral A., Vandekerckhove B. et al. Radiation Sensitivity of Human CD34(+) Cells Versus Peripheral Blood T Lymphocytes of Newborns and Adults: DNA Repair and Mutagenic Effects // Radiat. Res. 2016. V. 185. № 6. P. 580–90. <https://doi.org/10.1667/RR14109.1>

Dependence of the Translocation Frequency in Blood Lymphocytes on the Dose and Age at the Onset of Exposure in Residents of the Techa Riverside Settlements

E. I. Tolstykh^{a, #}, A. V. Vozilova^a, **M. O. Degteva^a**, and A. V. Akleev^{a, b}

^a Ural Scientific and Practical Center of Radiation Medicine of the Federal Medical and Biological Agency of the Russian Federation, Chelyabinsk, Russia

^b Chelyabinsk State University, Chelyabinsk, Russia

[#]E-mail: evgenia.tolstykh@yandex.ru

Evaluation of age effect on the frequency of radiation-induced translocations, registered using FISH in circulating T-lymphocytes in the long-term period after exposure, is both of theoretical and practical interest for the purposes of biodosimetry. The objective of our study was to analyze the dose dependence of the translocation frequency in the peripheral blood T-lymphocytes in donors of different age who were exposed in the Techa Riverside settlements ($n = 197$). In cytogenetic studies, whole chromosome painting probes were used to stain three pairs of chromosomes. A total of 104,721 genome equivalents (GE) were calculated and 2,540 translocations were found. For each donor, the individual absorbed doses in organs and tissues at the time of blood sampling were calculated using the Techa River Dosimetry System. In addition, doses to T-lymphocytes and their progenitors were calculated using the innovative modelling approach with due account of age related-dynamics of T-lymphocytes. The age dependence of the translocation frequency was associated particularly with these doses. The main sources of donor exposure were $^{89,90}\text{Sr}$, accumulating in bones and irradiating the bone marrow almost locally. To assess the parameters of the dose-effect relationship, linear regression model was used. After taking into account background values, the lowest frequency of translocations per 1000 GE per Gy was found in donors aged 0–5 years at the time of exposure (9.3 ± 1.3), which is statistically significantly lower than in children aged 6–18 years (15.3 ± 1.5), but not in adults (11.9 ± 2.9). The value for adults (>18 years) was characterized by the maximum scatter, but was close to the values obtained in an international study of nuclear enterprise personnel after external exposure (11.6 ± 1.6). The values of the background translocation frequencies registered in various age groups correspond to the published data obtained in a joint international study on unexposed donors. We have also confirmed the absence of sex-effect on the frequency of translocations.

Keywords: circulating T-lymphocytes, chromosomal aberrations, translocations, human age, biodosimetry

УДК 575.224.23:612.419:599.323.4:614.876:539.1.047

ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В КОСТНОМ МОЗГЕ ЖИВОТНЫХ, ОБИТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННОГО ЕСТЕСТВЕННОГО РАДИАЦИОННОГО ФОНА

© 2023 г. Л. А. Башлыкова^{1,*}, О. В. Раскоша¹

¹ Институт биологии ФИЦ Коми Научного центра Уральского отделения Российской академии наук, Сыктывкар, Россия

*e-mail: labashlykova@ib.komisc.ru

Поступила в редакцию 27.01.2022 г.

После доработки 27.09.2022 г.

Принята к публикации 09.11.2022 г.

Изучены цитогенетические эффекты в клетках костного мозга полевков-экономов (*Alexandromys (Microtus) oeconomus* Pall.), обитавших на территориях, загрязненных ураном и радием, вследствие функционирования радиевого промысла (радиевый участок) и складирования его отходов (урано-радиевый участок) в пос. Водный (Республика Коми). Уровень и характер мутационных эффектов у полевков с радиоактивно загрязненных участков свидетельствуют о сохранении повышенной частоты aberrаций хромосом и появлении особей с измененным кариотипом, что указывает на генетическую нестабильность. При определении характера динамики мутационного процесса в изучаемых популяциях отмечена высокая частота клеток с микроядрами у полевков радиевого участка, за исключением фазы низкой численности. В экспериментах с применением провокационных факторов химической (уретан) и радиационной (острое γ -облучение) природы показано повышение устойчивости клеток костного мозга животных, отловленных на радиоактивно загрязненной территории.

Ключевые слова: повышенный фон естественной радиоактивности, полевка-экономка, костный мозг, нестабильность генома, устойчивость к дополнительным факторам

DOI: 10.31857/S0869803123010034, **EDN:** UBSEZO

В условиях повсеместного антропогенного воздействия особое значение приобретают исследования природных популяций животных, обитающих на радиоактивно загрязненных территориях. Выявление эффектов и понимание механизмов, позволяющих живым организмам адаптироваться к длительному воздействию ионизирующего излучения, необходимы для будущих попыток восстановления экосистем после различных радиационных инцидентов. После аварий на Чернобыльской АЭС и “Фукусима-дайти” увеличилось число публикаций, свидетельствующих о том, что экосистемы, начиная с момента непосредственно после аварий до наших дней, динамично меняются [1–3]. Наши исследования проводятся на территории, загрязненной тяжелыми естественными радионуклидами более длительное время – с 30-х годов 20-го века (Северный радиоэкологический стационар в Республике Коми). Это позволило проследить динамику мутационного процесса в популяции референтного вида полевков в течение более 50 лет, используя цитогенетические методы исследования клеток костного мозга. Эти методы, являющиеся осно-

вополагающими в радиоэкологическом мониторинге, способствуют получению информации о наиболее значимых последствиях воздействия повышенного радиационного фона на биологические объекты и направленности протекающих в этих условиях микроэволюционных преобразований. Хроническое действие ионизирующего излучения на популяции живых организмов может приводить к изменению эффективности ответа на повреждения ДНК, возникающие при воздействии внешних стрессовых факторов разной природы [4].

Цель исследования состояла в оценке уровня цитогенетических нарушений и ответной реакции на провокационное действие факторов физической и химической природы клеток костного мозга у животных из природных популяций, подверженных хроническому воздействию ионизирующего излучения в малых дозах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Объектом исследований были полевки-экономки (*Alexandromys (Microtus) oeconomus* Pall.),

длительное время обитающие в условиях повышенного фона естественной радиоактивности. Отлов животных в разные годы исследований проводили на одних и тех же участках, различающихся между собой генезисом источников поступления в окружающую среду повышенных концентраций естественных радиоактивных элементов. Радиевый участок возник в результате добычи и переработки в течение 25 лет солей радия из пластовых вод, что обусловило повышенный уровень естественной радиоактивности. Мощность γ -излучения на этом участке была выше фоновых значений — 0.5–12.5 мкГр/ч. Причиной увеличения радиоактивности почв были бессульфатные хлоридно-натрий-кальциевые рассолы с повышенными концентрациями радия и фоновым содержанием ^{238}U [5]. Урано-радиевый участок образовался на месте отвалов урано-радиевого производства, которое существовало с 1946 по 1956 г. На данном участке содержание радия в почве превышало контрольные значения в 461–682 раза, а урана в 4–28 раз, мощность γ -излучения колебалась в пределах от 2 до 60 мкГр/ч [6]. В конце 1960 — начале 1970-х годов средние значения мощности поглощенной дозы для организма взрослого животного изменялись в диапазоне 28–83 мГр/год (3.19–9.47 мкГр/ч) [7], что в 7 и более раз превосходит значения мощностей доз облучения (0.01–0.44 мкГр/ч) наземных животных, обитающих в условиях нормального радиационного фона [8]. Основной вклад в облучение вносят рассеянные в окружающей среде радионуклиды уранового и ториевого рядов, являющиеся одновременно α -, β - и γ -излучателями [6].

После отлова полевок-экономок доставляли в виварий Института биологии Коми НЦ УрО РАН (<http://www.ckr-rf.ru/usu/471933/>), где животных содержали в поликарбонатных клетках (размер 35 × 22 × 90 см, Tecniplast, Италия) при естественном освещении, температуре ≈ 20 – 22°C и влажности воздуха $50 \pm 5\%$ со свободным доступом к воде и пище. При работе руководствовались этическими правилами, принятыми Европейской конвенцией по защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях (Страсбург, 18 марта 1986 г., подтверждена в 15.06.2006 г.) и требованиями международных принципов Хельсинкской декларации о гуманном отношении к животным при эстирпации органов [9].

При анализе метафазных клеток костного мозга оценивали частоту хромосомных aberrаций (дицентрические, кольцевые хромосомы, парные фрагменты), хроматидных aberrаций, анеуплоидных и полиплоидных клеток. Для накопления метафаз проводили внутрибрюшинную инъекцию колхицина в дозе 4 мг/г веса тела полевок или инкубировали в течение 1 ч суспензию клеток костного мозга в 10 мл изотонического рас-

твора при 37°C с добавлением 0.2 мл 0.004%-ного раствора колхицина. Клетки центрифугировали, подвергали гипотонии раствором KCl (0.56%) и фиксировали смесью ледяной уксусной кислоты и метанола (1: 3). Суспензию клеток наносили на охлажденные стекла, фиксатор выжигали. Полученные препараты окрашивали 4%-ным раствором Романовского—Гимза и анализировали по 100 метафаз на животное [10]. Микроядерный тест является экспресс-методом для оценки генотоксического эффекта факторов химической, физической и биологической природы в условиях как лабораторных экспериментов, так и в природной среде [11–13]. Суспензию клеток костного мозга после гипотонии фиксировали смесью ледяной уксусной кислоты и метанола с последующей окраской генетического материала акридиновым оранжевым (“Sigma”; 2 мкг/мл в фосфатно-солевом буфере). Число клеток с микроядрами (1000 клеток на животное) подсчитывали с помощью флуоресцентного микроскопа Axioscop-A1 (Carl Zeiss, Jena, Германия), также анализировали делящиеся клетки (митотический индекс) и долю клеток, элиминирующих по пути апоптоза [14]. Двунитевые разрывы (ДР) ДНК определяли методом ДНК-комет в нейтральной версии pH [15, 16], который отражает число ДР ДНК различной природы, как ферментативных, так и индуцированных повреждающими агентами, в том числе и свободными радикалами [17]. Изображения ДНК-комет получали с использованием камеры CCD AxioCam ICm 1 и программного пакета “AxioVision SE64, Release 4.8.2” (Carl Zeiss, Германия) с разрешением 1338×1038 пикселей, длина волны возбуждающего света — 450–490 нм, запирающий фильтр 510 нм. На каждом слайде было проанализировано по 100 ДНК-комет с использованием программы “CometScore 1.5” (TriTek Corp., США). Для оценки повреждения ДНК клеток костного мозга использовали интегральный показатель “Olive tail moment” (OTM) [16].

Для выявления резервных возможностей органа в качестве провокационных нагрузок использовали острое γ -облучение и уретан (этилкарбамат; Sigma-Aldrich, США), который подавляет синтез пиримидинов [18] и относится к канцерогенам-промоторам [19, 20]. Полевкам-экономкам, отловленным на контрольном и радиевом участках, внутрибрюшинно вводили 10%-ный раствор уретана из расчета 1 мг/г массы тела, а интактным животным этих же групп — эквивалентное количество физиологического раствора. Через 48 ч после воздействий животных выводили из эксперимента путем декапитации. Для оценки провокационного действия радиационного фактора полевок-экономок, привезенных с контрольного и радиевого участков, облучали в дозе 4 Гр на γ -установке “Исследователь” (Россия) с источником ^{137}Cs при мощности дозы 0.75 Гр/мин.

Таблица 1. Цитогенетический анализ клеток костного мозга полевков-экономок, обитающих в условиях повышенного радиационного фона**Table 1.** Cytogenetic analysis of bone marrow cells of root voles living in conditions of increased background radiation

Показатели	Участки обитания животных		
	контрольный	радиевый	урано-радиевый
Число особей	12	7	14
Исследовано всего метафаз	1750	560	1296
Структурные aberrации, %	0.7	2.5**	2.0**
В том числе:			
хроматидные aberrации, %	0.2	0.7*	0.63**
хромосомные aberrации, %	0.5	1.8*	1.5*
из них: обмены, %	0	0.18	0.42
Геномные aberrации:			
анеуплоиды ($2n + 1$), %	0.06	0.53*	0.42*
полиплоиды ($4n$), %	1.9	2.5	1.4

* Различия достоверны по сравнению с контрольным участком * – $p < 0.05$ и ** – $p < 0.001$.

Радиационно-индуцированные эффекты у полевков анализировали через 4 ч одновременно с необлученными особями, отловленными на этих же участках.

Полученные результаты обрабатывали с помощью пакетов прикладных программ Statistica 6 (StatSoft, Inc., США). При сравнении различий между опытными и контрольными группами использовали t -критерий Стьюдента и U -критерия Манна–Уитни.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты наших первых исследований, проведенных в 1983 г., показали высокую радиочувствительность клеток костного мозга полевков-экономок, обитающих на радиоактивных участках; доля клеток с хромосомными aberrациями на радиевом участке составила 2.5%, на урано-радиевом – 2.0%, а на контрольном участке – 0.7% (табл. 1). Доля структурных перестроек хромосом у полевков, обитавших на радиоактивных участках, статистически значимо отличалась от контроля ($p < 0.01$). Более 70% регистрируемых aberrаций относились к хромосомным, среди которых обнаружены отсутствующие в контроле дицентрики и кольца, являющиеся надежными маркерами радиационного воздействия. Уровень хроматидных aberrаций у животных, обитающих в условиях повышенного радиационного фона, также значительно превысил контрольные значения ($p < 0.05$). В клетках костного мозга особей радиевого участка выявлены транслокации между 13-й и 14-й хромосомами $t(13; 14)$. Для обменов, которые образовались в результате воссоединения фрагментов хромосом, несущих центральный район, существует вероятность длительного сохранения этих нарушений в популяции стволовых клеток, а сбалансированные реципрокные транслокации

($t(13; 14)$) могут оставаться при последующих мейотических делениях клеток и передаваться по наследству. Сходные изменения наблюдали в популяции полевки урано-радиевого участка, но в данных условиях облучения в клетках костного мозга животных обменные aberrации хромосомного типа были более многочисленны – 0.42%.

Помимо высокого уровня структурных перестроек хромосом в клетках костного мозга, у полевков с радиоактивно загрязненных участков обнаружено значимое превышение по сравнению с контролем частоты гипердиплоидных клеток ($2n = 31$ вместо $2n = 30$) [21]. Причем у полевков с радиоактивных участков изменение числа хромосом в кариотипе было связано с трисомией 1-, 2, 5- и 10-й пар хромосом, а в контроле – с трисомией 13-й пары хромосом. В клетках костного мозга у животных с урано-радиевого участка в дополнение к описанному механизму возникновения анеуплоидии выявлены отсутствие одной из хромосом пары $m11$ и наличие двух новых акроцентрических хромосом (рис. 1). Такой тип транслокаций относят к Робертсоновским перестройкам [22]. При этой мутации не изменяется количество плеч хромосом ($N_{Fa} = 54$), хромосомная перестройка обусловлена разделением метацентрической ($m11$) хромосомы на два акроцентрика и количество хромосом увеличивается ($2n = 31$).

Поскольку повышенный радиационный фон может выступать в роли фактора, увеличивающего изменчивость генотипа популяций и, следовательно, скорость эволюционных преобразований [23], на следующем этапе наших исследований предстояло выяснить характер динамики мутационного процесса в изучаемых популяциях и оценить резервные возможности полевков-экономок, длительное время обитающих в условиях хронического воздействия повышенного фона есте-

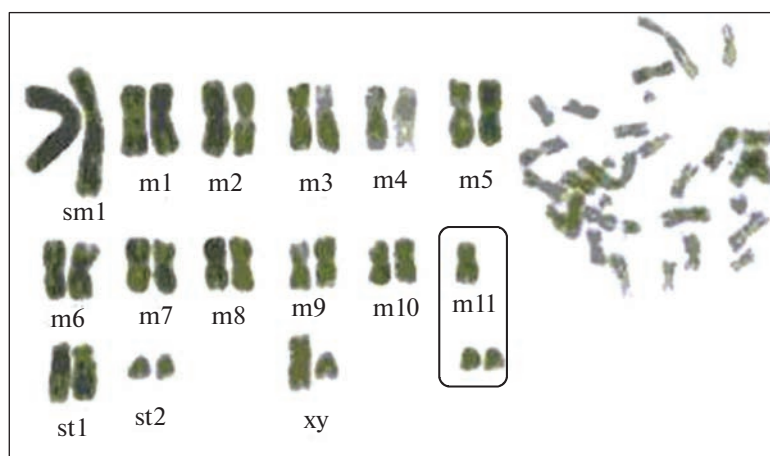


Рис. 1. Кариотип полевок-экономки урано-радиевого участка с робертсоновской перестройкой хромосомы m11 ($2n = 31$).

Fig. 1. Karyotype of root voles of uranium-radium region with Robertsonian rearrangement of chromosome m11 ($2n = 31$).

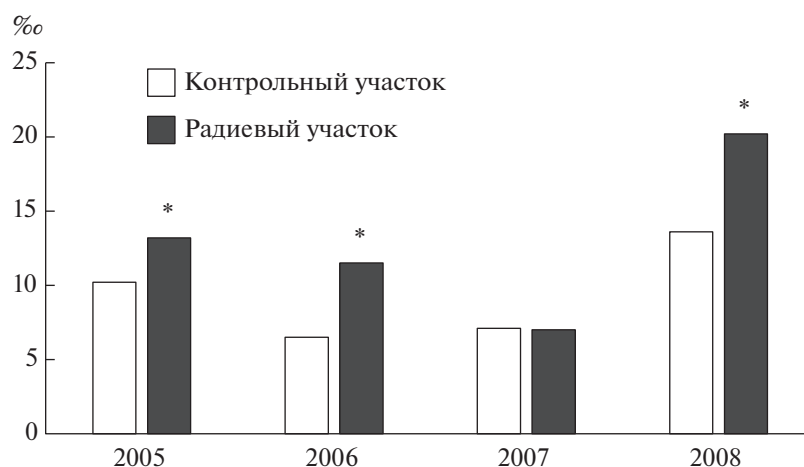


Рис. 2. Доля клеток костного мозга с микроядрами у полевок-экономок контрольного и радиевого участков.

* Различия достоверны ($p < 0.05$) по сравнению с животными контрольного участка.

Fig. 2. Proportion of bone marrow cells with micronuclei in root voles of the control and radium plots.

* Differences are significant ($p < 0.05$) compared with the animals of the control plot.

ственной радиоактивности. Для определения характера динамики мутационного процесса применяли микроядерный тест. Исследование животных в течение 4 лет (8 поколений) показало, что изменение частоты клеток с микроядрами в костном мозге животных в популяции с контрольного участка сходно с результатами, полученными у животных, обитающих в условиях повышенного радиационного фона (рис. 2). В обоих случаях постепенное снижение к 2007 г. уровня мутагенеза сменяется последующим значимым его всплеском в 2008 г. ($p < 0.01$ — для контрольного участка, $p < 0.001$ — для радиевого участка). Однако на фоне однотипной динамики сохраняется достоверно высокая частота клеток костного моз-

га с микроядрами у полевок из загрязненной радиоактивными пласовыми водами территории, за исключением наблюдаемой в 2007 г., когда популяции полевок находились на стадии низкой численности [24].

Для выявления изменений генетической структуры популяции, способствующих повышению ее приспособленности к неблагоприятным условиям существования, были проведены эксперименты по оценке устойчивости полевок-экономок из природных популяций к факторам радиационной (γ -облучение) и нерадиационной (уретан) природы. У животных, отловленных на радиевом участке (отлов 2009 г.), обнаружен статистически значимо более высокий уровень кле-

Таблица 2. Цитогенетический анализ клеток костного мозга полевок-экономок, обитавших в различных радио-экологических условиях, и их модификация после уретановой интоксикации (%)**Table 2.** Cytogenetic analysis of bone marrow cells of root voles living in various radioecological conditions and their modification after urethane intoxication (%)

Группы животных	Число животных	Доля клеток с микроядрами	Митотический индекс	Доля клеток в апоптозе
Контроль	8	11.96 ± 1.18	12.3 ± 1.19	9.6 ± 1.05
Контроль+Уретан	10	21.0 ± 0.44^a	5.9 ± 0.75^a	4.8 ± 0.68^a
Радиевый	8	20.5 ± 1.56^a	8.7 ± 1.02^a	15.0 ± 1.34^a
Радиевый+Уретан	6	17.3 ± 1.68^b	5.0 ± 0.91^b	6.3 ± 1.02^b

* Здесь в табл. 3 различия достоверны ($p < 0.05$) по сравнению с ^a – группой “Контроль”; ^b – с группой “Радиевый”.**Таблица 3.** Цитогенетические эффекты в клетках костного мозга полевок-экономок, обитавших в разных радио-экологических условиях и после острого γ -облучения в дозе 4 Гр (%)**Table 3.** Cytogenetic effects in bone marrow cells of root voles living in different radioecological conditions and after acute γ -irradiation 4 Gy (%)

Группы животных	Число животных	Доля клеток с микроядрами	Митотический индекс	Доля клеток в апоптозе
Контроль	16	13.6 ± 1.70	5.3 ± 1.05	6.8 ± 1.76
Контроль+4 Гр	17	62.1 ± 5.56^a	2.9 ± 0.78^a	13.0 ± 1.07^a
Радиевый	10	20.2 ± 3.36^a	8.6 ± 1.42^a	6.0 ± 2.13
Радиевый+4 Гр	8	49.3 ± 3.88^b	4.5 ± 1.24^b	12.9 ± 1.27^b

ток с микроядрами и клеток в апоптозе, а также более низкий митотический индекс по сравнению с данными, полученными у полевок с контрольного участка (табл. 2). Воздействие уретана способствовало угнетению апоптоза в клетках костного мозга у полевок с обоих участков, при этом, в отличие от контрольной группы, у животных радиового участка ослабление апоптоза было менее выражено. Частота встречаемости клеток с микроядрами у полевок радиового участка снижалась по сравнению с интактными животными с этой же территории, тогда как у контрольных полевок уретан вызывал повышение в 2 раза числа микронуклеированных клеток. Подтверждением происходящей в популяции полевок радиового участка, перестройки генетической структуры, направленной на повышение резистентности особей к воздействию неблагоприятных факторов, были результаты экспериментов по провокационному действию ионизирующего излучения. Облучение животных (отлов 2013 г.) в дозе 4 Гр вызвало однотипную реакцию клеток костного мозга полевок контрольного и радиового участков, выраженную в повышении частоты встречаемости клеток с микроядрами, апоптозных клеток и ДР ДНК, а также в резком снижении митотического индекса (табл. 3, рис. 3). В то же время костный мозг у полевок-экономок, обитающих в условиях повышенного уровня естественной радиоактивности, был устойчивее к дополнитель-

ному острому γ -облучению: у контрольных животных частота клеток с микроядрами увеличилась в 4.6 раза, тогда как у полевок с радиового участка только в 2.4 раза (табл. 3).

ОБСУЖДЕНИЕ

Многолетний мониторинг популяции мелких млекопитающих, обитающих на территории с повышенным уровнем естественной радиоактивности, показал, что малые дозы ионизирующего излучения обладают мутагенной эффективностью, о чем свидетельствует высокий уровень хромосомных aberrаций и микроядер в пуле клеток костного мозга полевок-экономок с радиоактивно загрязненных участков по сравнению с животными контрольного участка. Генетический анализ популяций полевок, обитающих в условиях повышенного уровня естественной радиоактивности, выявил снижение со временем темпа мутационного процесса. При этом следует подчеркнуть, что мощность экспозиционной дозы за рассматриваемый период (1983–2013 гг.) существенно не изменялась, оставаясь в среднем на уровне 4 мкГр/ч. Исследования, проведенные ранее Х.А. Салеевым в 1972 г., показали превышение хромосомных aberrаций в костном мозге облученных животных над контрольным уровнем в 7–12 раз [25]. Через 11 лет (1983 г.) по нашим результатам частота различных типов цитогенети-

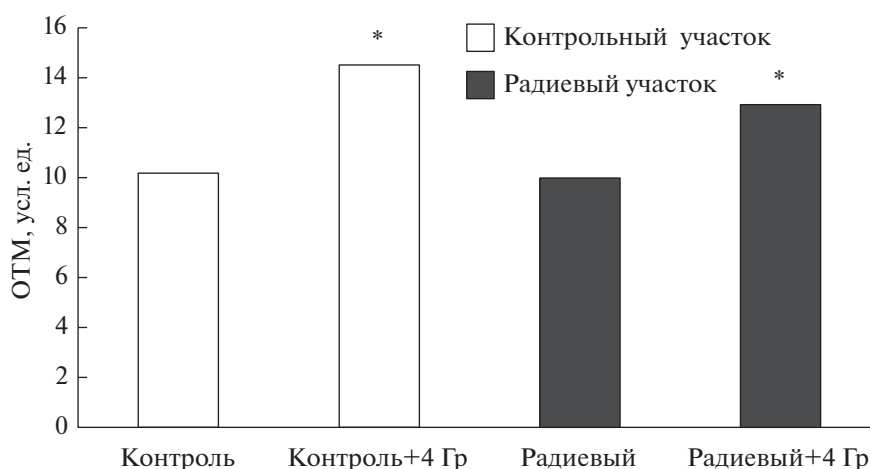


Рис. 3. Двунитевые разрывы ДНК в клетках костного мозга полевков-экономок, обитавших на контрольном и радиевом участках и после острого γ -облучения в дозе 4 Гр.

* Различия достоверны ($p < 0.05$) по сравнению с интактными животными (до острого облучения).

Fig. 3. DNA double-strand breaks in the bone marrow cells of root voles living in the control and radium plots and after acute γ -irradiation at a dose of 4 Gy.

* Differences are significant ($p < 0.05$) compared with intact animals (before acute irradiation).

ческих повреждений в клетках костного мозга полевков, обитавших в условиях повышенного радиационного фона, превышала спонтанный уровень уже только в 3–4 раза. Схожие результаты были получены и на других видах. У голубых бабочек (*Zizeeria maha*), отловленных после аварии на АЭС в Фукусиме, обнаружены адаптационные перестройки [1]. У крупного рогатого скота, пострадавшего от этой аварии к 2013 г., уменьшилась доля повреждений ДНК [26]. В работе [2] отмечено, что частота сцепленных с полом рецессивных летальных мутаций у *Drosophila melanogaster* из 30-километровой зоны ЧАЭС была снижена в последующих поколениях по сравнению с данными, наблюдаемыми у более ранних поколений.

На урано-радиевом участке, который содержит не только радиоактивные, но и химически токсичные элементы, в десятки и сотни раз превышающие фоновые значения, нами обнаружены животные с измененным кариотипом ($2n = 31$), возникшим в результате робертсоновской перестройки хромосомы m11, что свидетельствует о нестабильности их генома. Подобные мутации найдены у изолятов полевки-экономки в горных районах Скандинавии на границе ареала, где вид характеризуется генетической нестабильностью [27]. Наследуемые изменения генома также обнаружены у мышевидных грызунов из природных популяций, обитающих на территориях, загрязненных радионуклидами техногенного происхождения. Так, при цитогенетическом исследовании животных из района Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) выявлены кариотипические мутанты обыкновенной полевки (*Microtus arvalis* Pall.) с хромосомной конституцией 45,X0 [28]. В зоне влияния Тощкого радиоактивного полигона в популяции восточноевропейской полевки (*Microtus rossiaemeridionalis* Ognev) присутствовали особи с мутантным кариотипом 53,X0 [29] и самки этого вида с мужским набором хромосом XY [30]. Подобных изменений в кариотипе животных, обитающих в природных условиях, не подвергнутых радиоактивному воздействию, авторы цитируемых работ не отмечали, что позволило предполагать радиационную природу регистрируемых мутаций. В наших исследованиях выявленные у животных, обитавших на участках, различающихся между собой генезисом источников поступления в окружающую среду повышенных концентраций естественных радиоактивных элементов (радиевый и урано-радиевый участки), абберации преимущественно хромосомного типа, повышенное содержание анеуплоидных клеток, мутации кариотипа, а также тот факт, что в течение этого же времени у полевков-экономок контрольного участка уровень мутагенеза оставался прежним, свидетельствуют о радиационной природе наблюдаемых изменений.

Малые и сопредельные с ними дозы ионизирующей радиации в большинстве случаев ускоряют или специфически направляют микроэволюционные процессы, изменяя генетическую структуру популяций, находящихся в непосредственном контакте с мутагенами [31, 32]. Дестабилизация генома, индуцированная облучением, может заметно изменить скорость микроэволюционных событий и привести как к радиоадаптации, так и к элиминации наиболее радиочувствительных популяций или видов [33]. Было показано, что у

грызунов рода *Ellobius*, обитающих в основании ВУРСа, в результате отбора радиорезистентных форм и действия случайных факторов произошла адаптивная перестройка и, как следствие, повышение радиорезистентности. Успешной радиоадаптации способствовали эколого-физиологические характеристики слепушонок: подземно-колониальный образ жизни, низкая вагильность, изоляция, обусловленная обитанием на крайней северной границе ареала, которая повышает вероятность распространения вновь возникающих мутаций путем генетического дрейфа [34, 35].

Подтверждением происходящей в популяции полевок, обитающих в условиях повышенного фона естественной радиоактивности, перестройки генетической структуры, направленной на повышение резистентности особей к воздействию неблагоприятных факторов, явились результаты экспериментов по провокационному действию факторов. В проведенном нами ранее исследовании щитовидной железы у полевок-экономок, испытывающих хроническое воздействие облучения в малых дозах в природной среде на изучаемых участках, также обнаружено повышение ее устойчивости к действию факторов радиационной и нерадиационной природы [36, 37]. Это свидетельствует в пользу того, что при длительном обитании популяции полевок-экономок в условиях повышенного радиационного фона происходит перестройка работы системы защиты клеток. Напряженная работа системы защиты генома клеток костного мозга у облученных животных направлена на усиление репарации ДНК, о чем косвенно свидетельствует замедление митотического цикла, и на элиминацию клеток с невосстановленными повреждениями. Тем не менее усиление защиты генома не приводило к снижению частоты клеток с микроядрами до уровня, характерного для животных контрольного участка. Ответная реакция на неблагоприятные факторы среды часто носит неспецифический характер и может проявляться через повышенную устойчивость популяций к острым воздействиям другой природы [38]. Повышенная устойчивость к действию дополнительных факторов у животных, испытывающих длительное воздействие ионизирующего излучения в среде обитания, описывается в ряде работ [39–42]. Повреждающие факторы при воздействии в малых дозах могут индуцировать адаптивный ответ [43], который в отношении уровня повреждения ДНК предположительно обусловлен увеличением эффективности репарации ДНК и элиминации клеток с невосстановимыми повреждениями ДНК. Тяжелые естественные радионуклиды в условиях их постоянно высокого содержания в среде обитания оказывают мутагенное воздействие на животных и запускают цепь микроэволюционных преобразований в популяциях для последующего отбора наиболее приспособ-

ленных особей. В свою очередь такой отбор, являющийся одним из основных инструментов микроэволюции, привел к изменению неспецифической резистентности организма в направлении развития устойчивости полевок из природных популяций, обитающих в условиях хронического воздействия радионуклидов уранового и ториевого рядов.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что повышенный фон естественной радиоактивности выступает в роли фактора, изменяющего генетическую структуру популяций животных и приводящего к превышению среднепопуляционных частот структурных перестроек хромосом над уровнем, наблюдаемым у особей с фоновых территорий, и изменениям кариотипа в результате разделения хромосомы по центромере, что является проявлением нестабильности генома. При длительном обитании животных (более 100 поколений) на радиоактивно загрязненной территории было отмечено постепенное снижение частоты повреждений ДНК в клетках костного мозга, при том, что уровень радиоактивного загрязнения существенно не изменился. В то же время в условиях повышенного фона естественной радиоактивности действует стабилизирующий отбор, направленный на элиминацию генетического груза, а также изменение защиты генома, что способствует формированию повышенной резистентности костного мозга в ответ на действие провокационных факторов разной природы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования выполнены в рамках госзадания по теме “Действие ионизирующего излучения и факторов нерадиационной природы на биологические объекты и биогенная миграция тяжелых естественных радионуклидов” ИБ ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (№ 122040600024-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taira W., Hiyama A., Nohara C. et al.* Ingestional and transgenerational effects of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly // *J. Radiat. Res.* 2015. V. 56. № 1. P. i2–i18. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrv068>
2. *Hancock S., Vo N.T.K., Byun S.H. et al.* Effects of historic radiation dose on the frequency of sex-linked recessive lethals in *Drosophila* populations following the Chernobyl nuclear accident // *Environ. Res.* 2019. V. 172. P. 333–337. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.02.014>
3. *Cannon G., Kiang J.G.* A review of the impact on the ecosystem after ionizing irradiation: wildlife population // *Int. J. Radiat. Biol.* 2020. P. 1–9. <https://doi.org/10.1080/09553002.2020.1793021>
4. *Мазурик В.К., Михайлов В.Ф.* Радиационно-индуцированная нестабильность генома: феномен, мо-

- лекулярные механизмы, патогенное значение // Радиационная биология. Радиоэкология. 2001. Т. 41. № 3. С. 272–289. [Mazurik V.K., Mikhajlov V.F. Radiation-induced genome instability: the phenomenon, molecular mechanisms, pathogenetical significance // Radiats. biology. Radioecology. 2001. V. 41. № 3. P. 272–289. (In Russ.)]
5. Кичигин А.И., Таскаев А.И. “Водный промысел”: история производства радия в Республике Коми (1931–1956 гг.) // Вopr. истории естествознания и техники. 2004. № 4. С. 3–30. [Kichigin A.I., Taskaev A.I. “Vodnyu promysel”: istoriya proizvodstva radiya v Respublike Komi (1931–1956 gg.) // Voprosy istorii estestvoznaniya i tekhniki. 2004. V. 4. P. 3–30. (In Russ.)]
 6. Евсеева Т.И., Бельх Е.А., Майстренко Т.А. и др. Латеральное распределение радионуклидов уранового и ториевого рядов в антропогенно-измененных почвах на территории складирования отходов радиевого производства // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т. 52. № 1. С. 103–112. [Evseeva T.I., Belykh E.A., Maystrenko T.A. et al. Regularities of Lateral Distribution of Uranium and Thorium Decay Series Radionuclides in the Anthropogenically Changed Soils from the Area of Radium Production Waste Storage // Radiats. biology. Radioecology. 2012. V. 52. № 1. P. 103–112. (In Russ.)]
 7. Алексахин Р.М., Архипов Н.П., Бархударов Р.М. и др. Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере: Миграция и биологическое действие на популяции и биоценозы / Под ред. Р.М. Алексахина. М.: Наука, 1990. 368 с. [Alexakhin R.M., Arkhipov N.P., Barkhudarov R.M. et al. Heavy Natural Radionuclides in Biosphere: Migration and Biological Effects on Population and Biogeocenoses / Pod red. P.M. Aleksahina M.: Nauka, 1990. 368 p. (In Russ.)]
 8. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with scientific Annexes. Sources and effects of ionizing radiation. Annex E. Effects of ionizing radiation on non-human biota. V. 2. New York: United Nations, 2008. P. 221–313.
 9. European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and other Scientific Purposes. Available from: <http://www.worldlii.org/int/other/treaties/COETSER/1986/1.htm>. Accessed January 20, 2022.
 10. Орлов В.Н., Чудиновская Г.А., Крюкова Е.П. Исследование хромосомных наборов млекопитающих. М.: Наука, 1976. 36 с. [Orlov V.N., Chudinovskaya G.A., Kryukova E.P. Issledovanie khromosomnykh naborov mlekopitayushchikh. M.: Nauka, 1976. 36 p. (In Russ.)]
 11. Hedl J.A. A rapid in vivo test for chromosomal damage // Mutat. Res. 1973. V. 18. № 2. P. 187–190. [https://doi.org/10.1016/0027-5107\(73\)90035-3](https://doi.org/10.1016/0027-5107(73)90035-3)
 12. Жулева Л.Ю., Дубинин Н.П. Использование микроядерного теста для оценки экологической обстановки в районах Астраханской области // Генетика. 1994. Т. 30. № 7. С. 999–1004. [Zhuleva L.Yu., Dubinin N.P. Ispolzovanie mikroyadernogo testa dlya otsenki ekologicheskoy obstanovki v rayonakh Astrakhanskoj oblasti // Genetika. 1994. V. 30. № 7. P. 999–1004. (In Russ.)]
 13. Руководство по краткосрочным тестам для выявления мутагенных и канцерогенных химических веществ. Гигиенические критерии состояния окружающей среды. Женева: ВОЗ, 1989. № 51. 212 с. [Rukovodstvo po kratkosrochnym testam dlya vyyavleniya mutagennykh i kantserogennykh khimicheskikh veshchestv. Gigienicheskie kriterii sostoyaniya okruzhayushchey sredy. Zheneva: VOZ, 1989. № 51. P. 212. (In Russ.)]
 14. Тронов В.А., Никольская Т.А., Конопляников М.А. и др. Спонтанная гибель мононуклеарных клеток, полученных от здоровых доноров и больных системной красной волчанкой // Цитология. 1999. Т. 41. № 5. С. 400–404. [Tronov V.A., Nikolskaya T.A., Konoplyanikov M.A. et al. Spontannaya gibel mononuklearnnykh kletok, poluchennykh ot zdorovykh donorov i bolnykh sistemnoy krasnoy volchankoy // Tsitologiya. 1999. V. 41. № 5. P. 400–404. (In Russ.)]
 15. Singh N.P., McCoy M.T., Nice R.R. et al. A simple technique for quantitation of low levels of DNA damage in individual cells // Exp. Cell Res. 1988. V. 175. № 1. P. 184–191. [https://doi.org/10.1016/0014-4827\(88\)90265-0](https://doi.org/10.1016/0014-4827(88)90265-0)
 16. Olive P.L., Banath J.P. Induction and rejoining of radiation induced DNA single-strand breaks: “tail moment” as a function of position in the cell cycle // Mutat. Res. (DNA Repair). 1993. V. 294. P. 275–283. [https://doi.org/10.1016/0921-8777\(93\)90010-e](https://doi.org/10.1016/0921-8777(93)90010-e)
 17. Воробьева Н.Ю., Осипов А.Н., Пелевина И.И. Чувствительность лимфоцитов периферической крови летчиков и космонавтов к воздействию γ-излучения: индукция двунитевых разрывов ДНК // Бюл. эксперим. биол. и мед. 2007. Т. 144. № 10. С. 404–407. [Vorobyeva N.Yu., Osipov A.N., Pelevina I.I. Chuvstvitel'nost limfotsitov perifericheskoy krovi letchikov i kosmonavtov k vozdeystviyu γ-izlucheniya: induktsiya dvunitevykh razryvov DNK // Bulletin of Experm. Biol. and Med. 2007. V. 144. № 10. P. 404–407. (In Russ.)]
 18. Общая генетика / Под ред. Н.И. Шапиро. М.: Наука, 1965. 299 с. [Obshchaya genetika / Pod red. N.I. Shapiro. M.: Nauka, 1965. 299 p. (In Russ.)]
 19. Nomura T. X-ray induced germ-line mutation leading to tumors; its manifestation in mice given urethane postnatally // Mutat. Res. 1983. V. 121. P. 59–65. [https://doi.org/10.1016/0165-7992\(83\)90087-8](https://doi.org/10.1016/0165-7992(83)90087-8)
 20. Vorobtsova I.E., Kitaev E.M. Urethane-induced lung adenomas in the first-generation progeny of irradiated male mice // Carcinogenesis. 1988. V. 9. № 11. P. 1931–1934. <https://doi.org/10.1093/carcin/9.11.1931>
 21. Бородин П.А., Сусликов В.И., Башлыкова Л.А. Цитогенетическое исследование микропопуляций полевки-экономки (*Microtus oeconomus* Pall.), обитающих в различных радиоэкологических условиях // Радиобиология. 1988. Т. 28. № 3. С. 356–361. [Borodkin P.A., Suslikov V.I., Bashlykova L.A. Tsitogeneticheskoe issledovanie mikropopulyatsiy polevki-ekonomki (*Microtus oeconomus* Pall.), obitayushchikh v razlichnykh radioekologicheskikh usloviyakh Radiobiologiya. 1988. V. 28. № 3. P. 356–361. (In Russ.)]
 22. Орлов В.Н., Булатова Н.Ш. Сравнительная цитогенетика и кариосистематика млекопитающих. М.:

- Наука, 1983. 405 с. [Orlov V.N., Bulatova N.Sh. Spavnitelnaya tsitogenetika i kaposistematika mlekopitayushchikh. M.: Nauka, 1983. 405 p. (In Russ.)]
23. Таскаев А.И., Башлыкова Л.А., Зайнуллин В.Г. Эколого-генетический мониторинг мышевидных грызунов из популяций, подвергшихся хроническому облучению // Радиационная биология. Радиоэкология. 2010. Т. 50. № 5. С. 560–571. [Taskaev A.I., Bashlykova L.A., Zaynullin V.G. Ecological and Genetic Monitoring of Muridae from Populations Undergone to the Chronic Irradiation // Radiats. biology. Radioecology. 2010. V. 50. № 5. P. 560–571. (In Russ.)]
 24. Ермакова О.В., Раскоша О.В. Популяционная характеристика полевки-экономки в радиоэкологических исследованиях // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. 101–107. [Ermakova O.V., Raskosha O.V. Populyatsionnaya kharakteristika polevki-ekonomki v radioekologicheskikh issledovaniyakh // Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya. 2019. № 2. 101–107.] (In Russ.)
<https://doi.org/10.25750/1995-4301-2019-2-101-107>
 25. Салеев Х.А. Частота хромосомных aberrаций в клетках костного мозга полевок-экономок, обитающих на участках с нормальным и повышенным фоном естественной радиации // Вопросы радиоэкологии наземных биогеоценозов. Сыктывкар, 1974. С. 101–103. (Труды Коми фил. АН СССР). [Salyaev Kh. A. Chastota khromosomnykh aberratsiy v kletkakh kostnogo mozga polevok-ekonomok, obitayushchikh na uchastkakh s normalnym i povyshennym fonom estestvennoy radiatsii. Voprosy radioekologii nazemnykh biogeotsenozov. Syktyvkar, 1974. P. 101–103. (Trudy Komi fil. AN SSSR). (In Russ.)]
 26. Nakamura A.J., Suzuki M., Redon C.E. et al. The causal relationship between DNA damage induction in bovine lymphocytes and the Fukushima nuclear power plant accident // Radiat. Res. 2017. V. 187. № 5. P. 630–636. Epub 2017 Feb 27.
<https://doi.org/10.1667/RR14630.1>
 27. Fredga K., Persson F., Stenseth N. Chr. Centric fission in *Microtus oeconomus*. A chromosome study of isolated population in Fennoscandia // Hereditas. 1980. V. 92. № 2. P. 209–216.
 28. Нохрин Д.Ю. Хромосомные нарушения у обыкновенных полевок (*Microtus arvalis*) из района ВУРСа и их потомков, полученных в лаборатории // Конф. “Механизмы поддержания биологического разнообразия”. Екатеринбург, 1995. С. 204–207. [Nokhrin D. Yu. Khromosomnye narusheniya u obyknovennykh polevok (*Microtus arvalis*) iz rayona VURSa i ikh potomkov, poluchennykh v laboratorii // Konf. “Mekhanizmy podderzhaniya biologicheskogo raznoobraziya”. Ekaterinburg, 1995. P. 204–207. (In Russ.)]
 29. Нохрин Д.Ю. Цитогенетическая и онтогенетическая нестабильность у видов-двойников обыкновенной полевки из лабораторных колоний и природных популяций при разной степени загрязнения: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Екатеринбург, 1999. 15 с. [Nokhrin D. Yu. Tsitogeneticheskaya i ontogeneticheskaya nestabilnost u vidov-dvoynikov obyknovennoy polevki iz laboratornykh koloniy i prirodnykh populyatsiy pri raznoy stepeni zagryazneniya [disstrtation]. Ekaterinburg, 1999. 15 p. (In Russ.)]
 30. Гилева Э.А. Эколого-генетический мониторинг с помощью грызунов (уральский опыт). Екатеринбург: Изд-во Уральского университета, 1997. 105 с. [Gileva E.A. Ekologo-geneticheskiy monitoring s pomoshchyu gryzunov (uralskiy opyt). Ekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo universiteta, 1997. 105 p. (In Russ.)]
 31. Шевченко В.А., Померанцева М.Д. Генетические последствия действия ионизирующих излучений / Отв. ред. Г.Д. Засухина. М.: Наука, 1985. 278 с. [Shevchenko V.A., Pomerantseva M.D. Geneticheskie posledstviya deystviya ioniziruyushchikh izlucheniyy / Otiv. red. G.D. Zasuchina. M.: Nauka, 1985. 278 p. (In Russ.)]
 32. Sugahara T., Tsutomu T. Genetic effects of chronic irradiation given to mice throw three successive generations // Genetics. 1964. V. 50. № 5. P. 1143–1158.
 33. Соколов В.Е., Покаржевский А.Д., Кожевникова Т.Д. и др. Популяции млекопитающих на территории Восточно-уральского радиоактивного следа // Экологические последствия радиоактивного загрязнения на Южном Урале / Отв. ред. В.Е. Соколов, Д.А. Криволуцкий. М.: Наука, 1993. С. 156–171. [Sokolov V.E., Pokarzhevskiy A.D., Kozhevnikova T.D. i dr. Populyatsii mlekopitayushchikh na territorii Vostochno-uralskogo radioaktivnogo sleda Ekologicheskie posledstviya radioaktivnogo zagryazneniya na Yuzhnom Urale / Otiv. red. V.E. Sokolov, D.A. Krivoluckij. M.: Nauka, 1993. P. 156–171. [Sb. st.] (In Russ.)]
 34. Гилева Э.А. Хромосомная нестабильность у грызунов с территории ВУРСа: межвидовая разница // Радиационная биология. Радиоэкология. 2002. Т. 42. № 6. С. 665–668. [Gileva E.A. Khromosomnaya nestabilnost u gryzunov s territorii VURSa: mezhvidovaya raznitsa // Radiats. biology. Radioecology. 2002. V. 42. № 6. P. 665–668. (In Russ.)]
 35. Григоркина Е.Б., Пашина И.А. К проблеме радиоадаптации мелких млекопитающих (экологическая специализация вида, радиорезистентность, гемопоэз, иммунитет) // Радиационная биология. Радиоэкология. 2007. Т. 47. № 3. С. 371–378. [Grigorkina E.B., Pashnina I.A. On the Problem of Radioadaptation in Small Mammals (Ecological Specialization of a Species, Radioresistance, Hemopoiesis, Immunity) // Radiats. biology. Radioecology. 2007. V. 47. № 3. P. 371–378. (In Russ.)]
 36. Ермакова О.В., Раскоша О.В. Состояние щитовидной железы полевок-экономок с радиоактивных территорий после дополнительных воздействий // Изв. Самарского НЦ РАН. 2012. Т. 14. № 1–8. С. 1891–1893. [Ermakova O.V., Raskosha O.V. Condition of tundra voles of thyroid gland from radioactive territories after padding influences // Izvestiya Samarskogo NC RAN. 2012. V. 14. № (1–8). P. 1891–1893. (In Russ.)]
 37. Раскоша О.В. Оценка устойчивости клеток щитовидной железы полевок-экономок, обитающих в разных радиоэкологических условиях после дополнительных воздействий, методом ДНК-комет // Изв. Уфимского НЦ РАН. Биология, биохимия,

- генетика. 2018. Т. 3. № 5. С. 5–11. [Раскоша О.В. Оценка устойчивости клеток щитовидной железы полевок-экономов, обитающих в разных радио-экологических условиях после дополнительных воздействий, методом ДНК-комет // *Izvestiya Ufimskogo NC RAN. Biologiya, biohimiya, genetika*. 2018. V. 3. № 5. P. 5–11. (In Russ.)]
https://doi.org/10.31040/2222-8349-2018-5-3-5-11
38. Удалова А.А., Гераськин С.А. Временная динамика и эколого-генетическая изменчивость цитогенетических эффектов в испытывающих техногенное воздействие популяциях сосны обыкновенной // *Журн. общей биологии*. 2011. Т. 72. № 6. С. 455–471. [Udalova A.A., Geraskin S.A. Vremennaya dinamika i ekologo-geneticheskaya izmenchivost tsitogeneticheskikh effektov v ispytyvayushchikh tekhnogennoe vozdeystvie populyatsiyakh sosny obyknovennoy // *Zhurnal obshchey biologii*. 2011. V. 72. № 6. P. 455–471. (In Russ.)]
 39. Ильенко А.И., Крапиво Т.П. Ревизия радиорезистентности десятого поколения рыжих полевок (*Clethrionomys glareolus*) – цериофоров // *Докл. АН СССР*. 1991. № 2. С. 498–500. [Ilyenko A.I., Krapivko T.P. Reviziya radiopeizistentnosti desyatogo pokoleniya pyzhikh polevok (*Clethrionomys glareolus*) – tserioforov // *Dokl. AN SSSR*. 1991. № 2. P. 498–500. (In Russ.)]
 40. Фетисов А.Н., Смагин А.И., Рубанович А.В. Морфометрическая характеристика и сравнительная радиостойчивость популяции прудовика большого (*Limnea stagnalis*) из водоемов с различными радиоэкологическими условиями // *Радиобиология*. 1993. Т. 33. № 1. С. 160–165. [Fetisov A.N., Smagin A.I., Rubanovich A.V. Morfometricheskaya kharakteristika i sravnitel'naya radioustoychivost populyatsii prudovika bolshogo (*Limnea stagnalis*) iz vodoemov s razlichnymi radioekologicheskimi usloviyami // *Radiobiology*. 1993. V. 33. № 1. P. 160–165. (In Russ.)]
 41. Позолотина В.Н., Антонова Е.В., Безель В.С. и др. Пути адаптации ценопопуляций одуванчика лекарственного к длительному химическому и радиационному воздействию // *Экология*. 2006. № 6. С. 1–7. [Pozolotina V.N., Antonova E.V., Bezel V.S. et al. Pathways of adaptation of common dandelion cenopopulations to long-term chemical and radiation influences // *Ekologiya*. 2006. № 6. P. 1–7. (In Russ.)]
 42. Маленченко А.Ф., Сушко С.Н., Савин А.О. и др. Оценка спонтанного и химически индуцированного мутагенеза у мышевидных грызунов, находившихся в условиях техногенно- и природноповышенного радиационного фона // *Вопр. радиац. безопасности*. 2011. № 3. С. 20–26. [Malenchenko A.F., Sushko S.N., Savin A.O. et al. Assessment of the processes of spontaneous and chemically induced mutagenesis in mouse-like rodents inhabiting areas with technologically enhanced and naturally occurred high level of radioactivity // *Voprosy rad. bezop.* 2011. № 3. P. 20–26. (In Russ.)]
 43. Газиев А.И. Возможность индукции адаптивного ответа клеток на воздействие ионизирующей радиации // *Радиобиология*. 1986. Т. 26. № 4. С. 447–452. [Gaziev A.I. Vozmozhnost' induktsii adaptivnogo otveta kletok na vozdeystvie ionizirujushhej radiatsii // *Radiobiology*. 1986. V. 26. № 4. P. 447–452. (In Russ.)]

Cytogenetic Effects in the Bone Marrow of Animals Living in Conditions of Increased Natural Radiation Background

L. A. Bashlykova^{a, #} and O. V. Raskosha^a

^a*Institute of Biology, FRC Komi Scientific Center, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russia*

[#]*e-mail: labashlykova@ib.komisc.ru*

We studied the cytogenetic effects in the bone marrow cells of root voles (*Alexandromys (Microtus) oeconomus* Pall.), which lived in areas contaminated with uranium and radium, as a result of the operation of radium mining (radium site) and the storage of its waste (uranium-radium site) (Komi Republic). The level and nature of mutational effects in voles from radioactively contaminated areas indicates the persistence of an increased frequency of chromosome aberrations and the appearance of individuals with an altered karyotype, which indicates genetic instability. When determining the nature of the dynamics of the mutation process in the studied populations, a high frequency of cells with micronuclei was noted in voles from the radium area, with the exception of the phase of population decline. In experiments with the use of provocative factors of chemical (urethane) and radiation (acute γ -irradiation) nature, an increase in the stability of bone marrow cells of animals living in conditions of increased background radiation has been shown.

Keywords: increased background of natural radioactivity, housekeeper vole, bone marrow, genome instability, resistance to additional factors

УДК 577.1:599.323.4:614.876:57.084.2:539.1.047

МИНОРНЫЕ ФРАКЦИИ ФОСФОЛИПИДОВ В МЕХАНИЗМЕ АДАПТАЦИИ ДИКИХ ГРЫЗУНОВ К ПОВЫШЕННОМУ РАДИАЦИОННОМУ ФОНУ

© 2023 г. Л. Н. Шишкина^{1,*}, А. Г. Кудяшева²

¹ Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН, Москва, Россия

² Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

*E-mail: shishkina@sky.chph.ras.ru

Поступила в редакцию 13.01.2022 г.

После доработки 07.09.2022 г.

Принята к публикации 21.12.2022 г.

Исследована роль минорных фракций фосфолипидов печени в механизме адаптации четырех видов мышевидных грызунов, отловленных в разные годы в зоне аварии на Чернобыльской АЭС на участках с уровнем мощности дозы внешнего γ -излучения в 1987 г. от 0.02 до 200 мР/ч, к повышенному радиационному фону в зависимости от радиорезистентности вида. В первый год после аварии выявлен рост доли лизоформ ФЛ и сфингомиелина, вовлеченных в процессы апоптоза, и увеличение кардиолипина, принимающего участие во взаимодействии ДНК с мембраной. Спустя 5 лет после аварии наблюдается рост суммарной доли фосфатидилинозита и фосфатидилсерина, участвующих в транспорте ионов кальция и в регуляции внутриклеточных процессов. Совокупность полученных данных и анализ литературы позволяют заключить, что изменение соотношения минорных фракций ФЛ в печени мышевидных грызунов, обитающих на территориях с повышенным уровнем радиации, обуславливая адаптивные перестройки клеточного метаболизма, явились основой формирования на этих территориях новых субпопуляций грызунов с отличной от нормы системой регуляции перекисного окисления липидов.

Ключевые слова: зона аварии на ЧАЭС, полевка-экономка, полевая мышь, полевка обыкновенная, рыжая полевка, перекисное окисление липидов, состав фосфолипидов, печень, регуляция

DOI: 10.31857/S0869803123020108, **EDN:** EPBDGF

Хозяйственная деятельность человека, аварии на АЭС и радиохимических производствах способствовали появлению обширных территорий, биота и население которых существуют в условиях повышенного радиационного фона. Несмотря на прогнозируемую способность природы к самосохранению и самоочищению через механизмы глобального перераспределения, радиоэкологическая ситуация на таких территориях, как правило, не нормализуется в течение десятилетий [1–3]. Хотя после аварии на ЧАЭС прошло уже 35 лет и за эти годы произошли существенные изменения биотопов в зоне аварии, на многих территориях сохраняется повышенный радиационный фон [4]. Это обуславливает необходимость детального изучения не только формирования последствий воздействия хронического ионизирующего излучения на организм, но и механизма адаптации биообъектов к существованию в условиях повышенного радиационного фона.

Результаты проведенных ранее комплексных исследований состояния популяций мышевид-

ных грызунов, отловленных как в разные годы в зоне аварии на ЧАЭС, так и обитающих в течение десятилетий на участках с повышенным радиационным фоном в Республике Коми, свидетельствуют о высокой чувствительности параметров системы регуляции перекисного окисления липидов (ПОЛ) в их тканях к изменившимся условиям обитания. Они позволили констатировать, что на радиоактивно загрязненных участках формируются новые субпопуляции грызунов с отличной от нормы системой регуляции ПОЛ [5–8]. Это требует выявления параметров системы регуляции ПОЛ, обуславливающих выживание млекопитающих в условиях повышенного радиационного фона.

Цель работы — изучить роль минорных фракций фосфолипидов печени в механизме адаптации мышевидных грызунов к повышенному радиационному фону в зависимости от радиорезистентности вида.

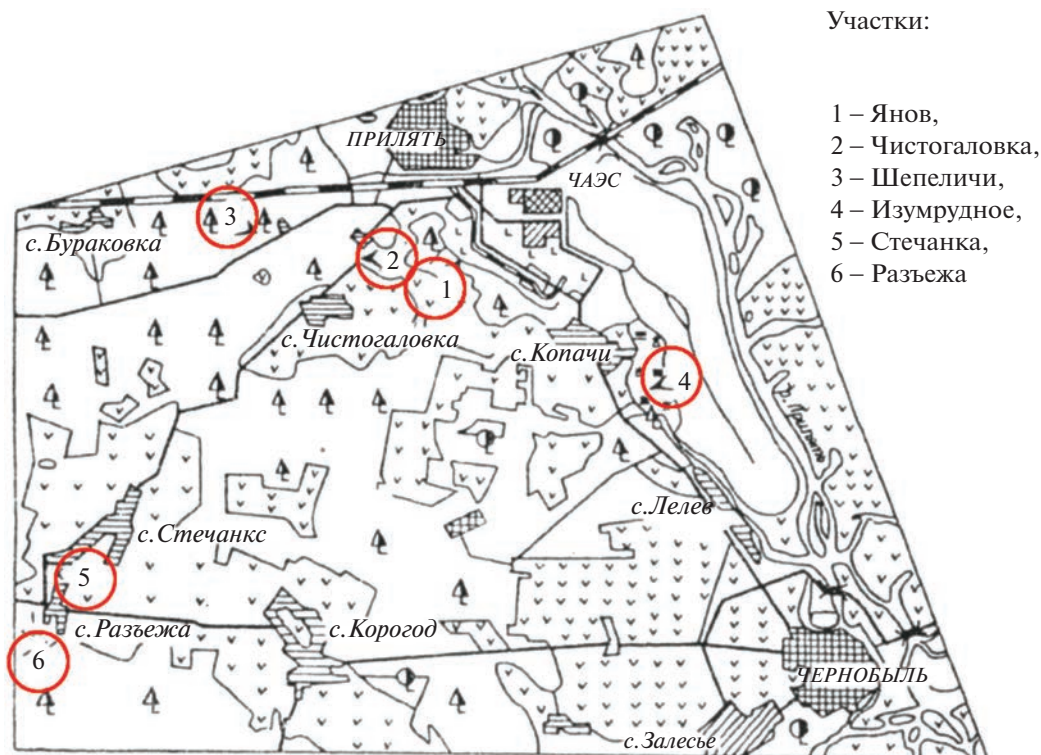


Рис. 1. Схема расположения участков отлова мышевидных грызунов в зоне аварии на Чернобыльской АЭС.
Fig. 1. Schema of location of the caughting areas of wild rodents in the Chernobyl NPP accident zone.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Дикие мышевидные грызуны, будучи удобным тест-объектом для радиационного мониторинга [1, 5, 9], являются адекватным биообъектом и для изучения механизма адаптации млекопитающих к повышенному радиационному фону. Отлов грызунов проводили на шести участках в 30-километровой зоне аварии на ЧАЭС в течение 1987–1993 гг. и в 2007 г. Участки отлова грызунов по уровню мощности дозы внешнего γ -излучения в августе 1987 г. условно были разделены на три группы: с низким 0,02–0,1 мР/ч (5 – Стечанка, 6 – Разьежа), средним 2–20 мР/ч (2 – Чистоголовка, 3 – Шепеличи, 4 – Изумрудное) и высоким 150–200 мР/ч (1 – Янов) уровнем γ -фона. Схема расположения участков отлова представлена на рис. 1. В течение первых семи лет после аварии мощность дозы внешнего γ -излучения снизилась в 20–40 раз, однако это изменение происходило неравномерно: в 2007 г. мощность дозы на участке 1 стала ниже, чем на участках 2 и 3. Радиоэкологическая характеристика участков отлова и поглощенные мышевидными грызунами дозы от внешнего и внутреннего излучений представлены в работах [5, 6, 8, 10, 11].

Объектами исследования являлись полевка-экономка (*Microtus oeconomus* Pall.), полевая мышь (*Apodemus agrarius* Pall.), рыжая европей-

ская полевка *Clethrionomys glareolus* Schreb.), полевка обыкновенная (*Apodemus arvalis* Pall.). Отлов животных осуществляли преимущественно в августе-сентябре, а иногда в мае-июне. Помимо перечисленных выше участков, в 1991–1993 гг. отлов грызунов проводили и в окрестностях г. Киева (Теремки, Романков, Безрадиичи), уровень внешнего радиационного фона на которых практически соответствовал норме. Анализировали показатели от 1000 особей трех возрастных групп: неполовозрелые, половозрелые и перезимовавшие животные. Все работы выполняли в соответствии с Правилами лабораторной практики в Российской Федерации и принятыми Европейской Конвенцией правилами по защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и иных научных целей [12].

Печень сразу после декапитации грызунов помещали на лед. Липиды из печени выделяли по методу Блая и Дайера в модификации Кейтса [13]. Качественный состав фосфолипидов (ФЛ) определяли методом ТСХ, используя стеклянные пластинки 90 × 120 мм, силикагель типа G (Sigma, США) и смесь растворителей хлороформ: метанол: ледяная уксусная кислота: дистиллированная вода в объемных соотношениях 12.5:7.5:2:1 в качестве мобильной фазы. Проявление хроматограмм проводили в парах йода. Количественный

анализ отдельных фракций ФЛ определяли на спектрометре "Сресол-211" (Германия) при длине волны 800 нм по образованию фосфорномолибденового комплекса в присутствии аскорбиновой кислоты [14]. Для каждой пробы анализировали не менее четырех—пяти хроматографических дорожек. Методика анализа состава липидов подробно изложена в работах [5, 7, 15].

Результаты обрабатывали стандартными методами вариационной статистики, используя Microsoft Office Excel 7, и пакет компьютерных программ KINS [16]. В таблицах и на рисунках результаты представлены в виде средних арифметических значений с указанием их средних квадратичных ошибок ($M \pm m$).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Стационарность процессов ПОЛ, играющих важную роль в регуляции метаболизма в биологических объектах любой сложности, в норме поддерживается физико-химической системой регуляции, однотипно функционирующей на мембранном, клеточном и органном уровнях [15, 17, 18]. Помимо параметров антиоксидантного статуса тканей важную роль в регуляции ПОЛ играет состав липидов, в том числе такой его обобщенный показатель в тканях млекопитающих, как соотношение сумм более легко- и более трудноокисляемых фракций ФЛ, обуславливающий способность липидов к окислению [15].

Поскольку печень характеризуется высокой чувствительностью к радиоактивному загрязнению среды обитания грызунов [5, 19] и является одним из главных органов биосинтеза и деградации ФЛ, то это и определило выбор состава липидов печени как объекта исследования. Необходимо подчеркнуть, что именно ФЛ являются структурными и функциональными компонентами поверхностных монослоев липопротеинов, транспортирующих липиды в ткани с током крови [20]. К минорным фракциям ФЛ относятся лизоформы ФЛ, сфингомиелин (СМ), фосфатидилинозит (ФИ), фосфатидилсерин (ФС), кардиолипид (КЛ) и фосфатидная кислота (ФК). В составе гидрофобного бислоя в мембранах у лизоформ ФЛ и СМ содержатся преимущественно насыщенные жирные кислоты, что определяет их устойчивость к окислению, а в составе жирных кислот остальных минорных фракций ФЛ присутствуют преимущественно ненасыщенные жирные кислоты, что обуславливает их высокую способность к окислению. Очевидно, эти различия в степени ненасыщенности жирных кислот минорных фракций ФЛ обуславливают и их участие в структурной организации мембран и регуляции метаболизма. Так, именно СМ образует со стеринами рафты, т.е. динамические мембранные микродомены, которые вовлечены в апоптоз

и пролиферацию клеток, а ненасыщенные жирные кислоты являются предшественниками биосинтеза эйкозаноидов, лейкотриенов и тромбосанов [20].

Немногочисленные данные литературы, в которых определяли величины ЛД_{50/30} диких грызунов, и анализ обеспеченности липидов их тканей антиоксидантами свидетельствуют, что среди исследованных видов наиболее резистентными к острому облучению являются рыжие полевки и полевые мыши, а полевка-экономка является самым радиочувствительным видом [8]. Безусловно, состояние популяций мышевидных грызунов вследствие изменения биотопов участков их отлова за прошедшие годы существенно изменилось, что также способствовало изменению видового состава грызунов в зоне отчуждения: спустя 21 год после аварии доминирующим видом стала полевая мышь, а единичные особи полевки-экономки встречались лишь на некоторых участках [10, 11]. Однако отсутствие нормализации состава и физико-химических свойств липидов тканей и сохранение частоты клеток костного мозга с микроядрами на уровне показателей первых лет после аварии у полевых мышей, отловленных на слабозагрязненном участке б, не наблюдались даже в 2007 г. [8, 10, 11].

Хроническое низкоинтенсивное излучение вызывает качественные изменения состояния природных популяций грызунов, обуславливая нарушение синхронности смены фаз популяционного цикла, изменения морфофизиологического состояния популяции и динамику возрастных изменений параметров системы регуляции ПОЛ [5–8].

Так, анализ состава ФЛ печени грызунов из зоны отчуждения ЧАЭС в первый год после аварии выявил высокую индивидуальную гетерогенность в количественном соотношении фракций ФЛ в зависимости как от вида и пола зверьков, так и участка их отлова, наиболее выраженную у неполовозрелых грызунов, отловленных на участках со средним уровнем загрязнения [5]. Тем не менее сравнительный анализ динамики относительного содержания отдельных минорных фракций ФЛ позволяет обнаружить ряд закономерностей.

Как известно, КЛ в процессе репарации ДНК участвует в образовании линкеров ДНК с мембраной [21], а ФК является одним из основных предшественников биосинтеза многих ФЛ в печени животных [22]. Осенью 1987 г. в составе ФЛ печени грызунов с разных участков относительное суммарное содержание этих фракций существенно зависело от вида грызунов и участка отлова. Так, более высокая доля этих фракций обнаружена у неполовозрелых радиочувствительных полевок-экономок (рис. 2) по сравнению с

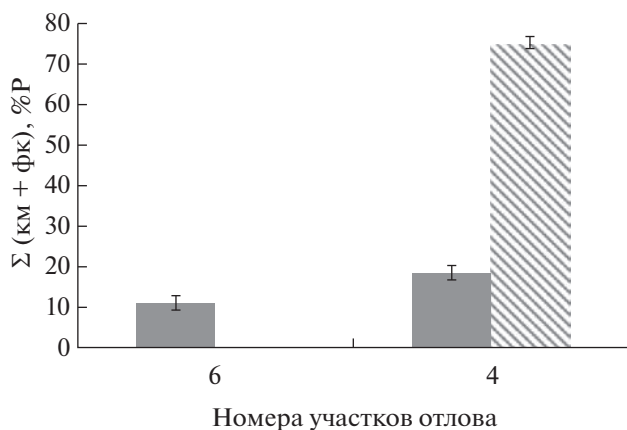


Рис. 2. Суммарная доля кардиолипина и фосфатидной кислоты (КЛ+ФК) в фосфолипидах печени неполовозрелых полевков-экономов (самки), отловленных на участках с разным уровнем мощности дозы внешнего γ -излучения осенью 1987 г.

Fig. 2. Summar share of cardiolipin and phosphatidic acid (CL+PA) in the liver phospholipids of the immature *Microtus oeconomus* Pall. (female) caught at areas with the different level of the dose rate of the external γ -radiation in autumn 1987.

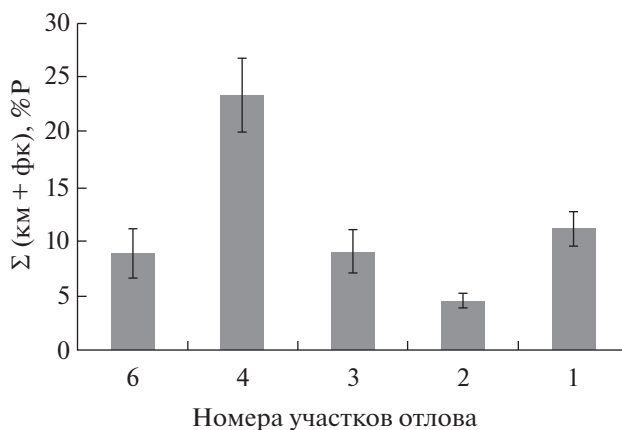


Рис. 3. Суммарная доля кардиолипина и фосфатидной кислоты (КЛ+ФК) в фосфолипидах печени неполовозрелых полевых мышей (самки), отловленных на участках с разным уровнем мощности дозы внешнего γ -излучения осенью 1987 г.

Fig. 3. Summar share of cardiolipin and phosphatidic acid (CL+PA) in the liver phospholipids of the immature *Apodemus agrarius* Pall. (female) caught at areas with the different level of the dose rate of the external γ -radiation in autumn 1987.

долей КЛ+ФК в составе более резистентных неполовозрелых полевых мышей (рис. 3). Осенью 1987 г. в ФЛ печени неполовозрелых самок полевки обыкновенной гетерогенность суммарной доли фракций КЛ+ФЛ выявлена у зверьков, отловленных на участке 2 ($3.20 \pm 0.20\%$, $n = 11$ и $11.7 \pm 2.4\%$, $n = 11$), в то время как этот показатель в ФЛ печени неполовозрелых самок, отловленных на участке 1, оказался равным $13.3 \pm 2.4\%$ ($n = 3$). Отсутствие линейной зависимости доли КЛ+ФК от мощности дозы внешнего γ -излучения на участке отлова обнаружено и у неполовозрелых самок полевых мышей (рис. 3). Осенью 1991 г. повышенное содержание фракций КЛ+ФК сохраняется в ФЛ печени неполовозрелых самок полевки-экономки ($13.0 \pm 1.4\%$, $n = 1$) и рыжих полевков ($12.1 \pm 1.4\%$, $n = 2$), отловленных на участках 5 и 6. Повышенное содержание КЛ+ФК (13.1 – 18.7% , $n = 5$) выявлено и в печени полевых мышей разного возраста, отловленных на участке 1 спустя 7 лет после аварии. Нормализация доли этих фракций в составе ФЛ печени неполовозрелых самцов и самок полевых мышей обнаружена спустя 21 год после аварии ($5.1 \pm 0.6\%$, $n = 15$) [10].

Среди минорных фракций ФЛ, активно участвующих в процессах биосинтеза ДНК, пролиферации и апоптоза клеток и многочисленных аспектах регуляции метаболизма в нормальных и патологических условиях, важную роль играют сфинголипиды, а основным ФЛ в печени является СМ [20, 23, 24]. Обнаружено, что в ФЛ печени неполовозрелых самок полевков-экономов и по-

левых мышей, отловленных осенью 1987 г. на всех участках, кроме участка 4, доля СМ абсолютно одинакова и варьирует в пределах от 7.26 ± 0.76 до $7.43 \pm 0.74\%$. Это вдвое выше аналогичной величины в ФЛ печени лабораторных мышей [25] и почти в 2 раза превышает долю СМ в ФЛ печени неполовозрелых самок полевков-экономов с контрольных территорий в Республике Коми [26]. Однако у грызунов, отловленных в 1987 г. на участке 4 с наиболее низким средним уровнем загрязнения, обнаружена высокая индивидуальная гетерогенность состава ФЛ. Так, среди неполовозрелых самок полевков-экономов, отловленных осенью 1987 г. на участке 4, выявлены две группы животных, состав ФЛ печени которых достоверно отличается и между этими группами (доли СМ $8.35 \pm 0.76\%$, $n = 25$ и $3.01 \pm 0.25\%$, $n = 7$), и от показателей у полевков, одновременно отловленных на других участках [5]. Высокая доля СМ ($15.8 \pm 1.8\%$) выявлена у одной неполовозрелой самки полевой мыши, также отловленной на участке 4, и самок рыжих полевков ($12.2 \pm 2.3\%$, $n = 5$), отловленных на участке 3 со средним уровнем загрязнения. Однако осенью 1991 г. доля СМ в ФЛ печени неполовозрелых рыжих полевков, отловленных на слабозагрязненных участках 5 и 6, равна $3.45 \pm 0.09\%$ ($n = 2$).

Резкий рост доли лизоформ в составе ФЛ печени грызунов всех видов, отловленных на участках с низким уровнем внешнего γ -фона осенью 1987 г. (табл. 1), свидетельствует о существенных нарушениях процесса биосинтеза липидов, вызывающих деструктивные изменения в органе, что под-

Таблица 1. Доля лизоформ (%P) в составе фосфолипидов печени мышевидных грызунов разных видов (самки), отловленных на участках 5 и 6 с низким уровнем внешнего γ -фона осенью 1987 г.

Table 1. The lysoforms share (%P) in the liver phospholipids of wild rodents of the different species (female) caught at areas 5 and 6 with the low level of the external γ -phone in autumn 1987

Вид // Возраст грызунов	Полевки-экономки	Полевые мыши	Рыжие полевки
Неполовозрелые	38.3 ± 1.2 (22)	29.55 ± 0.85 (9)	—
Перезимовавшие	32.8 ± 2.0 (1)	20.8 ± 2.7 (6)	37.50 ± 0.85 (5)

Примечание. В таблицах и тексте в скобках указано число особей.

Таблица 2. Доля лизоформ в составе фосфолипидов печени полевок-экономок (самки), отловленных на участках с разным уровнем внешнего γ -фона осенью 1991 г.

Table 2. The lysoforms share (%P) in the liver phospholipids of *Microtus oeconomus* Pall. (female) caught at areas with the different level of the external γ -phone in autumn 1991

Участок 6, половозрелые животные	Участок 4, неполовозрелые животные	Участок 1, половозрелые животные
11.6 ± 1.2 (2)	9.2 ± 1.1 (2)	31.4 ± 1.6 (3)

твердили морфологические исследования их печени [19]. Наличие деструктивных изменений паренхимы печени закономерно, так как лизоформы ФЛ обладают выраженным литическим действием на мембраны и активно участвуют в процессах апоптоза [25, 26]. Необходимо отметить, что столь существенный рост относительно содержания лизоформ в составе ФЛ печени не наблюдается ни в лабораторных экспериментах при облучении грызунов в малых дозах [13, 27], ни у полевок-экономок разных возрастных групп, длительное время обитающих на территориях с нормальным и повышенным радиационным фоном в Республике Коми или отловленных в

окрестностях г. Киева в 1991 и 1993 г. [7, 28]. Только в мае 1991 г. доля лизоформ в составе ФЛ печени неполовозрелых самок рыжих полевок со слабозагрязненных участков из зоны аварии падает до $7.1 \pm 0.4\%$, $n = 2$.

Одним из ключевых ферментов системы передачи сигнала является протеинкиназа C, в активации которой и ее связывании с мембраной активно участвуют ФИ и ФС [25]. Суммарная доля этих фракций ФЛ в печени лабораторных мышей и полевок-экономок, отловленных на территориях с нормальным радиационным фоном, как правило, варьирует в пределах от 11 до 20% [5, 17, 26, 27]. Осенью 1987 г. в составе ФЛ печени неполовозрелых самок полевок-экономок, отловленных на участке 6, суммарная доля этих фракций составляет $6.7 \pm 0.8\%$ ($n = 22$), а у животных разных групп с участка 4 она падает до 0.6–4.5%. В целом уменьшение относительного суммарного содержания ФИ+ФС в составе ФЛ печени более радиорезистентных рыжих полевок ($7.5 \pm 0.5\%$, участок 6) и полевых мышей (рис. 4) не столь значительно. Однако отсутствие линейной зависимости доли фракций ФИ+ФС от уровня внешнего γ -фона на участках отлова, что четко видно из данных рис. 4, приводит к тому, что самая низкая доля этих фракций обнаружена в составе ФЛ печени неполовозрелых самок полевых мышей, отловленных на участке 4. Спустя 5 лет после аварии суммарная доля ФИ+ФС возрастает как в составе ФЛ печени неполовозрелых самок полевок экономок, отловленных на участках 6 ($14.1 \pm 1.3\%$) и 4 ($12.3 \pm 0.6\%$), так и полевых мышей, отловленных на участках со средним и сильным уровнем загрязнения, до 13–15%. При этом их доля в составе ФЛ печени неполовозрелых самок полевых мышей, отловленных на слабозагрязненных участках в 1991 и 2007 г., сохраняется на уровне 11%.

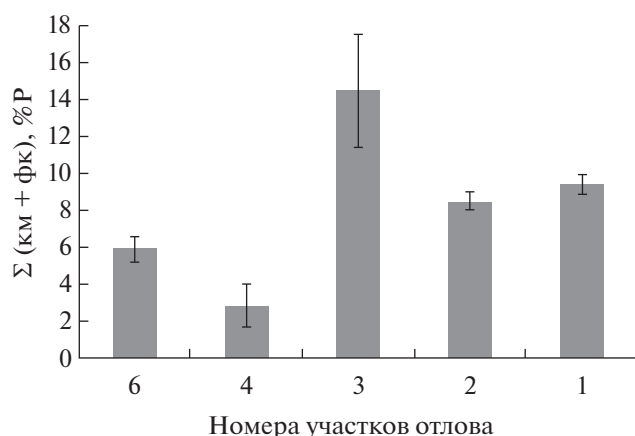


Рис. 4. Суммарная доля фосфатидилинозита и фосфатидилсерина (ФИ+ФС) в фосфолипидах печени неполовозрелых полевых мышей (самки), отловленных на участках с разным уровнем мощности дозы внешнего γ -излучения осенью 1987 г.

Fig. 4. Summar share of phosphatidylinositol and phosphatidylserine (PI+PS) in the liver phospholipids of the immature *Apodemus agrarius* Pall. (female) caught at areas with the different level of the dose rate of the external γ -radiation in autumn 1987.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совокупность представленных данных свидетельствует о закономерных изменениях количественного соотношения минорных фракций ФЛ в печени грызунов, отловленных в разные годы в зоне отчуждения аварии на ЧАЭС, как в зависимости от радиорезистентности вида, так и от уровня внешнего γ -фона на участках отлова. В составе ФЛ печени в первый год после аварии выявлен существенный рост доли лизоформ ФЛ и СМ, т.е. фракций ФЛ, активно участвующих в процессах апоптоза и пролиферации клеток, и кардиолипина, обеспечивающего связь ДНК с мембраной. При этом в первый год после аварии наблюдается достоверное уменьшение относительного содержания ФИ и ФС, участвующих в передаче сигнала в клетку. Эти изменения сопровождаются деструктивными изменениями паренхимы печени, наиболее выражены у неполовозрелых животных и характеризуются отсутствием линейной зависимости от уровня внешнего радиационного фона. Спустя 5 лет после аварии наблюдаются существенное снижение доли СМ и рост суммарного содержания ФИ+ФС в печени животных практически всех возрастных групп, отловленных на разных участках в зоне аварии. Однако существенное снижение относительного содержания лизоформ ФЛ не во всех случаях наблюдается и спустя 5 лет после аварии (табл. 2). В составе ФЛ печени более резистентных рыжих полевок разного возраста, отловленных в мае и осенью 1991 г. на участках 5 и 6 со слабым уровнем загрязнения, доля лизоформ ФЛ равна 6,7–7,1%.

Таким образом, изучение динамики изменения состава ФЛ печени мышевидных грызунов, отловленных в зоне отчуждения аварии на ЧАЭС на участках с разным уровнем мощности дозы внешнего γ -излучения, и анализ данных литературы об участии ФЛ в регуляции метаболизма в биологических системах позволяют предположить, что минорные фракции ФЛ участвуют в процессах адаптации мышевидных грызунов к изменившимся условиям окружающей среды. Резкий рост доли лизоформ и кардиолипина в составе ФЛ печени в первый год после аварии позволяет организму ликвидировать поврежденные клетки и обеспечить возможность осуществлять репарацию ДНК. Увеличение относительного содержания ФИ и ФС, участвующих в транспорте ионов кальция и регуляции внутриклеточных процессов, способствует восстановлению метаболизма.

Изменение количественного соотношения минорных фракций ФЛ в печени мышевидных грызунов, отловленных в разные годы в зоне аварии на ЧАЭС, обуславливая адаптивные перестройки клеточного метаболизма, очевидно, стало основой формирования на загрязненных радио-

нуклидами территориях новых субпопуляций грызунов с отличной от нормы системой регуляции ПОЛ [6–8]. Это предположение подтверждается как отсутствием корреляционных взаимосвязей между показателями антиоксидантного статуса и составом липидов в печени половозрелых полевых мышей, отловленных на участках 1, 2 и 4 в 1993 г. в зоне аварии на ЧАЭС, при их наличии у отловленных одновременно грызунов в пригородах г. Киева, так и существенным уменьшением взаимосвязанности между соотношением более легко- и более трудноокисляемых фракций ФЛ и отношением основных фракций ФЛ фосфатидилхолин/фосфатидилэтаноламин в печени неполовозрелых полевых мышей, отловленных на участке 1 в зоне аварии в 2007 г. [6, 8].

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена в рамках государственных заданий Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН (№ 44.4 гос. № темы 0084-2019-0014) и Института биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (гос. № темы 1220406000024-5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексахин Р.М., Архипов Н.П., Бархударов Р.М. и др.* Тяжелые естественные радионуклиды в биосфере: Миграция и биологическое действие на популяции и биоценозы. М.: Наука, 1990. 368 с. [*Alexakhin R.M., Arkhipov N.P., Barkhudarov R.M. et al.* Heavy Natural Radionuclides in Biosphere: Migration and Biological Effects on Population and Biogeocenoses. М.: Nauka, 1990. 368 p. (In Russ.)]
2. *Позолотина В.Н., Молчанова И.В., Караваева Е.Н. и др.* Современное состояние наземных экосистем зоны Восточно-Уральского радиоактивного следа: уровни загрязнения, биологические эффекты. Екатеринбург: Изд-во Гошицкий, 2008. 204 с. [*Pozolotina V.N., Molchanova I.V., Karavaeva E.N. et al.* The Current State of the Terrestrial Ecosystem in the Eastern Ural Radioactive Trace Contamination: Levels and Biological Effects. Goschinskiy: Ekaterinburg, 2008. 204 p. (In Russ.)]
3. *Фесенко С.В., Емлютина Е.С.* Концентрация тория в природных средах: обзор мировых данных // Радиационная биология. Радиоэкология. 2020. Т. 60. № 6. С. 635–648 [*Fesenko S.V., Emlyutina E.S.* Thorium concentration in natural environment // Radiation biology. Radioecology. 2020. V. 60. № 6. P. 635–648 (In Russ.)]
4. Радиэкологические последствия радиационных аварий: к 35-й годовщине аварии на ЧАЭС // Сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., Обнинск, 22–23 апреля 2021г. / Под ред Н.И. Санжаровой, В.М. Шершакова. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2021. 399 с. [Radioecological Consequences of Radiation Accidents: to the 35th anniversary of the Chernobyl Accident: Proc. Int. Research and Practice Conference, Obninsk, April 22–23, 2021 / Eds N.I. San-

- zharova, V.M. Shershakov. Obninsk: RIRAE, 2021. 399 p. (In Russ.)]
5. Кудяшева П.Г., Шишкина Л.Н., Загорская Н.Г., Таскаев А.И. Биохимические механизмы радиационного поражения природных популяций мышевидных грызунов. СПб.: Наука, 1997. 156 с. [Kudyasheva A.G., Shishkina L.N., Zagorskaya N.G., Taskaev A.I. Biochemical Mechanisms of the Radiation Damage in the Natural Populations of Rodent. SPb.: Nauka, 1997. 156 p. (In Russ.)]
 6. Шишкина Л.Н., Кудяшева А.Г., Загорская Н.Г., Таскаев А.И. Регуляция окислительных процессов в тканях мышевидных, грызунов, отловленных в зоне аварии на ЧАЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2006. Т. 46. № 2. С. 216–232. [Shishkina L.N., Kudyasheva A.G., Zagorskaya N.G., Taskaev A.I. The Regulation of the Oxidative Processes in the Tissues of the Wild Rodents Caught in the Chernobyl NPP Accident Zone // Radiat. biologiya. Radioecology. 2006. V. 46. № 2. P. 216–232 (In Russ.)]
 7. Kudyasheva A.G., Shishkina L.N., Shevchenko et al. Biological consequences of increased radiation background for *Microtus oeconomus* Pall. populations // J. Environ. Radioact. 2007. V. 97. P. 30–41.
 8. Shishkina L.N., Kudyasheva A.G., Zagorskaya N.G. et al. Participation of the Lipid Peroxidation Processes in the Mechanism of the Wild Rodent Adaptation to Radioactive Contamination of the Chernobyl NPP Zone // The Lessons of Chernobyl: 25 Years later / Eds E.B. Burlakova, V.I. Naidich. New York: Nova Science Publishers, 2012. P. 187–208.
 9. Соколов В.Е., Криволицкий Д.Я., Усачев В.Л. Дикие животные в глобальном радиоэкологическом мониторинге. М.: Наука, 1989. 150 с. [Wild animals in the global radioecological monitoring. M.: Nauka, 1989. 150 p. (In Russ.)]
 10. Таскаев А.И., Материй Л.Д., Кудяшева А.Г. и др. Биологические последствия радиоактивного загрязнения для мышевидных грызунов в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС // Теор. и прикл. экология. 2016. [Taskaev A.I., Matriy L.D., Kudyasheva A.G. et al. Biological consequences of radioactive contamination for rodents in the exclusion zone of the Chernobyl NPP // Theoretical and Applied Ecology. 2016. № 2. P. 55–64. (In Russ.)]
 11. Кудяшева А.Г., Башлыкова Л.А., Гудков И.Н. Отдаленные последствия радиационных аварий для мышевидных грызунов в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС // Вестник. Ин-та биологии. 2017. № 4. С. 32–40. [Kudyasheva A.G., Bashlykova L.A., Gudkov I.N. Remote consequences of the radiation accidents for rodents in the exclusion zone of Chernobyl PS // Vestnik Instituta Biologii. 2017. № 4. P. 32–40 (In Russ.)]
 12. Protection of Vertebrate Animals Used for Experimental and other Scientific Purposes (EST 123)m Strasbourg, 1986/ 20.
 13. Кейтс М. Техника липидологии М.: Мир, 1975. 322 с. [Kates M. The Technologist of Lipidology. M: Mir, 1975. 322 p. (Russ. Vers.)]
 14. Биологические мембраны: материалы и методы. М.: Мир, 1990. 424 с. [Biological Membranes: A Practical Approach / Eds J.B.C. Findlay, W.H. Evans. M.: Mir, 1990. 424 p. (Russ. Vers.)]
 15. Шишкина Л.Н., Кушнирева Е.В., Смотряева М.А. Новые подходы к оценке биологических последствий воздействия радиации в малых дозах // Радиационная биология. Радиоэкология. 2004. Т. 44. № 3. С. 289–295. [Shishkina L.N., Kushnireva Ye.V., Smotryaeva M.A. A new approach to assessment of biological consequences of exposure to low-dose radiation // Radiat. biologiya. Radioecology. 2004. V. 44. № 3. P. 289–295. (In Russian)]
 16. Брин Э.Ф., Травин С.О. Моделирование механизмов химических реакций // Химическая физика. 1991 Т. 10. № 6. С. 830–837. [Brin E.F., Travin S.O. Modeling mechanisms of the chemical reactions // Khimicheskaya fizika. 1991. V. 10. № 6. P. 830–837. (In Russ.)]
 17. Burlakova Ye.B., Pal'mina N.P., Mal'tseva Ye.L. // Membrane Lipid Oxidation / Ed. C. Vigo-Pelfrey. V. III. Boston: Boca Raton, Ann Arbor, CRC Press, 1991. P. 209–237.
 18. Shishkina L.N., Klimovich M.A., Kozlov M.V. Functioning Similarity of the Physicochemical Regulatory System on the Membrane and Organs Levels // Pharmaceutical and Medicine Biotechnology. New Perspectives / Eds. New York: Nova Science Publishers, 2013. P. 151–157.
 19. Материй Л.Д., Ермакова О.В., Таскаев А.И. Морфофункциональная оценка состояния организма мелких млекопитающих в радиоэкологических исследованиях (на примере полевки-экономки). Сыктывкар, 2003. 164 с. [Matriy L.D., Ermakova O.V., Taskaev A.I. Morphofunctional Assessment of the State of Organisms of Small Mammals in Radioecological Research (by the example of root vole). Syktyvkar, 2003. 164 p. (In Russ.)]
 20. Lordan R., Tsoupras A., Zabetakis I. Phospholipids of Animal and Marine Origin: Structure, Function, and Anti-Inflammatory Properties // Molecules. 2017. V. 22. № 11. P. 1964–1996. <https://doi.org/10.3390/molecules22111964>
 21. Стручков В.А., Стразжевская Н.Б. Структурные и функциональные аспекты ядерных липидов нормальных и опухолевых клеток // Биохимия. 2000. Т. 65. № 5. С. 620–643. [Struchkov V.A., Strazhevskaya N.B. // Biochem. 2000. V. 65. № 5. P. 620–643. (In Russ.)]
 22. Tijbing L.B.M., Geelen M.J.H., van Golde L.M.C. Regulation of the biosynthesis of triacylglycerol, phosphatidylcholine and phosphatidylethanolamine in the liver // Biochim. Biophys. Acta. 1989. V. 1004. P. 1–19.
 23. Merrill Jr.A., Sandhoff K. Sphingolipids: metabolism and cell signaling // Biochemistry of Lipids, Lipoproteins and Membranes (4th Ed.) / Eds D.E. Vance, J.E. Vance. Elsevier, 2002. P. 373–407.
 24. Slotte J.P., Ramstedt B. The functional role of sphingomyelin in cell membranes // Eur. J. Lipid Sci. Technol. 2007. V. 109. P. 977–981. <https://doi.org/10.1002/ejlt.200700024>
 25. Геннис Р. Биомембраны: Молекулярная структура и функцию. М.: Мир, 1997. 624 с. [Gennis R. Biomembranes. Molecular Structure and Function. Moscow: Mir, 1997 (Russ. Vers.)]

26. Торховская Т.И., Инатова О.М., Захарова Т.С. и др. Клеточные рецепторы к лизофосфолипидам как промоторы сигнальных эффектов. Биохимия. 2007. Т. 72. № 2. С. 149–157 [Torkhovskaya T.I., Inatova O.M., Zakharova T.S. et al. // 2007. V. 72. № 2. P. 149–157 (In Russ.)]
27. Климович М.А., Козлов М.В., Шишкина Л.Н. Изменение показателей липидов печени мышей спустя месяц после воздействия на организм низкоинтенсивного рентгеновского излучения в малых дозах переменной мощности // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т. 52. № 1. С. 58–65. [Klimovich M.A., Kozlov M.V., Shishkina L.N., Change of the Lipid Parameters in the Murine Liver During One Month after Low Intensity X-Ray Exposure at Low Doses // Radiat. biologiya. Radioekologiya. 2012. V. 52. № 1. P. 58–65. (In Russ.)]
28. Шевченко О.Г., Шишкина Л.Н., Кудяшева А.Г. Влияние популяционных факторов на состав фосфолипидов различных тканей полевки-экономки *Microtus oeconomus* природных популяций // Журн. эволюц. биохимии и физиологии. 2002. Т. 38. № 2. С. 131–135 [Shevchenko O.G., Shishkina L.N., Kudyasheva A.G. Zh. Evoluts. Biochim. Fiziol. V. 38. № 2. P. 131–135 (In Russ.)]

Minor Fractions of Phospholipids in Mechanism of the Wild Rodent Adaptation to Increased Radiation Phone

L. N. Shishkina^{a, #} and A. G. Kudyasheva^b

^a Emanuel Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^b FRC Komi SC of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Syktyvkar, Russia

[#] E-mail: shishkina@sky.chph.ras.ru

The participant of the minor fractions of the liver phospholipids in the mechanism of adaptation for four species of wild rodents caught in the different years in the Chernobyl accident zone at the areas with level of the dose rate of the external γ -irradiation from 0.02 to 200 mR/h in 1987 is studied in dependence on the radioresistance of species. At first year after accident the growth of the lysoforms of phospholipids share and sphingomyelin involved in the apoptosis process and the increase of cardiolipin taking part in the interaction of DNA with membrane is revealed. During 5 years after the accident there is the increase of the sum share of phosphatidylinositol and phosphatidylserine taking part in the calcium ion transport and in regulation of the inner cell processes. Data obtained and analysis of literature allow us to conclude that the change of proportion of the minor fractions of phospholipids in liver of the wild rodents living at areas with the increased radiation level causing the adaptive reorganizations in the cell metabolism are the base for formation of the new subpopulations in these territories having the lipid peroxidation regulatory system different from norm.

Keywords: Accident zone on the Chernobyl NPP, *Microtus oeconomus* Pall., *Apodemus agrarius* Pall., *Clethrionomys glareolus* Schreb., *Apodemus arvalis* Pall., lipid peroxidation, phospholipid composition, liver, regulation

УДК 582.683.2:581.14:57.084.1:539.1.047

КИНЕТИКА ПРОРАСТАНИЯ СЕМЯН КАК ИНФОРМАТИВНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ АБК-МУТАНТНЫХ ЛИНИЙ *Arabidopsis thaliana*)

© 2023 г. Е. В. Бондаренко^{1,*}, Д. Д. Бабина¹, М. Ю. Подобед¹, А. С. Мицень¹, П. Ю. Волкова¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

*E-mail: bev_1408@mail.ru

Поступила в редакцию 01.07.2022 г.

После доработки 14.12.2022 г.

Принята к публикации 21.12.2022 г.

Проведен анализ динамики прорастания семян модельного растения *Arabidopsis thaliana* после воздействия γ -излучения в дозах 50, 100 и 150 Гр. Объектами исследования выбраны линии: *abi3-8* с мутацией в гене *ABI3* и со сниженной чувствительностью к природной форме абсцизовой кислоты и генотип *aba3-1* с мутацией в гене *ABA3* и пониженным уровнем эндогенной абсцизовой кислоты. В качестве контроля использован дикий тип Col-8. Для изучения влияния γ -излучения на различные аспекты прорастания семян (всхожесть, время и скорость прорастания, синхронность прорастания партии семян) проведена оценка кинетики прорастания при помощи пакета Germinationmetrics для среды программирования R. Контрольные и облученные семена (источник излучения — ⁶⁰Co) выращивали на питательной среде Мурасиге–Скуга половинной концентрации в контролируемых условиях. Прорастание оценивали в течение первых 6 сут после переноса в фитотрон по разрыву эндосперма и появлению корешка. Всего проведены три независимых эксперимента с тремя биологическими повторностями в каждом. Отмечено более выраженное влияние γ -излучения в дозе 150 Гр на все исследуемые генотипы. Кластеризация всхожести показала, что распределение процента прорастания семян по дням больше зависит от генотипа, чем от дозы воздействия. Лучшие показатели всхожести, скорости и временного интервала между прорастанием 10 и 90% семян отмечены у необлученных семян линии *abi3-8*. Полученные результаты и сравнительный анализ с ранее опубликованными данными позволяют утверждать, что оценка кинетики прорастания при помощи пакета Germinationmetrics для R — наглядный и достаточно информативный инструмент для изучения влияния ионизирующего излучения и иных абиотических факторов на различные аспекты прорастания семян.

Ключевые слова: *Arabidopsis thaliana*, кинетика прорастания, γ -излучение, абсцизовая кислота

DOI: 10.31857/S0869803123020030, **EDN:** EOKPNW

Выход из стадии покоя и прорастание семян являются одним из ключевых и, в то же время, хрупких этапов в жизненном цикле растений и определяет начало роста растений в естественных или сельскохозяйственных экосистемах. Одним из основных фитогормонов, регулирующих покой семени, является абсцизовая кислота (АБК). Прорастание семян, в свою очередь, контролируется балансом АБК и гибберелловых кислот [1]. Во время развития семян АБК контролирует поздние стадии созревания зародыша и устойчивость к десикации с помощью семейства факторов транскрипции с доменом B3, в том числе *ABSCISIC ACID INSENSITIVE 3 (ABI3, AT3G24650)* [2]. *ABI3* кодирует ДНК-связывающий белок, являющийся важным компонентом передачи сигналов АБК

и регулятором перехода от стадии зародыша к ранним этапам развития проростков [3].

АБК участвует в ответе семени, прошедшего стратификацию, на водный стресс. В условиях дефицита воды прорастающий зародыш проходит АБК-опосредованную контрольную точку развития, которая перезапускает программы позднего эмбриогенеза, и его дальнейшее превращение в автотрофный проросток блокируется. Зародыши, прорастание которых заблокировано, остаются жизнеспособными, но находятся в состоянии покоя и осмотолерантности, пока в их клетках присутствует АБК [4].

Синтез АБК начинается в пластидах из ксантофиллов и после серии последовательных превращений предшественник АБК выходит в цито-

плазму, где превращается в абсцизовый альдегид. Ключевым компонентом последнего этапа биосинтеза АБК является сульфураса молибденового кофактора (*Мосо*-сульфураза, альдегид-оксидаза), кодируемая геном *ABA3 (AT1G16540)* [5]. *Мосо*-сульфураза регулирует превращение абсцизового альдегида в АБК и участвует во множестве биологических процессов, таких как активируемый ауксином сигнальный путь, движение устьиц, защитная реакция на бактериальные инфекции, реакция на абиотический стресс (холод, тепло, осмотический стресс) [6–8].

Кроме контроля прорастания семян АБК также участвует в вегетативном развитии растений, стимулируя рост при низких концентрациях и подавляя его при высоких [9]. При этом одной из ключевых функций АБК является не только участие в процессах роста и развития растений, но и контроль внутриклеточного ответа на воздействие разнообразных стрессоров, включая ионизирующее излучение [10]. В рамках исследования эффектов хронического радиационного воздействия в популяциях *Pinus sylvestris*, расположенных на территориях, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС, был проведен анализ транскриптома хвои *P. sylvestris* методом высокопроизводительного секвенирования РНК и выявлены дифференциально экспрессирующиеся гены, общие для загрязненных радионуклидами популяций: Масаны, Кулажин и Заборье Кладбище [11]. Из пяти выявленных генов с пониженной экспрессией четыре были связаны с ответом на стресс: транскрипт анионной пероксидазы, вовлеченный в апоптоз, и три транскрипта, связанные с сигналингом абсцизовой кислоты (АБК) — *CIPKK_ARATH*, *CIPKA_ARATH* и *SLAC1_ARATH* [11]. Концентрации АБК, как ингибитора прорастания семян [12], снижались в проростках ячменя после облучения семян в стимулирующих малых дозах γ -излучения [13].

Учитывая роль АБК в прорастании семени и в ответе растения на стресс, кинетика прорастания семян АБК-мутантов представляется информативным параметром для оценки воздействия стрессовых факторов на раннем этапе жизненного цикла растений. Цель данной работы заключалась в изучении влияния γ -излучения на различные аспекты прорастания семян при помощи пакета *Germinationmetrics* (версия 0.1.3 [14]) для среды программирования R (версия 3.6.3 [15]).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Объект исследования

Для изучения динамики прорастания семян *Arabidopsis thaliana* после γ -облучения в дозах 50, 100 и 150 Гр объектами исследования выбраны

линии, мутантные по генам, связанным с АБК-сигналингом: *abi3-8* маловосприимчивая к природной форме S-(+)-АБК, содержит мутацию в гене *ABI3*, что препятствует S-(+)-АБК-опосредованному сигналингу [16]; *aba3-1*, с нарушением синтеза АБК, содержит рецессивную мутацию гена *ABA3*, кодирующего *Мосо*-сульфуразу [17]. Экотип Col-8 был использован в качестве контроля. Семена были получены из коллекции Института Жан-Пьера Буржена (Национальный институт сельскохозяйственных исследований, Версаль, Франция).

Облучение и проращивание семян *A. thaliana*

Семена дикого типа и мутантных линий подвергали воздействию γ -излучения на уникальной научной установке ГУР-120 (Россия) в ФГБНУ ВНИИРАЭ (источник излучения — ^{60}Co) в бумажных пакетах. Дозы острого облучения составили 50, 100 и 150 Гр при мощности дозы 460 Гр/ч.

Семена выращивали на питательной среде Мурасиге—Скуга половинной концентрации, содержащей растворы макро- и микроэлементов, хелат железа, агар-агар и MES буфер с добавлением 0.3% сахарозы. После облучения семена помещали в холодильник (+4°C) на 48 ч для стратификации, после чего их переносили в фитотрон (+21°C, 55% влажности и плотности фотосинтетического фотонного потока 80 мкмоль/с м²) для индукции прорастания.

Всхожесть семян оценивали в течение первых 6 сут после переноса в фитотрон по разрыву эндосперма и появлению корешка.

Всего проведены три независимых эксперимента с тремя биологическими повторностями в каждом. Одна биологическая повторность одного эксперимента состояла из 20–36 семян каждой исследуемой линии (Col-8, *abi3-8*, *aba3-1*) на дозу. Итого использованы около 1000 семян каждой линии.

Расчет показателей прорастания

Для вычисления показателей (всхожесть, время и скорость прорастания), необходимых для построения кривой прорастания семян, в *Germinationmetrics* используется четырехпараметрическая функция Хилла [18], описываемая следующей формулой:

$$f(x) = y = y_0 + (ax^b / (x^b + c^b)),$$

где x — время (в днях); y_0 (y intercept) — отрезок, отсекаемый на оси y (интерсепт), позволяет оценить время начала прорастания (lag); a (asymptote , %) — асимптота, эквивалент процента всхожести; b ($\text{shape and steepness}$, условные единицы) — показатель скорости прорастания, определяющий форму и крутизну кривой прорастания; c (half-

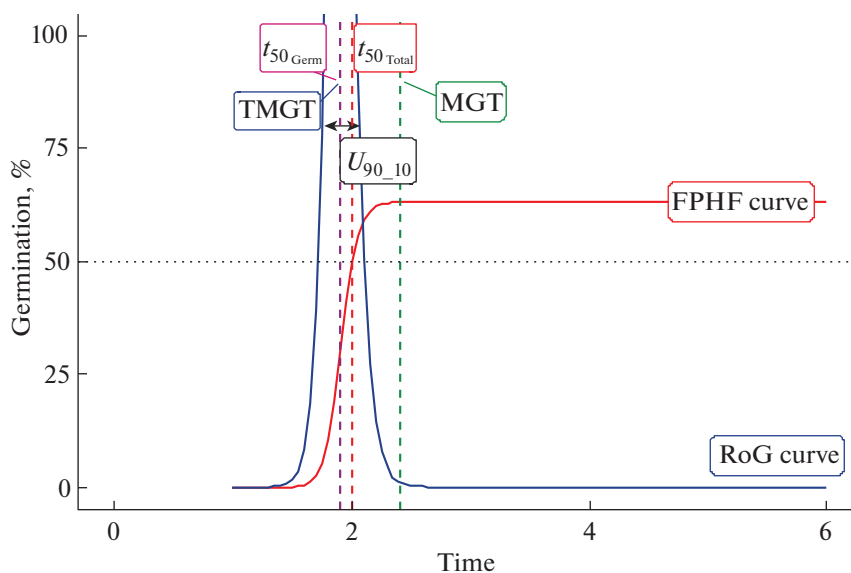


Рис. 1. Кривая прорастания семян генотипа Col-8. Вертикальная ось — всхожесть, %; горизонтальная ось — время, дни. *FPHF curve* — кривая прорастания, основанная на четырехпараметрической функции Хилла; *RoG curve* — кривая скорости прорастания; *TMGR* — время максимальной скорости прорастания; $t_{50,germ}$ — вертикальная линия, указывающая время, необходимое для прорастания 50% жизнеспособных семян; $t_{50,total}$ — вертикальная линия, указывающая время, необходимое для прорастания 50% семян, уложенных на субстрат; *MGT* — вертикальная линия, указывающая среднее время прорастания; U_{90-10} — горизонтальная линия, показывающая временной интервал между прорастанием 10 и 90% семян.

Fig. 1. Seed germination curve of Col-8 genotype. The vertical axis — germination, %; the horizontal axis — time, days. *FPHF curve* — germination curve based on the four-parameter Hill function; *RoG curve* — germination rate curve; *TMGR* is the time of maximum germination rate; $t_{50,germ}$ — vertical line indicating the time required for germination of 50% of viable seeds; $t_{50,total}$ — a vertical line indicating the time required for the germination of 50% of the seeds sown on the substrate; *MGT* is a vertical line indicating the average germination time; U_{90-10} is a horizontal line showing the time interval between the germination of 10 and 90% of seeds.

maximal activation level, дни^{-1}) — полумаксимальный уровень активации; отражает скорость прорастания 50% жизнеспособных (проросших) семян.

Кривые прорастания семян, построенные с помощью четырехпараметрической функции Хилла, основаны на медианных значениях трех повторностей каждого экспериментального условия в трех независимых экспериментах.

Статистический анализ

Для статистического анализа экспериментальных данных и визуализации полученных результатов использовали набор пакетов *tidyverse*, *rstatix* и *Hmisc* для R. Для изучения связи между показателями прорастания использовалась непараметрическая ранговая корреляция Спирмена. Статистическая значимость различий принималась при уровне $p \leq 0.05$. Для построения иерархической кластеризации использовали библиотеки *pandas* и *seaborn* языка программирования Python 3.8.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Для построения кривой прорастания семян использовалась четырехпараметрическая функция Хилла, как метод аппроксимации кривой

[18], определяющая всхожесть, время и скорость прорастания. Пример кривой прорастания семян представленных на рис. 1. Кривые прорастания контрольных и γ -облученных семян *A. thaliana* дикого типа (Col-8) и линий с нарушениями синтеза (*aba3-1*) и рецепции (*abi3-8*) АБК наглядно представлены на рис. 2. Количественные параметры кривых прорастания даны в табл. 1.

Кроме основных четырех показателей (y_0 , a , b , c), функция рассчитывает и другие параметры, в том числе: *TMGR* (time at maximum germination rate) — время максимальной скорости прорастания — временная точка, после которой мгновенная скорость прорастания (instantaneous rate of germination) снижается; U_{90-10} (uniformity) — временной интервал между прорастанием 10 и 90% семян (табл. 1).

Из необлученных семян максимальное значение асимптоты a , т.е. всхожести, отмечено у линии *abi3-8* ($a = 93.05\%$). У контрольных семян этого же генотипа зарегистрированы самые высокие значения скорости прорастания 50% жизнеспособных семян и максимальной скорости прорастания ($c = 1.64 \text{ дней}^{-1}$, $TMGR = 1.61 \text{ дней}$), а также самый крутой подъем к асимптоте ($b = 10.71$). Линия *abi3-8* характеризуется самым коротким

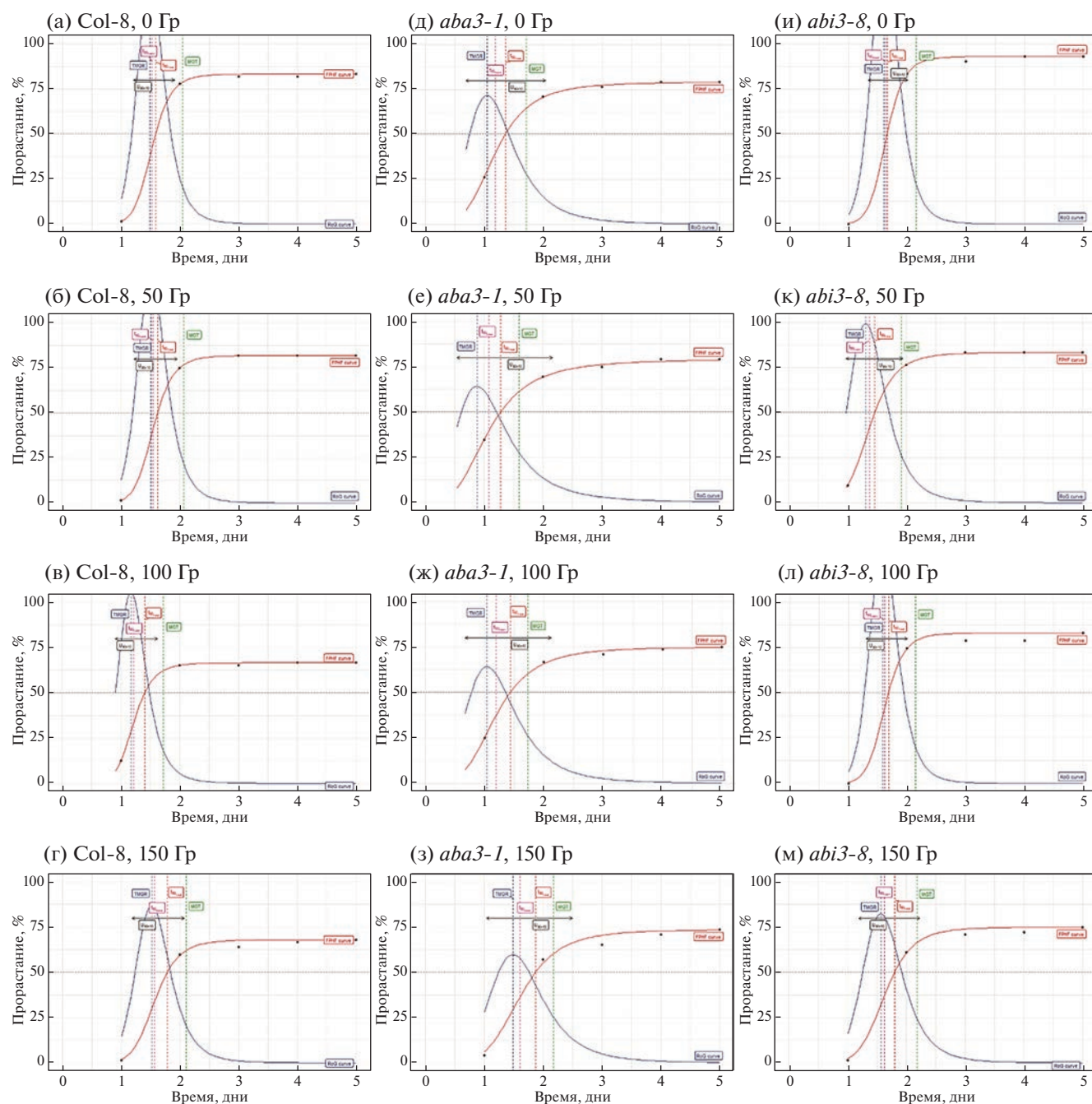


Рис. 2. Кумулятивные кривые прорастания необлученных и γ -облученных семян Col-8 (дикий тип), *aba3-1* (АБК-дефицитная линия), *abi3-8* (линия с нарушениями восприимчивости к АБК). Вертикальная ось — прорастание, %; горизонтальная ось — время, дни. Красная кривая основана на четырехпараметрической функции Хилла и описывает прорастание; синяя кривая — кривая скорости прорастания.

Fig. 2. Cumulative germination curves of non-irradiated and γ -irradiated seeds Col-8 (wild type), *aba3-1* (ABA-deficient line), *abi3-8* (line with impaired susceptibility to ABA). The vertical axis is germination, %; the horizontal axis is time, days. The red curve is based on the four-parameter Hill function and describes the germination; blue curve — germination rate curve.

временным интервалом между прорастанием 10 и 90% семян ($U_{90-10} = 0.68$ дней у необлученных семян).

Влияние ионизирующего излучения было более выражено для дикого типа Col-8 и АБК-дефицит-

ного генотипа (*aba3-1*). Самая низкая всхожесть наблюдалась у облученных в дозе 100 Гр семян Col-8 ($a = 66.67\%$). У семян *aba3-1*, облученных в дозе 50 Гр, отмечены минимальные значения крутизны кривой прорастания ($b = 3.17$), скоро-

сти прорастания 50% жизнеспособных семян ($c = 1.08$ дней⁻¹) и времени максимальной скорости прорастания ($TMGR = 0.88$). Самое высокое значение временного интервала между прорастанием 10 и 90% семян также обнаружено у облученных в дозе 50 Гр семян линии *aba3-1* ($U_{90-10} = 1.62$ дня).

С помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена (рис. 3) была выявлена статистически значимая отрицательная корреляция между параметрами b и U_{90-10} ($\rho = -0.97$), $TMGR$ и U_{90-10} ($\rho = -0.66$) и между c и U_{90-10} ($\rho = -0.55$). Сильная статистически значимая положительная корреляция обнаружена между c и $TMGR$ ($\rho = 0.97$).

Пик прорастания семян линии с нехваткой эндогенной АБК *aba3-1* пришелся на 1-й и 2-й дни. Для семян дикого типа Col-8 и линии *abi3-8* наивысшие значения процента прорастания зафиксированы во 2-й день (рис. 4). В целом иерархическая кластеризация всхожести показала, что распределение процента прорастания семян по дням больше зависит от генотипа, чем от дозы воздействия. γ -Облучение в дозе 150 Гр, однако, позволило выделить исследуемые генотипы в отдельный подкластер, что наглядно представлено на рис. 4.

ОБСУЖДЕНИЕ

Биологическая интерпретация динамики прорастания семян на основе кумулятивных кривых прорастания, построенных при помощи 4-параметрической функции Хилла

В практике семенного контроля для определения посевных качеств семян, т.е. совокупности свойств семян, характеризующих степень их пригодности для посева, используются показатели лабораторной всхожести и энергии прорастания [19]. Всхожесть — способность семян образовывать нормально развитые проростки [20] — рассчитывается как доля проросших семян (в %) за определенный срок (в основном, 7–10 дней) от числа заложенных на проращивание. Энергию прорастания (в %) — способность семян быстро и дружно прорасти [20] — вычисляют на конкретный день прорастания, определенный для каждого вида растений и указанный в ГОСТ 12038-84 [19]. Упомянутые два параметра свидетельствуют о способности семян прорасти за определенный срок при благоприятных для данной культуры условиях субстрата, температуры и влажности, однако они недостаточно информативны для оценки влияния абиотических факторов на прорастание и определения потенциальной стрессоустойчивости растений.

Было предпринято несколько попыток упростить определение параметров прорастания семян путем объединения различных показателей в

Таблица 1. Параметры кривой прорастания контрольных и γ -облученных семян *A. thaliana* дикого типа (Col-8) и линий с нарушениями синтеза (*aba3-1*) и рецепции (*abi3-8*) абсцизовой кислоты

Table 1. Parameters of the germination curve of control and γ -irradiated seeds of *A. thaliana* wild type (Col-8) and lines with impaired synthesis (*aba3-1*) and reception (*abi3-8*) of abscisic acid

Генотип	Доза γ -облучения, Гр	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>TMGR</i>	<i>U</i> _{90–10}
Col-8	0	83.33	9.60	1.52	1.49	0.70
	50	81.94	9.30	1.55	1.51	0.74
	100	66.67	7.57	1.21	1.17	0.72
	150	75.00	7.53	1.52	1.47	0.90
<i>aba3-1</i>	0	79.17	4.04	1.19	1.05	1.36
	50	79.17	3.17	1.08	0.88	1.62
	100	75.00	3.82	1.20	1.04	1.45
	150	73.61	5.04	1.61	1.49	1.45
<i>abi3-8</i>	0	93.05	10.71	1.64	1.61	0.68
	50	83.33	6.40	1.37	1.31	0.96
	100	83.10	10.11	1.62	1.58	0.71
	150	75.00	7.02	1.63	1.56	1.04

Примечание. Параметры рассчитаны на основе медианных значений трех повторностей каждого экспериментального условия в трех независимых экспериментах. Минимальные значения параметра указаны курсивом, максимальные — полужирным шрифтом.

единый индекс или значение [18, 21]. Однако сведение нескольких параметров прорастания к одному показателю дает неполную картину динамики прорастания. Четыре параметра функции Хилла позволяют как прямую, так и косвенную биологическую интерпретацию динамики прорастания семян и влияния предварительной обработки семян на прорастание [18].

Форма и крутизна кривой прорастания контролируются параметром b . Чем больше b , тем круче подъем к асимптоте a и тем короче время между началом прорастания и максимальным прорастанием. El-Kassaby et al., анализируя кривые прорастания стратифицированных и нестратифицированных семян сосны скрученной широкохвойной (*P. contorta*) показали, что параметр b кривой прорастания стратифицированных семян не коррелировал с их всхожестью (a), что указывает на то, что крутизна кривой прорастания не связана с более высокой всхожестью [18]. В наших экспериментальных данных также наблюда-

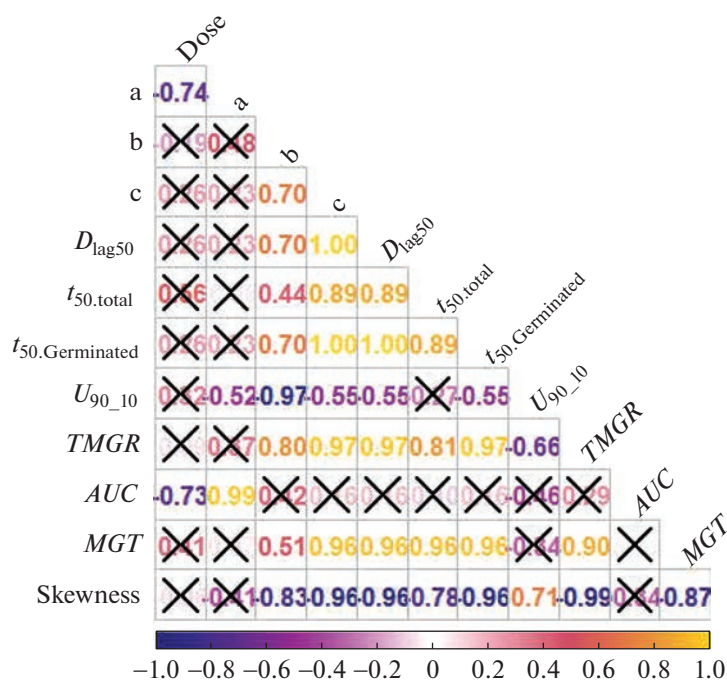


Рис. 3. Корреляционная матрица на основе расчетных показателей функции Хилла. Статистически незначимые значения перечеркнуты (X). Dose — доза (0, 50, 100, 150 Гр); *a* — асимптота; *b* — показатель скорости прорастания, определяющий форму и крутизну кривой прорастания; *c* — полумаксимальный уровень активации; D_{lag50} — продолжительность времени между началом прорастания и прорастанием 50% жизнеспособных семян; $t_{50.total}$ — прорастание 50% семян, уложенных на субстрат; $t_{50.Germinated}$ — прорастание 50% жизнеспособных семян; *TMGR* — время максимальной скорости прорастания; U_{90_10} — временной интервал между прорастанием 10 и 90% семян; *AUC* — площадь под эмпирической кривой; *MGT* — среднее прорастание; *Skewness* — коэффициент асимметрии.

Fig. 3. Correlation matrix based on the calculated parameters of the Hill function. Statistically insignificant values are crossed out (X). Dose — dose (0, 50, 100, 150 Gy); *a* — asymptote; *b* — shape and steepness of the germination curve; *c* — the half-maximal activation level; D_{lag50} — the duration between the time at germination onset and that at 50% germination; $t_{50.total}$ — germination of 50% of the seeds laid on the substrate; $t_{50.Germinated}$ — germination of 50% of viable seeds; *TMGR* is the time of maximum germination rate; U_{90_10} — time interval between germination of 10 and 90% of seeds; *AUC* is the area under the empirical curve; *MGT* — medium germination; *Skewness* — coefficient of skewness.

ется отсутствие значимой корреляции между параметрами *a* и *b*. Оценка коэффициента ранговой корреляции Спирмена, однако, выявила высокую отрицательную корреляцию между параметрами *b* и U_{90_10} ($\rho = -0.97$, $p \leq 0.05$). Таким образом, чем выше *b* и круче подъем кривой, тем меньше промежуток времени между прорастанием 10 и 90% семян и соответственно тем более однородно прорастание.

Полумаксимальный уровень активации *c* является эквивалентом параметра скорости прорастания [R50'], предложенного [22]. Продолжительность времени между началом прорастания и прорастанием 50% жизнеспособных семян *c* определено параметром D_{lag-50} , являющимся эффективным индикатором скорости прорастания, равномерности и энергии прорастания. Чем выше значение D_{lag-50} , тем быстрее и равномернее прорастание и круче кривая прорастания (т.е. выше значение *b*) [18]. D_{lag-50} и *b*, таким образом, яв-

ляются положительно коррелирующими параметрами (рис. 3).

TMGR — время максимальной скорости прорастания, т.е. временная точка, после которой мгновенная скорость прорастания (instantaneous rate of germination) снижается (максимальная точка на кривой скорости прорастания (instantaneous slope)) [14, 18]. Чем меньше времени необходимо для достижения максимальной скорости, тем выше энергия прорастания семян и короче время прорастания 50% жизнеспособных семян, т.е. выше скорость ([R50'] = *c*) [18] и соответственно меньше временной интервал, необходимый для прорастания 10–90% семян. Таким образом, были ожидаемы положительная корреляция между полумаксимальным уровнем активации *c* и *TMGR*, и отрицательная — между *TMGR* и U_{90_10} (рис. 3). Примечательно, что *TMGR* отличается от величины пика (Czabator's peak value, PV), которое представляет собой максимальное частное, полученное путем деления последовательных ку-

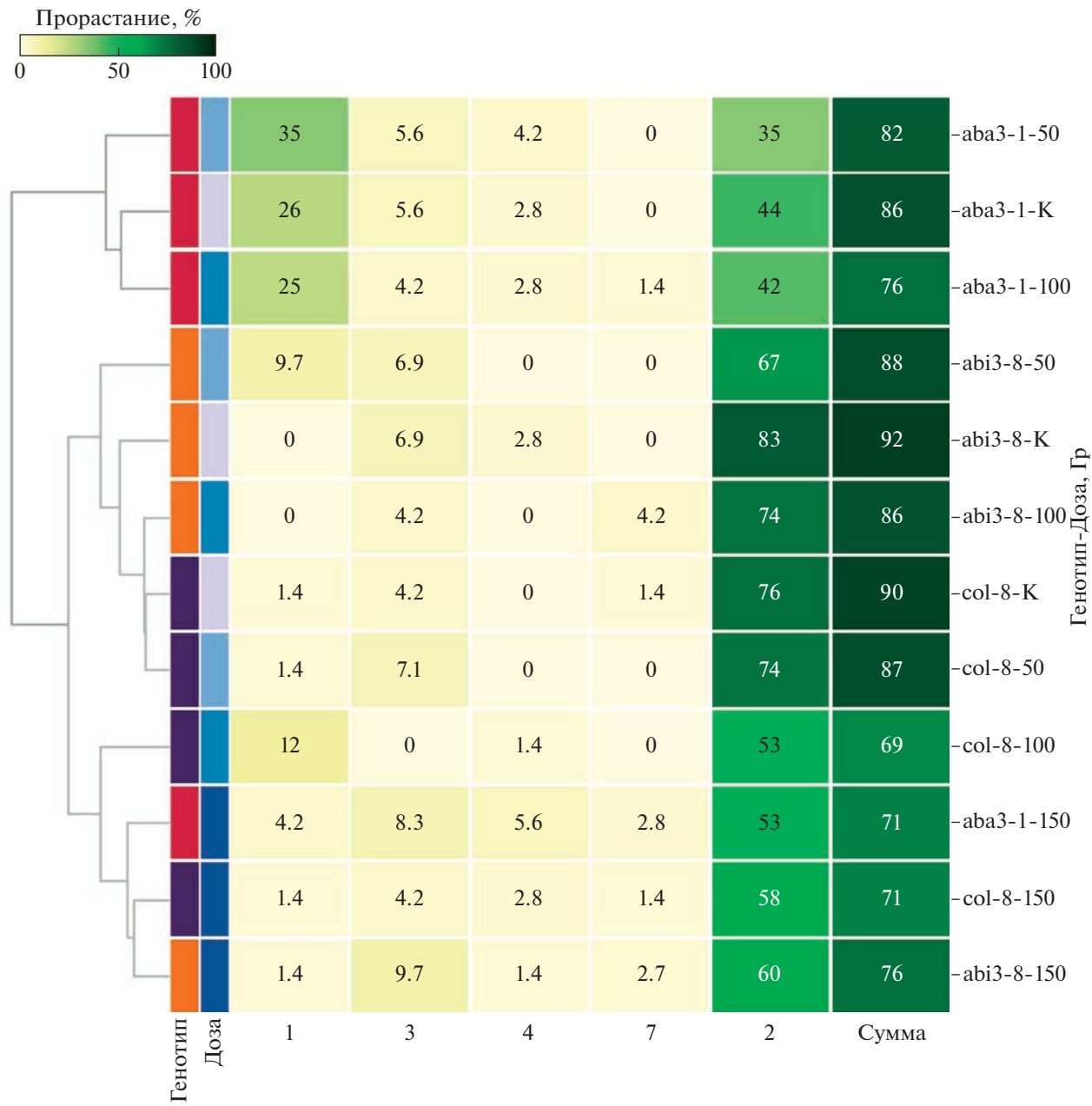


Рис. 4. Кластеризация всхожести, выраженной в процентах по дням с цветовым распределением по дозе (К — необлученный контроль, 50, 100, 150 Гр) и генотипу, необлученных и γ -облученных семян Col-8 (дикий тип), *aba3-1* (АБК-дефицитная линия), *abi3-8* (линия с нарушениями восприимчивости к АБК).

Fig. 4. Clustering of germination, expressed as a percentage by day, with color distribution by dose (0 — non-irradiated control, irradiated at doses 50, 100 or 150 Gy) and genotype of Col-8 (wild type), *aba3-1* (ABA-deficient line), *abi3-8* (line with impaired susceptibility to ABA).

мулятивных значений всхожести на соответствующее время инкубации [21]. Другими словами, PV — это максимальная всхожесть, деленная на общее время прорастания, тогда как TMGR представляет собой максимальную скорость прорастания в определенный момент или небольшой интервал времени, который альтернативно можно

назвать мгновенной скоростью прорастания [18]. TMGR определяет точку перегиба кривой прорастания, в то время как в определении уникальной формы и масштаба сигмовидной кривой, PV равноценно любой другой точке кривой. Таким образом, с биологической точки зрения, TMGR является более значимым параметром [18].

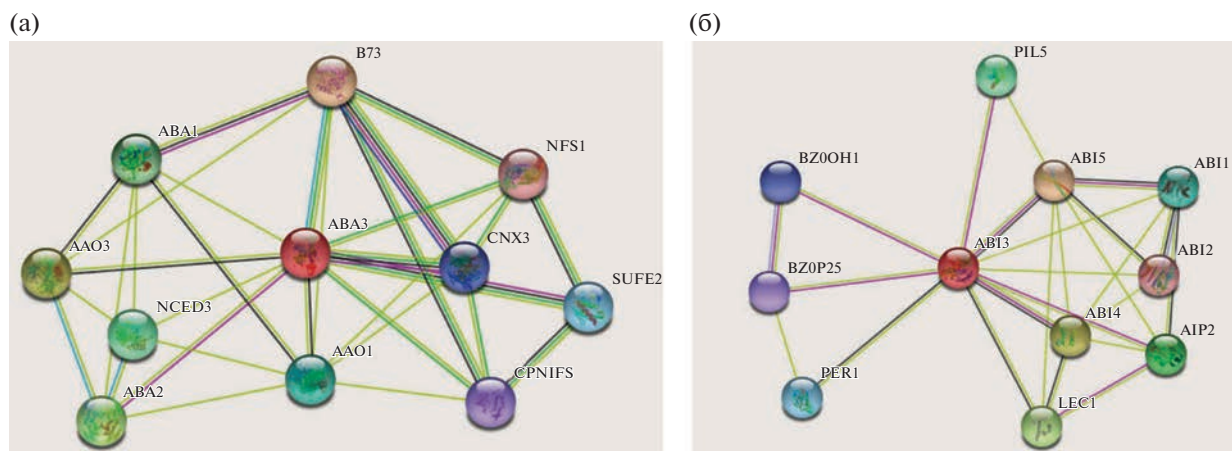


Рис. 5. Предсказанные функциональные партнеры белков (а) ABA3 и (б) ABI3 по данным функционального обогащения в программной среде STRING [31].

Fig. 5. Predicted functional partners of proteins (a) ABA3 and (b) ABI3 according to functional enrichment in the STRING software environment [31].

Прорастание семян АБК-мутантных линий

Генотип *abi3-8* содержит “слабый” *abi3* аллель и характеризуется нормальным цветом семян, в отличие от семян “сильных” аллелей (таких как *abi3-3*, *abi3-4*, *abi3-5* и *abi3-6*), которые остаются зелеными на протяжении всего развития [23]. Мутации в гене *ABI3* нарушают покой семян [4] и, при благоприятных условиях окружающей среды (свет, температура, влажность), даже свежесобранные семена прорастают. Линия *abi3-8*, маловосприимчивая к природной форме АБК, содержит аминокислотную замену в домене В1 продукта гена *ABI3* с превращением лейцина в позиции 298 в фенилаланин [16]. Эта мутация, предположительно, нарушает взаимодействие белков ABI3 и ABI5 (рис. 5), что приводит к избирательной нечувствительности к S-(+)-АБК [16]. Известны три фактора транскрипции, ингибирующие прорастание семян (PIL5, ABI3 и ABI5, рис. 5, б), которые образуют функциональный модуль, как посредством регуляции транскрипции, так и межбелкового взаимодействия [4, 24]. ABI3 и PIL5 совместно активируют экспрессию *SOMNUS* (ключевой обратный регулятор прорастания семян), напрямую связываясь с его промотором во впитавших воду семенах *A. thaliana*, тогда как PIL5 регулирует светозависимую экспрессию мРНК *SOMNUS* даже в отсутствие ABI3 [24]. Паттерн экспрессии *SOMNUS* во время созревания семян аналогичен паттерну экспрессии *ABI5* и *Em1* – двух семя-специфичных генов, также регулируемых ABI3 [24].

Ранее сообщалось, что у генотипа *abi3-8* с нарушениями S-(+)-АБК-опосредованного сигналинга не отмечено статистически значимых различий между облученными в дозах 100 и 150 Гр се-

менами и контролем, а γ -излучение в дозе 50 Гр вызвало быстрое прорастание в ранние часы [25], проявив стимулирующий эффект. В нашей работе лучшие показатели всхожести, скорости и временного интервала между прорастанием 10 и 90% семян отмечены у необлученных семян линии *abi3-8* (табл. 1).

Чан и соавт. показали, что на фоне абиотического стресса (кроме повышенной температуры и окислительного стресса) уровни транскриптов ABA3, NCED3 и AAO3 повышаются [26]. Эти три функциональных партнера (рис. 1, а) являются ключевыми ферментами в биосинтезе АБК.

Линия *aba3-1* содержит мутацию G-to-A в положении 3707 в гене *ABA3*, кодирующем Мосо-сульфуразу [27]. Учитывая роль молибден-содержащих ферментов во многих аспектах жизни растений, мутантные по *ABA3* линии демонстрируют плейотропные фенотипы [28]. Растения линии *aba3-1* характеризуются пониженными уровнями АБК в вегетативных тканях в нормальных и стрессовых условиях, которые, тем не менее, выше, чем у большинства других АБК-дефицитных мутантов (*aba1*, *aba2*) [17].

Из-за дефицита АБК семена *aba3-1* проросли быстрее семян других исследуемых генотипов (пик прорастания семян пришелся на 1-й и 2-й дни, рис. 4). Пониженный уровень АБК, вероятно, является также причиной чувствительности генотипа *aba3-1* к острому воздействию γ -излучения, которое уменьшает скорость и однородность прорастания. В ранее опубликованном анализе 22 индивидуальных параметров прорастания в идентичном эксперименте [25] показано, что γ -излучение в максимальной исследованной дозе 150 Гр отрицательно влияло на параметры, характеризу-

ющие всхожесть, время, энергию и синхронность прорастания АБК-дефицитного генотипа.

Процент прорастания или всхожесть (%), безусловно, является одним из основных параметров оценки партии семян, который, однако, не может характеризовать кинетику процесса прорастания. Даже совокупность процента прорастания и среднего времени недостаточна для описания активности прорастания партии семян в заданный период времени [29]. Период времени между прорастанием первых и последних семян, вариация скорости прорастания и время прорастания большинства семян — одни из параметров, влияющих на период внесения удобрения, сбор урожая и полевое созревание сельскохозяйственных культур, также эти параметры могут выступать показателями жизнеспособности и стрессоустойчивости семян [29].

Время, скорость, однородность и синхронность являются важными измеряемыми аспектами, информирующими о динамике процесса прорастания. Поскольку эти параметры являются характеристикой сельскохозяйственных культур, они важны для физиологов, семеноводов, экологов, агрономов [30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Кривые прорастания семян, построенные с помощью четырехпараметрической функции Хилла из пакета *Germinationmetrics* в среде программирования R, являются наглядным инструментом для анализа динамики процесса прорастания партии семян, который может быть использован для оценки кинетики прорастания семян после стимулирующего или угнетающего воздействия ионизирующего излучения и других абиотических факторов на различные аспекты прорастания семян, и, как следствие, для оценки стрессоустойчивости генотипа.

Проведенные исследования показали выраженное влияние γ -излучения в дозе 150 Гр на семена всех исследуемых генотипов, выделив при анализе иерархической кластеризации эту дозу в отдельный подкластер.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования проведены в рамках Государственного задания “Фундаментальные генетические и биотехнологические исследования для сельского хозяйства” по Программе деятельности ФГБУ “Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Verma V., Ravindran P., Kumar P. Plant hormone-mediated regulation of stress responses // BMC Plant Biol. 2016. V. 16. Art. 86. <https://doi.org/10.1186/s12870-016-0771-y>
2. Finkelstein R., Reeves W., Ariizumi T. et al. Molecular aspects of seed dormancy // Ann. Rev. Plant Biol. 2008. V. 59. № 1. P. 387–415. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092740>
3. Nambara E., Nambara E., McCourt P. et al. A regulatory role for the ABI3 gene in the establishment of embryo maturation in *Arabidopsis thaliana* // Development. 1995. V. 121. № 3. P. 629–636. <https://doi.org/10.1242/dev.121.3.629>
4. Lopez-Molina L., Mongrand S., McLachlin D.T. et al. ABI5 acts downstream of ABI3 to execute an ABA-dependent growth arrest during germination // Plant J. 2002. V. 32. № 3. P. 317–328. <https://doi.org/10.1046/j.1365-313x.2002.01430.x>
5. Watanabe S., Sato M., Sawada Y. et al. Arabidopsis molybdenum cofactor sulfurase ABA3 contributes to anthocyanin accumulation and oxidative stress tolerance in ABA-dependent and independent ways // Sci. Rep. 2018. V. 8. P. 16592. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-34862-1>
6. Eckert M., Kaldenhoff R. Light-induced stomatal movement of selected *Arabidopsis thaliana* mutants // J. Experim. Bot. 2000. V. 51. № 49. P. 1435–1442. <https://doi.org/10.1093/jexbot/51.349.1435>
7. Xiong L., Ishitani M., Lee H. et al. The Arabidopsis LOS5/ABA3 Locus Encodes a Molybdenum Cofactor Sulfurase and Modulates Cold Stress- and Osmotic Stress-Responsive Gene Expression // Plant Cell. 2001. V. 13. № 9. P. 2063–2083. <https://doi.org/10.2307/3871428>
8. Llorente F., Oliveros J.C., Martinez-Zapater J.M. et al. A freezing-sensitive mutant of Arabidopsis, frs1, is a new aba3 allele // Planta. 2000. V. 211. № 5. P. 648–655. <https://doi.org/10.1007/s004250000340>
9. Barrero J.M., Piqueras P., Gonzalez-Guzmán M. et al. A mutational analysis of the ABA1 gene of *Arabidopsis thaliana* highlights the involvement of ABA in vegetative development // J. Exp. Bot. 2005. V. 56. № 418. P. 2071–2083. <https://doi.org/10.1093/jxb/eri206>
10. Nakashima K., Yamaguchi-Shinozaki K. ABA signaling in stress-response and seed development // Plant Cell Rep. 2013. V. 32. № 7. P. 959–970. <https://doi.org/10.1007/s00299-013-1418-1>
11. Duarte G.T., Volkova P., Geras'kin S. The response profile to chronic radiation exposure based on the transcriptome analysis of Scots pine from Chernobyl affected zone // Environ. Pollut. 2019. V. 250. P. 618–626. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.04.064>
12. Cutler S.R., Rodriguez P.L., Finkelstein R.R. et al. Abscissic acid: emergence of a core signaling network // Ann. Rev. Plant Biol. 2010. V. 61. № 1. P. 651–679. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112122>
13. Bitarishvili S.V., Volkova P.Y. & Geras'kin S.A. γ -Irradiation of Barley Seeds and Its Effect on the Phytohor-

- monal Status of Seedlings // Russ. J. Plant Physiol. 2018. V. 65. P. 446–454.
https://doi.org/10.1134/S1021443718020024
14. Aravind J., Vimala D.S., Radhamani J. et al. Germinationmetrics: Seed Germination Indices and Curve Fitting. R package version 0.1.3. 2019. Available at: <https://github.com/aravind-j/germinationmetrics><https://cran.r-project.org/package=germinationmetrics>. Accessed May 25, 2021.
 15. R Core Team, 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available at: <https://www.R-project.org/>. Accessed May 25, 2021.
 16. Nambara E., Suzuki M., Abrams S. et al. A screen for genes that function in abscisic acid signalling in *Arabidopsis thaliana* // Genetics. 2002. V. 161. № 3. P. 1247–1255.
https://doi.org/10.1093/genetics/161.3.1247
 17. Leon-Kloosterziel K.M., Gil M.A., Ruijs G.J. et al. Isolation and characterization of abscisic acid-deficient *Arabidopsis* mutants at two new loci // Plant J. 1996. V. 10. № 4. P. 655–661.
https://doi.org/10.1046/j.1365-313X.1996.10040655.x
 18. El-Kassaby Y.A., Moss I., Kolotelo D. et al. Seed germination: Mathematical representation and parameters extraction // Forest Sci. 2008. V. 54. P. 220–227.
https://doi.org/10.1093/forestscience/54.2.220
 19. ГОСТ 12038-84. Межгосударственный стандарт. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести (с Изменениями N 1, 2). [GOST 12038-84. Agricultural seeds. Methods for determination of germination (In Russ.)]
 20. ГОСТ 20290-74. Семена сельскохозяйственных культур. Определение посевных качеств семян. Термины и определения. [GOST 20290-74. Seeds of crops. Determination of seed sowing quality. Terms and definitions (In Russ.)]
 21. Czabator F.J. Germination value: An index combining speed and completeness of pine seed germination // Forest Sci. 1962. V. 8. P. 386–396.
 22. Thomson A., El-Kassaby Y. Interpretation of seed-germination parameters // New Forests. 1993. V. 7. P. 123–132.
https://doi.org/10.1007/BF00034195
 23. Nambara E., Naito S., McCourt P. A mutant of *Arabidopsis* which is defective in seed development and storage protein accumulation is a new *abi3* allele // Plant J. 1992. V. 2. № 4. P. 435–441.
https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.1992.00435.x
 24. Park J., Lee N., Kim W. et al. ABI3 and PIL5 collaboratively activate the expression of SOMNUS by directly binding to its promoter in imbibed *Arabidopsis* seeds // Plant Cell. 2011. V. 23. № 4. P. 1404–1415.
https://doi.org/10.1105/tpc.110.080721
 25. Babina D., Podobed M., Bondarenko E. et al. Seed Gamma Irradiation of *Arabidopsis thaliana* ABA-Mutant Lines Alters Germination and Does Not Inhibit the Photosynthetic Efficiency of Juvenile Plants // Dose-Response. 2020. P. 1–13.
https://doi.org/10.1177/1559325820979249
 26. Chan Z. Expression profiling of ABA pathway transcripts indicates crosstalk between abiotic and biotic stress responses in *Arabidopsis* // Genomics. 2012. V. 100. P. 110–115.
https://doi.org/10.1016/j.ygeno.2012.06.004
 27. Plessis A., Cournol R., Effroy D. et al. New ABA-hypersensitive *Arabidopsis* mutants are affected in loci mediating responses to water deficit and *Dickeya dadantii* infection // PLoS One. 2011. V. 6. № 5. P. e20243.
https://doi.org/10.1371/journal.pone.0020243
 28. Schwartz S.H., Leon-Kloosterziel K.M., Koornneef M. et al. Biochemical characterization of the *aba2* and *aba3* mutants in *Arabidopsis thaliana* // Plant Physiol. 1997. V. 114. P. 161–166.
 29. Kader M. A comparison of seed germination calculation formulae and the associated interpretation of resulting data // J. & Proc. Royal Society of New South Wales. 2005. V. 138. P. 65–75.
 30. Talská R., Machalová J., Smýkal P., Hron K. A comparison of seed germination coefficients using functional regression // Appl Plant Sci. 2020. V. 8. № 8. P. e11366.
https://doi.org/10.1002/aps3.11366
 31. Szklarczyk D., Gable A.L., Lyon D. et al. STRING v11: protein-protein association networks with increased coverage, supporting functional discovery in genome-wide experimental datasets // Nucl. Acids Res. 2019. V. 47 (D1). P. D607–D613.
https://doi.org/10.1093/nar/gky1131

Seed Germination Kinetics as an Informative Tool for Assessing the Impact of Ionizing Radiation (on the Example of *Arabidopsis Thaliana* Aba-mutant Lines)

E. V. Bondarenko^{a, #}, D. D. Babina^a, M. Yu. Podobed^a, A. S. Mitsenik^a, and P. Yu. Volkova^a

^aAll-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

[#]E-mail: bev_1408@mail.ru

We have analyzed the kinetics of seed germination of the model plant *Arabidopsis thaliana* after γ -irradiation at doses of 50, 100 and 150 Gy. The following lines were selected as study objects: *abi3-8* with a mutation in the ABI3 gene and with reduced sensitivity to the natural form of abscisic acid and *aba3-1* genotype with a

mutation in the ABA3 gene and a reduced level of endogenous abscisic acid. Wild type Col-8 was used as a control. To study the effect of γ -radiation on various aspects of seed germination (germinability, germination time and rate, synchrony of germination, etc.), the germination kinetics was assessed using the Germinationmetrics package for the R programming environment. Control and irradiated seeds (radiation source – ^{60}Co) were grown on half-strength Murashige-Skoog medium under controlled conditions. Germination was assessed during the first six days after transfer to the phytotron by the rupture of the endosperm and the appearance of a root. In total, three independent experiments were carried out with three biological replications in each. A more pronounced effect of γ -radiation at a dose of 150 Gy on all studied genotypes was noted. Germination clustering showed that the distribution of the percentage of seed germination by day depends more on the genotype than on the dose of exposure. The best indicators of germination, speed and time interval between germination of 10% to 90% of seeds were noted for non-irradiated seeds of the *abi3-8* line. The results obtained and a comparative analysis with previously published data suggest that the assessment of germination kinetics using the Germinationmetrics package for R is a clear and quite informative tool for studying the effect of ionizing radiation and other abiotic factors on various aspects of seed germination.

Keywords: *Arabidopsis thaliana*, germination kinetics, γ -radiation, abscisic acid

ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОРАЖЕНИЯ ПИЩЕВАРИТЕЛЬНОГО ТРАКТА МОНОГАСТРИЧНЫХ ЖИВОТНЫХ ИНКОРПОРИРОВАННЫМИ РАДИОАКТИВНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

© 2023 г. С. Г. Шаповалов^{1,*}, Г. В. Козьмин¹

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия*

**E-mail: shapovalovstanislav93@gmail.com*

Поступила в редакцию 08.07.2022 г.

После доработки 26.11.2022 г.

Принята к публикации 21.12.2022 г.

Представлен анализ дозиметрических параметров, вызывающих язвенно-некротическое поражение желудочно-кишечного тракта моногастричных животных (крысы, морские свинки, свиньи), обусловленное перорально поступившими “горячими” радиоактивными частицами. Разработаны математические модели транспорта частиц и формирования поглощенных доз в отделах пищеварительного тракта. Приведены особенности глубинного распределения поглощенных доз в слизистой оболочке в зависимости от спектральных характеристик β -излучения радионуклидов, входящих в состав силикатных частиц. Показано, что основными факторами формирования очагов язвенного поражения пищеварительного тракта были неравномерное распределение частиц в содержимом и концентрирование частиц на отдельных участках слизистой оболочки с последующим формированием высоких локальных дозовых нагрузок. Предложена дозиметрическая шкала крайне тяжелой, тяжелой, средней и легкой степени острого радиационного язвенного гастроэнтероколита, позволяющая экстраполировать результаты модельных экспериментов на сценарии радиоактивного загрязнения окружающей среды частицами различного генезиса. Полученные результаты могут быть приняты во внимание в задачах радиационной безопасности.

Ключевые слова: горячие радиоактивные частицы, внутреннее облучение, биологическое действие, пищеварительный тракт, моногастричные животные, крысы, морские свинки, свиньи, поглощенные дозы, острый радиационный язвенный гастроэнтероколит

DOI: 10.31857/S0869803123020091, EDN: EOZZTY

Исследования биологического действия радиоактивных частиц (РЧ) различного генезиса в настоящее время являются актуальным направлением радиобиологии. Образование РЧ может происходить при радиационных авариях, ядерных взрывах, применении “грязных” бомб, вследствие радиоактивных выбросов и сбросов предприятий атомной промышленности, а также объектов производства сырья и материалов с повышенным содержанием естественных радионуклидов [1–4].

В экспериментах на сельскохозяйственных и лабораторных животных было показано, что при пероральном поступлении в организм животных одинаковых активностей продуктов ядерного деления возрастом 10–15 ч в виде растворов и труднорастворимых частиц последние отличаются более выраженным биологическим действием, специфика которого обусловлена радиационным язвенно-некротическим поражением пищеварительного тракта [5, 6]. По совокупности симптомов болезнь квалифицировали как острый радиационный язвенный гастроэнтероколит [7]. Бо-

лезнь представляла собой патологическое состояние, существенно отличающееся от описанной в литературе кишечной формы острой лучевой болезни, очаговостью язвенных поражений ЖКТ, четко выраженной периодичностью процесса и его относительно продолжительным течением.

Для сбора, обобщения и анализа информации по закономерностям поведения РЧ в природной окружающей среде, последствий вовлечения РЧ в пищевые цепочки животных и человека под эгидой МАГАТЭ в 2013–2020 гг. выполнялся специальный международный проект (Research Project “Environmental Behaviour and Potential Biological Impact of Radioactive Particles” (K41013) [8]. Отдельные вопросы последствий ингаляционного и перорального поступления радиоактивных частиц почвы, активированных нейтронами ядерного взрыва, изучались в рамках международного многоцентрового исследования в 2016–2019 гг. (Япония, Казахстан, Россия) [9, 10] в целях ретроспективной оценки радиационного воздей-

ствия на население в результате ядерного удара США по Хиросиме и Нагасаки (Япония) [11].

Целью настоящего исследования стали проведение анализа дозиметрической картины внутреннего облучения инкорпорированными “горячими” радиоактивными частицами и установление дозиметрической шкалы степеней проявления острого радиационного язвенного гастроэнтероколита у моногастричных животных (крыс, морских свинок, свиней), обладающих пищеварительным трактом, сходным по строению с ЖКТ человека, и выполняющих роль референтных организмов (грызуны [12]) в задачах оценки радиационного риска загрязнения окружающей среды радионуклидами для биоты и человека.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Объекты исследования

Изучение биологического действия “горячих” радиоактивных частиц проводили на лабораторных грызунах обоего пола — крысах породы Вистар массой 200–300 г, беспородных морских свинок массой 300–600 г, поросятах крупной белой породы, ландрасах и поросятах помесной породы (помесь крупной белой и ландраса) возрастом 2–2.5 мес. и массой от 25 до 30 кг, благополучных по инфекционным и инвазионным заболеваниям.

“Горячие” радиоактивные частицы

В экспериментах использовали силикатные оплавленные РЧ “трехкомпонентной”, “урановой” и “рениевой” моделей диаметром от 80 до 160 мкм, которые приблизительно моделировали радиационные характеристики продуктов мгновенного деления (ПМД) возрастом от 10 до 15 ч [13].

“Трехкомпонентные” модельные частицы [14] представляли собой стеклосферы, в структуру которых в определенном соотношении были вплавлены стабильные элементы: ^{164}Dy , ^{141}Pr и ^{89}Y . После облучения частиц на ядерном реакторе в потоке тепловых нейтронов получали радионуклиды ^{165}Dy (42%), ^{142}Pr (45%) и ^{90}Y (13%), моделирующие спад активности ПМД возрастом 10 ч.

Для получения радиоактивных частиц “урановой” модели [15] силикатные частицы, на поверхность которых наносили соли ^{235}U (уранил $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), активировались в потоке тепловых нейтронов. При этом осколки продуктов деления распределялись в поверхностном слое стеклосфер. Модель наиболее полно имитировала радиационные характеристики частиц локальных выпадений ядерного взрыва на силикатных почвах, но создавала сложности выполнения требований радиационной безопасности в связи с

относительно высокими уровнями γ -облучения персонала.

РЧ на основе природного рения (“рениевая” модель [16]), включающие после нейтронной активации ^{186}Re и ^{188}Re , более точно по сравнению с “трехкомпонентной” моделью имитировали спектр β -излучения ПМД возрастом более 1 сут.

Растворимость “урановых” ОРЧ в кислой и щелочной среде не превышала 5%, а “трехкомпонентных” и “рениевых” ОРЧ — не более 1–2%. Активность частиц, поступивших в ЖКТ, варьировала от 100 до 1500 МБк/кг массы тела животных. Зависимости средней энергии β -излучения и активности “трехкомпонентных”, “урановых” и “рениевых” модельных частиц от времени представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что “трехкомпонентная” и “урановая” модели близки по характеру спада активности в зависимости от времени. “Рениевая” модель демонстрирует более медленное снижение активности и использовалась для оценки поражающего действия ПМД возрастом более суток. Средняя энергия β -излучения “трехкомпонентной” модели, в отличие от РЧ “урановой” и “рениевой” моделей, возрастает с течением времени. Основным экспериментальным материалом радиобиологических исследований был получен с использованием частиц “трехкомпонентной” модели. Применение частиц этой модели позволяло оценить максимально возможные радиобиологические последствия загрязнения внешней среды ПМД в виде труднорастворимых частиц. В исследованиях биологического действия продуктов ядерного деления в виде радиоактивных частиц локальных выпадений наземного ядерного взрыва была принята концепция ведущей роли в радиационном поражении β -излучения [7, 17, 18], так как дозы внутреннего γ -облучения организма сельскохозяйственных животных при использовании “урановой” модели РЧ не превышали 10% от поглощенной дозы β -излучения в критическом отделе ЖКТ [13].

Методика “затравки” животных и исследований транспорта РЧ в ЖКТ

Специальные алюминиевые блочки с оплавленными радиоактивными частицами массой до 4 г в каждой кварцевой ампуле после транспортировки с ядерного реактора вскрывали в камере 2УКЗ с помощью манипуляторов. В опытах с грызунами радиоактивные частицы взвешивали путем барботирования в 2.5%-ном геле картофельного крахмала. Рассчитанные количества РЧ вводили внутривентрикулярно через металлический зонд с помощью шприца. Общий объем геля, содержащего РЧ, не превышал 2.5–3 мл на одно лабораторное животное. Поступление частиц в орга-

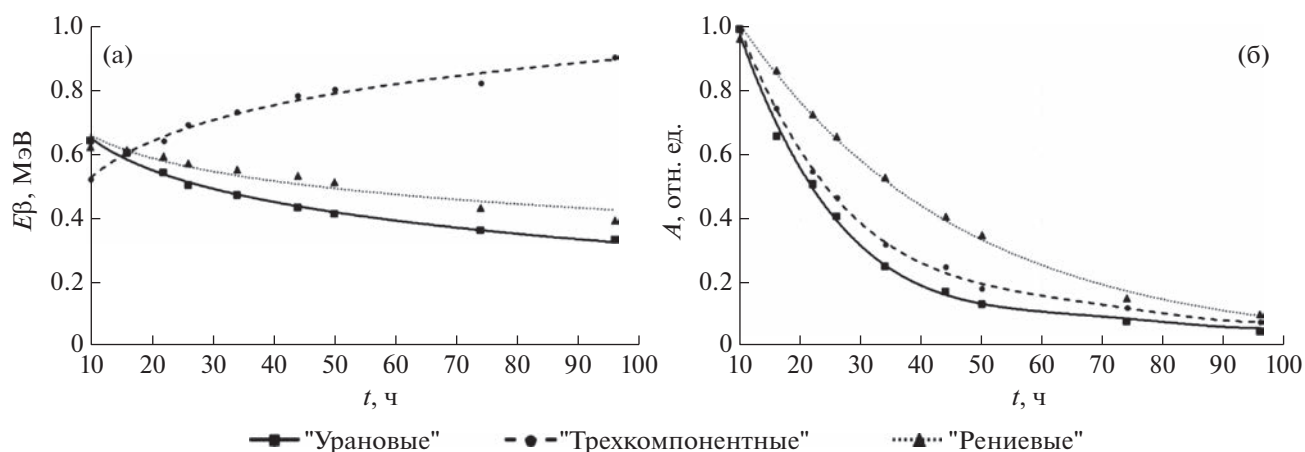


Рис. 1. Зависимости от времени средней энергии β -излучения (а) и убыли активности (б) модельных частиц [15].

Fig. 1. Dependences on the time of the average energy of β -radiation (a) and the decrease activity (b) of model particles [15].

низ крыс и морских свинок контролировали дозиметрическим прибором ДРГЗ-03 (Россия), с помощью которого проводили измерения мощности дозы γ - и тормозного излучения в области желудка до и после введения РЧ [19, 20]. В опытах на поросятах модельные ОРЧ высыпали в кормушку, содержащую 100 г комбикорма, и сверху присыпали небольшим количеством корма. После транспортировки кормушки ее устанавливали в индивидуальной обменной клетке, в которой животное находилось в период всего времени наблюдения. Потребление поросятами РЧ контролировали измерением мощности дозы от излучения кормушки до и после скармливания [21].

Регулярно выполняли полный сбор выделений фекалий со взвешиванием и отбором средних проб для каждого животного. При убое осуществляли анатомическую разделку ЖКТ животных по всем его отделам с предварительной перевязкой каждого из них. Желудок, тонкий и толстый отделы кишечника отдельно взвешивали с содержимым и без него, а затем отбирали средние пробы содержимого и фрагментов стенок отделов.

Радиометрию проб выполняли по β -излучению счетчиком Т-25-БФЛ на радиометрической установке "Волна" (Россия). Радиометрию по γ - и тормозному излучению в опытах с лабораторными животными проводили с использованием сцинтилляционного счетчика УСС-1 (Россия), а в опытах на поросятах также с помощью колодезной ионизационной камеры ВАК-254 эталонного гамма-дозиметра ВАЖ-18 (Германия). Погрешность радиометрических анализов не превышала 15–20% [13]. Результаты радиометрического анализа позволили определить динамику изменения во времени содержания РЧ в желудке и кишечнике животных после однократного поступления радиоактивных частиц. Результаты экспериментальных исследований изменения содержания

ОРЧ в отделах ЖКТ моногастричных животных представлены в табл. 1–3.

Оценка биокинетических параметров транспорта радиоактивных частиц в ЖКТ моногастричных животных

Оценку биокинетических параметров транспорта РЧ в ЖКТ животных проводили с помощью компартментального анализа [22] динамики содержания РЧ в отделах пищеварительного тракта после однократного поступления радиоактивных частиц. Критерием адекватности математического моделирования являлось достижение максимального значения коэффициента детерминации ($R^2 \geq 0.70$) и минимального значения коэффициента несовпадения Тейла (U) во всех камерах математической модели одновременно [23]. На конечном этапе поиска оптимальных биокинетических параметров для оценки достоверности математического моделирования применяли F -критерий Фишера [24], согласно которому, если величина его критического значения ($F_{\text{крит}}$) больше величины его эмпирического значения ($F_{\text{эмп}}$), то между экспериментальными результатами и результатами моделирования не обнаружено статистически значимых различий [25]. Расчеты выполняли путем решения системы дифференциальных уравнений в аналитическом виде, а также с применением численных методов расчета многофункциональной интерактивной вычислительной системы PTC Mathcad Prime 4.0.

Оценка дозиметрических параметров внутреннего облучения моногастричных животных

Расчет средней мощности дозы β -излучения на поверхности слизистой оболочки $P_i(t)$ в i -х от-

Таблица 1. Среднее содержание ОРЧ (% от поступившего количества) в отделах ЖКТ крыс в зависимости от времени после однократного поступления ОРЧ с кормом [19]

Table 1. The average content of RP (% of the received amount) in the gastrointestinal tract of rats, depending on the time after a single intake of RP with feed [19]

Время, ч	Отделы ЖКТ			Фекалии
	желудок	тонкий отдел кишечника	толстый отдел кишечника	
1	50.4 ± 10.1	48.9 ± 9.4	0.01 ± 0.002	0.7 ± 0.1
2	39.0 ± 8.2	53.3 ± 10.7	5.0 ± 1.1	2.7 ± 0.6
3	17.4 ± 3.5	37.0 ± 7.4	39.5 ± 7.1	6.1 ± 1.2
4	17.8 ± 4.5	25.7 ± 5.1	41.4 ± 10.8	15.1 ± 3.6
5	2.4 ± 0.5	3.6 ± 0.7	71.6 ± 12.9	22.4 ± 4.3
7	4.8 ± 1.1	11.6 ± 2.4	67.6 ± 12.2	15.8 ± 3.3
9	5.1 ± 1.2	1.5 ± 0.3	34.8 ± 6.3	58.6 ± 12.0
12	0.7 ± 0.1	0.2 ± 0.04	26.2 ± 5.0	72.9 ± 12.9
24	0.02 ± 0.004	0.09 ± 0.02	10.8 ± 1.9	89.1 ± 7.8
31	1.3 ± 0.3	0.07 ± 0.01	7.7 ± 1.5	90.3 ± 17.6
48	0.15 ± 0.03	0.03 ± 0.006	2.0 ± 0.4	97.8 ± 18.3

делах ЖКТ ($i = 1, 2, 3$) проводили согласно выражению:

$$\overline{P}_i(t) = 2.88 \times 10^{-5} C_i(t - \tau) \overline{E}_\beta(t) \eta(t), \text{ Гр/ч} \quad (1)$$

где 2.88×10^{-5} — коэффициент, учитывающий размерность и геометрию облучения. Принято, что β -облучение слизистой оболочки желудка и толстого отдела кишечника происходит в 2π -геометрии, а тонкого отдела кишечника — в 4π -геометрии; $C_i(t - \tau) = q_i(t - \tau)/m_i$ — удельная массовая активность ПЯД в содержимом (Бк/г) i -го отдела ЖКТ на время t , ч; τ — время задержки выведения РЧ из желудка свиней. При $t < \tau = 2$ ч $q_i(t - \tau) = q_0$

(однократно поступившая в желудок активность) и $q_2(t - \tau) = q_3(t - \tau) = 0$ (для грызунов $\tau = 0$); $\overline{E}_\beta(t)$ — средняя энергия β -излучения ПЯД, МэВ; $\eta(t)$ — функция, учитывающая радиоактивный распад, отн. ед.

Расчет динамики формирования средней поглощенной дозы β -облучения слизистой оболочки в отделах ЖКТ свиней проводили согласно выражению:

$$\overline{D}_i(t) = \int_0^t \overline{P}_i(t) dt, \text{ Гр} \quad (2)$$

Выражение (1) предполагает гомогенное распределение радиоактивных материалов в содержимом ЖКТ. Оно, как правило, используется в задачах, связанных с пероральным поступлением в организм животных радиоактивных растворов [26]. В случае поступления в организм животных с кормом радиоактивных частиц распределение РЧ в содержимом неравномерно [13], поэтому дозы, определенные с использованием (1), не будут в полной мере отражать реальной дозиметрической картины облучения ЖКТ. Отмеченное обстоятельство потребовало введение экспериментально полученных параметров неравномерности облучения поверхности слизистой оболочки. Качественную картину распределения радиоактивных частиц в содержимом отделов ЖКТ получали в опытах с крысами с использованием метода авторadiографии [13]. Поглощенные дозы β -излучения в поверхностном слое слизистой пищеварительного тракта измеряли в опытах на поросятах с использованием термолюминесцентных детекторов на основе фтористого лития в соче-

Таблица 2. Среднее содержание ОРЧ (% от поступившего количества) в отделах ЖКТ морских свинок в зависимости от времени после однократного поступления ОРЧ с кормом [20]

Table 2. The average content of RP (% of the received amount) in the gastrointestinal tract of guinea pigs, depending on the time after a single intake of RP with feed [20]

Время, ч	Отделы ЖКТ			Фекалии
	желудок	тонкий отдел кишечника	толстый отдел кишечника	
3	90.0 ± 16.2	3.0 ± 0.7	7.0 ± 1.3	—
5	68.0 ± 12.8	4.5 ± 1.1	22.0 ± 4.4	5.5 ± 1.1
7	35.0 ± 5.3	3.0 ± 0.5	44.0 ± 8.8	18.0 ± 3.1
9	22.0 ± 3.3	2.0 ± 0.4	52.0 ± 9.8	24.0 ± 4.3
11	13.0 ± 2.3	1.0 ± 0.2	42.0 ± 7.6	44.0 ± 8.2
24	—	—	6.0 ± 1.2	94.0 ± 18.9
48	—	—	2.0 ± 0.4	98.0 ± 19.6

тании с установками для термовысвечивания VAM-30 (Германия) и TOLEDO (Великобритания).

Поглощенные дозы β -излучения на поверхности слизистой пищеварительного тракта животных измеряли с использованием термолюминесцентных детекторов на основе порошкообразного фтористого лития марки Dohna-lum LiF 200 Ti [27]. Навески порошка массой 17 ± 5 мг помещали в квадратные пакетики площадью 55 ± 10 мм², изготовленные из лавсановой пленки толщиной 1.6 мг/см². Для исключения проникновения жидкой компоненты содержимого ЖКТ в порошкообразный люминофор равномерно распределенные детекторы помещали между двух слоев лавсановой пленки. Общая площадь каждого из наборов детекторов составляла от 40 см² и более, а полная толщина экранирующей пленки — 3.2 мг/см². Для исследования распределения поглощенной дозы β -излучения по поверхности слизистой оболочки желудка после убоя животного желудок немедленно замораживали жидким азотом, чтобы максимально избежать перераспределения ОРЧ в содержимом. После полного замораживания содержимого стенку желудка оттаивали, отслаивали от содержимого и между стенкой и замороженным содержимым размещали наборы детекторов. Экспонирование детекторов проводили в холодильной камере.

Так как детекторы были распределены по поверхности слизистой оболочки желудка равномерно, полагали, что распределение участков площадей слизистой ΔS_k по уровню β -облучения в диапазонах мощностей доз ΔP_k по измерениям n_k детекторов пропорционально n_k/n_0 , где n_0 — общее количество детекторов. При этом средневзвешенное по площади поверхности слизистой оболочки значение мощности поглощенной дозы составит:

$$\bar{P} = \sum \bar{P}_k \frac{n_k}{n_0}, \text{ Гр/ч} \quad (3)$$

где $\bar{P}_k$ — средние арифметические значения мощности поглощенной дозы в k -х диапазонах по измерениям n_k детекторов.

Глубинное распределение поглощенной дозы β -облучения стенки желудка и тонкого отдела кишечника поросят “трехкомпонентными” и “рениевыми” модельными частицами оценивалось с использованием расчетного кода VarSkin 4.0.0 [28]. При этом использовали один из вариантов расчета дозы β -излучения, заложенный в коде VarSkin 4.0.0, от цилиндрического источника с радиусом, равным максимальному пробегу наиболее энергетических электронов на некоторой глубине в биологической ткани на основе численного интегрирования формулы Бергера для мощности дозы от точечного изотропного источ-

Таблица 3. Среднее содержание ОРЧ (% от поступившего количества) в отделах ЖКТ поросят в зависимости от времени после однократного поступления ОРЧ с кормом [21]

Table 3. The average content of RP (% of the received amount) in the gastrointestinal tract of piglets, depending on the time after a single intake of RP with feed [21]

Время, ч	Отделы ЖКТ			Фекалии
	желудок	тонкий отдел кишечника	толстый отдел кишечника	
2	86.4 ± 17.3	2.4 ± 0.4	0.08 ± 0.02	11.1 ± 2.3
4	77.4 ± 15.5	4.5 ± 0.9	6.4 ± 1.5	11.7 ± 2.5
8	61.1 ± 12.2	13.0 ± 2.6	13.0 ± 3.3	12.9 ± 2.8
12	47.2 ± 9.4	17.1 ± 3.4	23.6 ± 4.7	12.1 ± 2.4
14	37.6 ± 7.5	9.1 ± 1.8	19.9 ± 3.9	33.4 ± 6.6
18	3.1 ± 0.7	9.0 ± 1.2	46.2 ± 7.5	41.7 ± 9.2
24	12.6 ± 3.7	4.4 ± 0.9	32.3 ± 5.9	50.7 ± 10.6
34	2.7 ± 0.5	1.0 ± 0.2	21.3 ± 4.3	75.0 ± 14.6

ника [29]. Выбор для расчетов кода VarSkin 4.0.0 был обусловлен удовлетворительным согласием экспериментальных и расчетных данных, полученных в [30] при анализе глубинных распределений поглощенной дозы в кожном покрове человека для различных β -излучающих источников радиоактивного загрязнения.

При оценке биологического действия РЧ на лабораторных животных использовали следующие показатели [31]:

— общее состояние животного (подвижность, угнетение или возбуждение, агрессивность, пугливость); состояние шерстного покрова и кожи (наличие отеков, кровоизлияний и т.п.);

— состояние слизистых оболочек рта и глаз (бледность, покраснение, синюшность, набухание, наличие кровоизлияний или эрозий, характер выделений);

— состояние органов дыхания, выделения из носа, кашель; в фекалиях определяли наличие скрытой крови.

Клиника радиационного поражения, динамика изменения массы, выживаемость, гематология и патологоанатомическая картина желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) у лабораторных животных исследовались после перорального введения модельных РЧ с активностью от 100 до 1500 МБк/кг массы тела, а у поросят после однократного потребления с кормом частиц с активностью 370 и 740 МБк/кг.

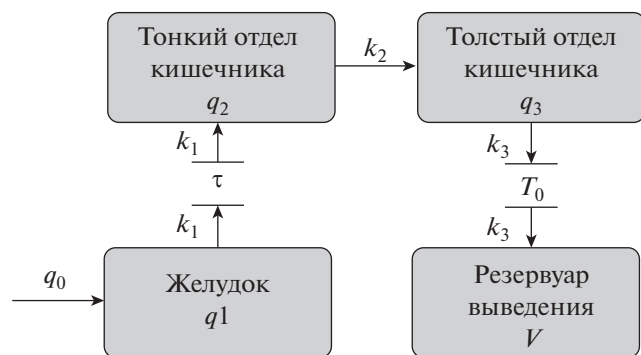


Рис. 2. Трехкамерная модель транспорта РЧ в ЖКТ моногастрических животных.

Fig. 2. Three-compartmental model of RP transport in the GIT of monogastric animals.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценку биокинетических параметров транспорта частиц в ЖКТ животных проводили с использованием представленной на рис. 2 камерной модели ЖКТ.

В модели используются следующие параметры транспорта, приведенные на рис. 2:

q_0 — количество РЧ, однократно поступившее в организм животных (100%);

τ — время задержки выведения РЧ из желудка поросят (2.5 ч), (для лабораторных животных $\tau = 0$);

T_0 — время задержки выведения РЧ из кишечника, ч. Для морских свинок время задержки в кишечнике составляло 2 ч. Для крыс $T_0 = 0$;

q_1, q_2, q_3 — содержание РЧ (% от поступившего количества) в отделах ЖКТ;

V — содержание РЧ в резервуаре выведения (%);

k_1, k_2, k_3 — константы скорости выведения РЧ для каждого из отделов ЖКТ, ч^{-1} .

В качестве примера на рис. 3 показана динамика содержания РЧ в отделах ЖКТ поросят согласно данным расчета и экспериментальным результатам.

Использованные в расчетах значения констант скорости транспорта представлены в табл. 4. Там же приведены значения коэффициента детерминации (R^2) в каком-либо отделе ЖКТ (камере), полученные при компартментальном моделировании транспорта РЧ в ЖКТ животных, адекватность которых была подтверждена рассчитанными величинами коэффициента несовпадения Тейла (U) и путем использования (F) критерия Фишера, при помощи которого удалось установить отсутствие статистически значимых различий между экспериментальными и расчетными значениями. Также в табл. 4 указаны значения среднего времени пребывания (удержания MRT) частиц в организме животных. Расчет MRT вы-

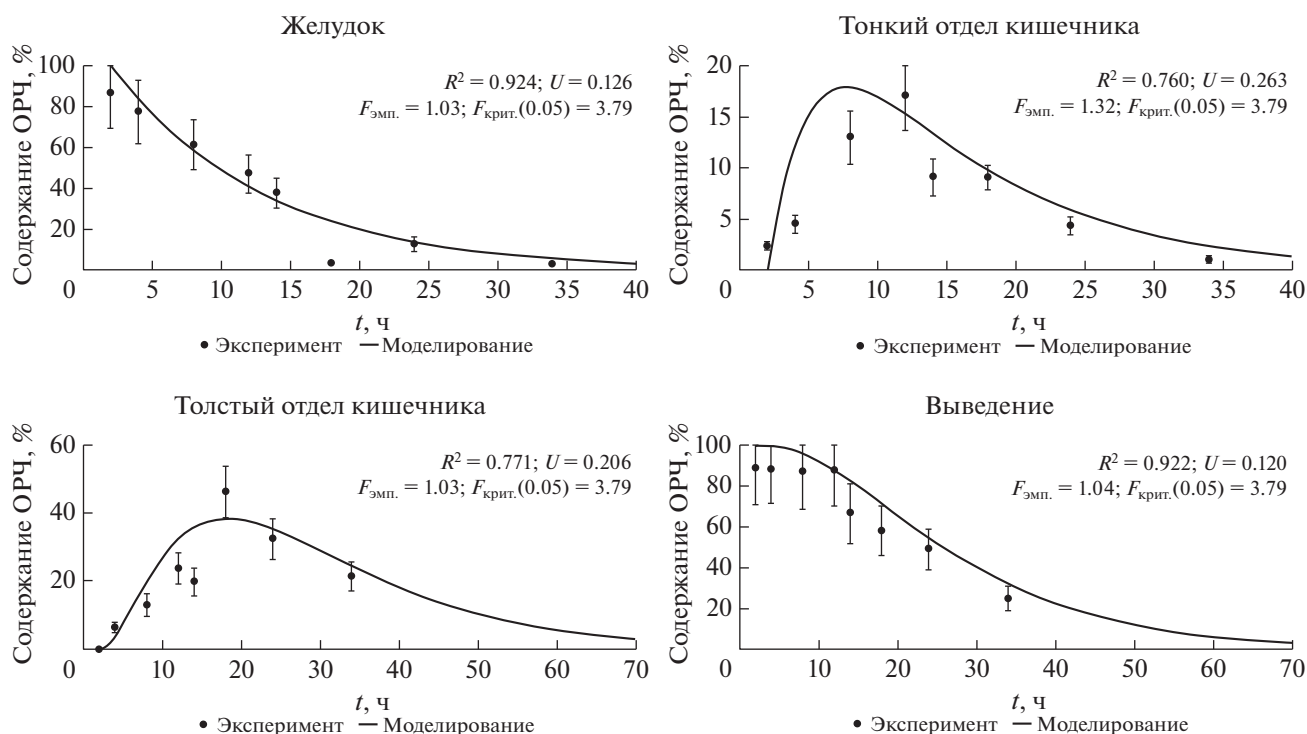


Рис. 3. Динамика содержания РЧ в ЖКТ поросят.

Fig. 3. Dynamics of the radioactive particles content in the gastrointestinal tract of piglets.

Таблица 4. Биокинетические параметры камерной модели ЖКТ крыс, морских свинок, свиней и среднее время пребывания РЧ в организме животных**Table 4.** Biokinetic parameters of the compartmental model in the GIT of rats, guinea pigs, and pigs and the mean retention time of feed and RP in the animal body

Вид животного	Биокинетические параметры модели, ч ⁻¹			Коэффициент детерминации (R^2)			Среднее время пребывания (MRT), ч	
	k_1	k_2	k_3	желудок	тонкий кишечник	толстый кишечник	кормовые массы	РЧ
Крысы	0.430	0.420	0.108	0.971	0.775	0.821	13–18 [33, 34]	14.0
Морские свинки	0.123	1.710	0.096	0.917	0.895	0.820	12–18 [35, 36]	21.0
Свиньи	0.090	0.030	0.075	0.924	0.760	0.771	40–49 [37–39]	56.5

полняли методом статистических моментов [32] согласно выражению:

$$MRT = \tau + T_0 + \frac{\int_0^{\infty} F(\theta)\theta d\theta}{\int_0^{\infty} F(\theta)d\theta}, \text{ ч}, \quad (4)$$

где $F(\theta)$ — функция выведения радиоактивных частиц (разгрузочная функция), являющаяся экспоненциальной аппроксимацией экспериментальных данных динамики эвакуации РЧ, $F(\theta) = 1 - V(t)$, %; $\tau + T_0$ — время первого появления радиоактивных частиц в фекалиях животных после однократного поступления, ч (для крыс $\tau = 0$, $T_0 = 0$; для морских свинок $\tau = 0$, $T_0 = 2.5$ ч); $\theta = t - \tau$, при $t \leq \tau$ значение $F(\theta) = 1$.

Из табл. 4 видно, что среднее время пребывания силикатных РЧ с размерами 80–160 мкм и непереваренных кормовых масс в пищеварительном тракте крыс одинаково, у морских свинок MRT РЧ незначительно превышает время пребывания корма, а у поросят MRT РЧ в среднем в 1.3 раза больше MRT частиц корма. Следует также отметить следующую интересную закономерность. Полученные в зарубежных источниках значения MRT непереваренных стандартных кормовых смесей, обладающих меньшей плотностью, имеют тенденцию к уменьшению и соответствуют нижнему пределу диапазонов MRT, представленных в табл. 4. Впервые зависимость скорости транспорта частиц корма и ряда инертных материалов в пищеварительном тракте животных и человека в зависимости от плотности материалов была отмечена и исследована американским физиологом Фредериком Хельцелем. Его эксперименты на различных животных и человеке (авторе исследований) с использованием узелков веревки и частиц с размерами до 1 мм из стекла, серебра и золота показали, что скорость

продвижения частиц обратно пропорциональна плотности материалов (табл. 5).

Среднее время прохождения пищи (остатков), упомянутых в табл. 5, оценивалось по времени прохождения различных непереваренных фрагментов пищи, волокнистых и других инертных материалов с размерами ~1 мм, которые были обнаружены при просеивании фекалий. У отдельных животных и человека были установлены отделы ЖКТ, где наблюдается задержка инертных частиц, обусловленная их гравитационным оседанием на поверхность слизистой. С использованием рентгенограмм было установлено, что тяжелые частицы движутся чаще всего всей массой вместе, а легкие распределены в содержимом отделов ЖКТ большей частью равномерно [40]. Аналогичный результат был получен в исследовании с “горячими” радиоактивными частицами с размерами 80–160 мкм [41]. На рис. 4 приведены радиогаммы желудков крыс, убитых через 1, 3 и 6 ч после орального введения ОРЧ.

Из радиогамм видно, что в течение первого часа РЧ равномерно распределены в содержимом желудка, а уже через 3 и 6 ч наблюдается значительное концентрирование частиц в кардиальной и пилорической частях желудка. При этом MRT РЧ в пищеварительном тракте крыс сопоставимо с MRT корма, находясь практически в середине соответствующего непереваренным частицам корма временного диапазона.

Причиной депонирования ОРЧ в кардиальной части желудка (в области перехода пищевода в желудок), по всей видимости, является кольцевой сфинктер (жом), препятствующий обратному выбросу пищи в пищевод. Задержке РЧ в пилорическом отделе желудка, в привратнике, способствует другой сфинктер, соединяющий желудок с двенадцатиперстной кишкой. Кроме этого, пилорус отличается глубокими желудочными ямками, где могут задерживаться радиоактивные частицы. Наряду с морфологическими особенностями желудка причиной депонирования РЧ может яв-

Таблица 5. Параметры прохождения различных материалов в ЖКТ человека [40]
Table 5. Parameters of passage of various materials in the human gastrointestinal tract [40]

Тип материала	Число экспериментов	Общее число тестируемого материала	% вышедших материалов	Среднее время прохождения, ч	Приблизительная плотность, г/см ³
Газ (CO ₂)	—	—	—	2–6	—
Корм	—	—	—	25	0.9–1.6
Семена томатов	6	75	100	25.44	—
Целлюлоза	40	930	99.37	26.76	1.45
Семена проса	6	80	100	28.96	—
Виноградные семена	8	160	100	29.89	—
Стеклянные бусинки	30	800	99.63	40.15	2.60
Гравий (крупный песок)	3	20	100	52.31	—
Стальные шариковые подшипники	3	20	100	79.98	7.70
Серебро (изогнутая проволока)	4	35	100	81.88	10.53

ляться гравитационное осаждение силикатных частиц с плотностью, превышающей плотность кормов [40].

Депонирование ОРЧ в кардиальной и особенно в пилорической части желудка впоследствии приводило к проявлению наиболее интенсивного язвенного радиационного поражения на этих участках слизистой оболочки. Оценку поглощенных доз, вызывающих радиационное язвенное поражение ЖКТ, проводили поэтапно, выполняя следующие процедуры [42]:

- Определяли поглощенные дозы β -облучения слизистой оболочки исходя из предположения о гомогенном распределении РЧ в содержимом, 2π -геометрии облучения слизистой оболочки желудка и толстого отдела кишечника и 4π -геометрии облучения слизистой тонкого отдела кишечника. В расчетах использовали предложенные камерные модели транспорта РЧ в ЖКТ животных. Оценивали соотношения расчетных и из-

меренных величин мощностей поглощенных доз, средневзвешенных по площади поверхности слизистой оболочки.

- Выполняли оценку мощностей поглощенных доз в областях концентрирования РЧ по данным автордиографии и/или по результатам прямых измерений на внутренней поверхности слизистой оболочки после убоя животных. Проводили оценку неравномерности облучения слизистой оболочки ($P_{\max}/P_{\min}$) и максимально возможной кратности превышения средних уровней облучения ($P_{\max}/P_{\text{aver.}}$).

- Проводили сравнение дозиметрических параметров с патологоанатомической картиной язвенно-некротического поражения слизистой оболочки с оценкой диапазонов поглощенных доз, вызывающих различные поражения слизистой оболочки.

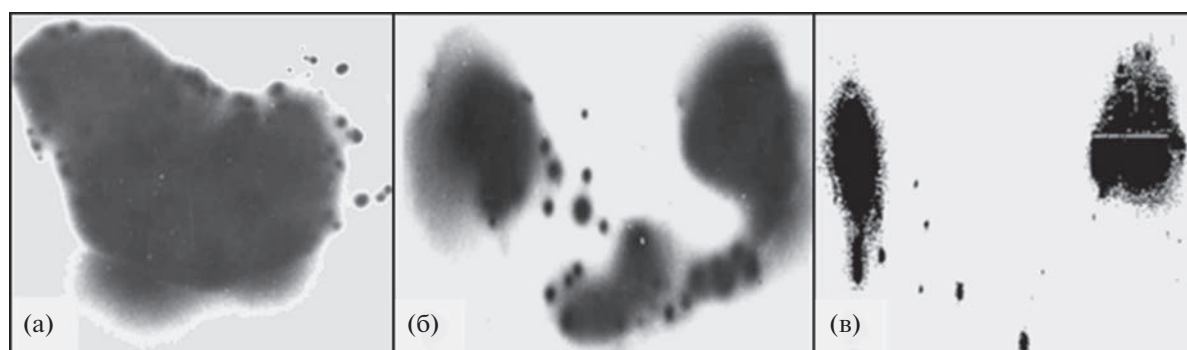


Рис. 4. Радиограммы желудка крыс, убитых через 1 (а), 3 (б) и 6 (в) ч после орального введения РЧ [41].

Fig. 4. Radiograms of the stomach of rats slaughter 1 (a), 3 (b) and 6 (c) hours after ingestion of RP [41].

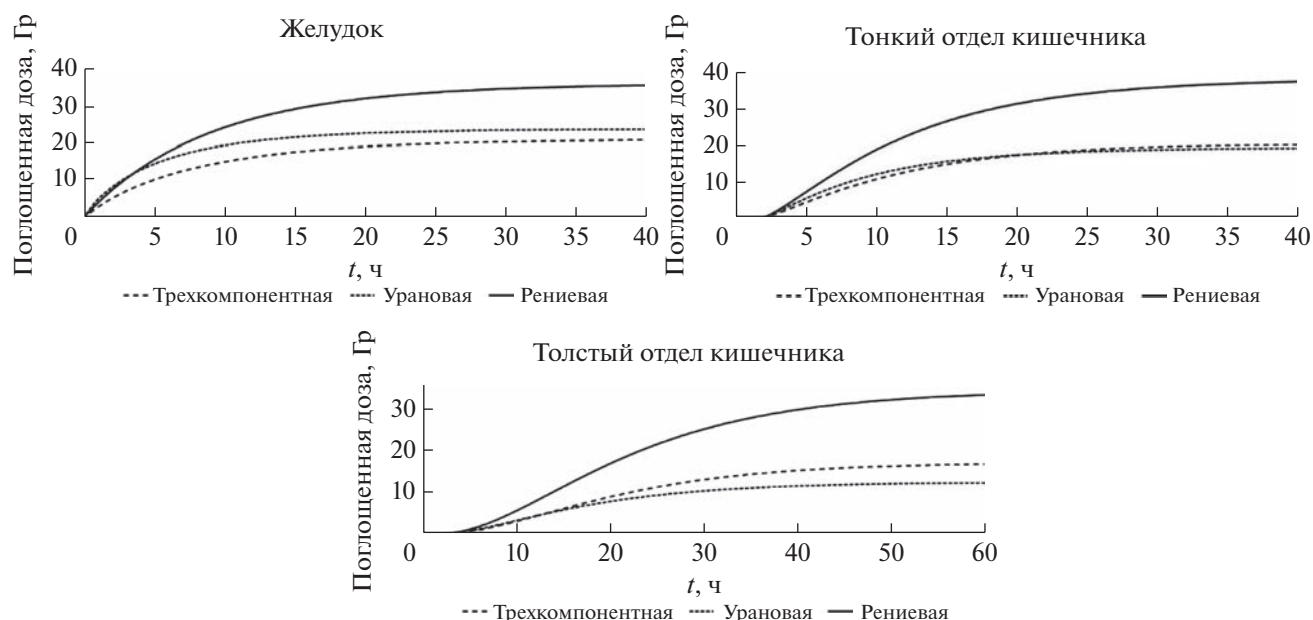


Рис. 5. Динамика формирования поглощенных доз β -облучения слизистой оболочки отделов ЖКТ поросят после однократного перорального поступления “трехкомпонентных”, “урановых” и “рениевых” модельных РЧ с активностью 740 МБк/кг массы животных.

Fig. 5. Dynamics of formation of absorbed doses of β -irradiation of the mucous membrane of the GIT of piglets after a single oral intake of “three-component”, “uranium” and “rhenium” model RP with an activity of 740 MBq/kg of animal weight.

С использованием камерных моделей были получены зависимости формирования поглощенных доз β -облучения слизистой оболочки исходя из предположения о гомогенном распределении РЧ в содержимом отделов ЖКТ крыс, морских свинок и поросят [43]. Результаты расчетов показали, что при поступлении “трехкомпонентных” ОРЧ 95% поглощенной дозы в желудке формируется у морских свинок за 17 ч, у крыс за 10 ч, а у поросят более чем за 23 ч. 95% поглощенной дозы в тонком отделе кишечника у морских свинок формируется за 10 ч, у крыс за 8 ч, а у поросят за 28 ч. Аналогичный показатель для толстого отдела кишечника у морских свинок составляет 29 ч, у крыс 24 ч, а у поросят более 44 ч после однократного введения радиоактивных частиц. В качестве примера на рис. 5 представлена динамика формирования средних поглощенных доз β -облучения поверхности слизистой оболочки отделов ЖКТ поросят после однократного поступления с кормом РЧ “трехкомпонентной”, “урановой” и “рениевой” моделей с удельной активностью 740 МБк/кг массы тела животных.

Полученные результаты свидетельствуют о кратковременном характере радиационного воздействия радиоактивных частиц на пищеварительный тракт животных с длительностью, не превышающей полутора суток. Как видно из рис. 5, по величине сформировавшейся поглощенной дозы, доза β -облучения от “рениевой” модели в среднем в 2 раза превышает дозы для “трех-

компонентной” и “урановой” моделей. В то же время при пероральном поступлении одинаковых активностей РЧ для всех животных, использованных в настоящей работе, как и у овец в работе [6], было отмечено более выраженное поражение слизистой оболочки по всей ее глубине радиоактивными частицами “трехкомпонентной” и “урановой” моделей. Наблюдаемые различия в биологических эффектах были обусловлены разным характером глубинного распределения поглощенной дозы β -излучения. В связи с этим возникает необходимость расчета глубинного распределения доз β -облучения в стенке ЖКТ. На рис. 6 представлены функции ослабления сформированной дозы β -облучения в слизистой оболочке желудка и тонкого отдела кишечника поросят после однократного перорального поступления “трехкомпонентных” и “рениевых” модельных РЧ.

Из рис. 6 видно, что более “мягкое” β -излучение “рениевой” модели оказывает менее существенное воздействие на низлежащие слои стенки желудка и тонкого отдела кишечника поросят по сравнению с β -излучением “трехкомпонентной” модели. Величина средней поглощенной дозы в стенке желудка составляет 5.5 Гр для “трехкомпонентных” РЧ и 3.3 Гр для “рениевой” модели. Для тонкого отдела кишечника средние поглощенные дозы составили 5.1 Гр для “трехкомпонентной” модели и 3.4 Гр для “рениевой”

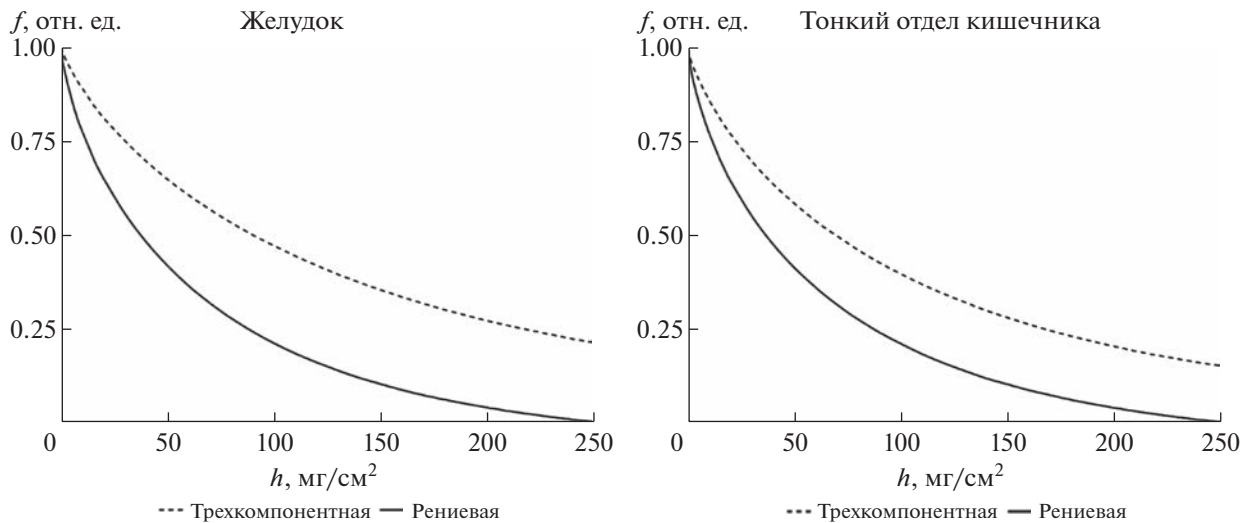


Рис. 6. Функции ослабления (f) поглощенных доз β -облучения, сформированных за 25 ч в желудке и в тонком отделе кишечника поросят после поступления в организм ОРЧ, от глубины в биологической ткани.

Fig. 6. The functions of reduction (f) of absorbed doses of β -irradiation formed in 25 hours in the stomach and in the small intestine of piglets after ingestion of RP, from the depth in the biological tissue.

модели. Средние поглощенные дозы в стенке отдела ЖКТ определяли в виде:

$$D_{\text{сред.}} = \int_{h_1}^{h_2} \frac{D(h)}{h_2 - h_1} dh, \text{ Гр} \quad (5)$$

где h_1 — начальная, а h_2 — максимальная глубина в биологической ткани, мг/см^2 .

Количественная оценка неравномерности распределения мощностей доз β -излучения по поверхности слизистой оболочки была получена на примере желудка поросят и определена с помощью LiF детекторов, помещенных под стенку предварительно замороженных после уоя животных отделов ЖКТ (табл. 6).

Средневзвешенная по поверхности слизистой оболочки желудка мощность поглощенной дозы

Таблица 6. Распределение мощностей доз по стенке желудка поросенка, получившего однократно с кормом 370 МБк/кг “трехкомпонентных” ОРЧ

Table 6. Dose rate distribution along the (internal) stomach wall of a Piglet that received 370 MBq/kg “three-component” RP once with food

ΔP , сГр/ч	$P_{\text{ср}}$, сГр/ч	Число детекторов	Облучаемая площадь в %
6–25	13 ± 5	12	15
26–44	31 ± 4	36	46
45–63	51 ± 6	20	25
64–82	75 ± 8	6	8
83–100	92 ± 12	2	3
101–120	110 ± 14	2	3

составила 37 ± 5 сГр/ч, что удовлетворительно согласуется с расчетным значением, полученным при условии гомогенного распределения РЧ в содержимом желудка и 2π -геометрии β -облучения слизистой оболочки (41 сГр/ч). Неравномерность распределения мощностей поглощенных доз, представленная в виде отношения $P_{\text{max}}/P_{\text{min}}$, достигает 20. При этом основная площадь слизистой оболочки желудка облучается дозами, близкими к среднему значению ($\sim 71\%$), и $\sim 14\%$ стенки облучается максимальными дозами, в ~ 3 раза превышающими среднее расчетное значение, где наблюдались очаговые язвенные поражения слизистой оболочки в кардиальной и пилорической частях желудка.

На основании анализа повреждений ЖКТ, развития и исхода радиационного поражения организма лабораторных животных В.А. Киршиным, В.А. Бударковым и А.С. Зенкиным, в зависимости от величины поступившей активности РЧ, были выделены ниже представленные четыре степени острого радиационного язвенного гастроэнтероколита [44].

Крайне тяжелая степень была характерна тем, что болезнь протекала быстро. Исход болезни всегда смертельный — морские свинки погибали на 6–10-е сутки, крысы — на 4–6-е сутки после введения РЧ. У крыс язвенно-некротические изменения в ЖКТ, как правило, не успевали развиваться, отмечались гиперемии и геморрагии на слизистых оболочках. У морских свинок язвенно-некротические поражения слизистой оболочки были отмечены уже через 2 сут после введения РЧ.

Тяжелая степень отличалась от крайне тяжелой тем, что болезнь протекала более замедленно.

Таблица 7. Степени острого радиационного язвенного гастроэнтероколита в зависимости от поступившей активности и поглощенных доз в отделах ЖКТ
Table 7. The degree of radiation ulcerative gastroenterocolitis depending on the received activity and absorbed doses in the GIT

Форма болезни	Удельная активность РЧ, МБк/кг	Вид животного	Поглощенная доза, Гр		
			желудок	тонкий кишечник	толстый кишечник
Легкая	100–370	Крысы	1.9–7.0	2.5–9.4	3.8–14.1
		Морские свинки	3.5–12.9	0.3–1.1	1.6–5.8
	до 370	Свиньи	<10.6	<10.3	<8.6
Средняя	370–1100	Крысы	7.0–20.9	9.4–27.9	14.1–41.8
		Морские свинки	12.9–38.5	1.1–3.4	5.8–17.0
	370	Свиньи	~10.6	~10.3	~8.6
Тяжелая	1100–1500	Крысы	20.9–28.5	27.9–38.0	41.8–57.0
		Морские свинки	38.8–52.5	3.4–4.7	17.0–23.2
	740	Свиньи	~21.2	~20.6	~17.2
Крайне тяжелая	>1500	Крысы	>28.5	>38.0	>57.0
		Морские свинки	>52.5	>4.7	>23.2
	>740	Свиньи	>21.2	>20.6	>17.2

В начальный период заболевания (2–5 сут) на слизистой желудка и толстом отделе кишечника обнаруживали гиперемированные участки. В разгар болезни (6–20 сут) на этих местах возникали язвенно-некротические поражения. Смертельные исходы наблюдали у морских свинок на 3–4-й неделе, у крыс на 2-й неделе после радиационного воздействия (погибло 40–80% животных). У поросят тяжелому поражению были подвержены все отделы ЖКТ, местами встречались язвы неправильной округлой формы, величиной от 2 до 10 см в диаметре, отмечен некроз глубоких слоев стенки желудка. Смертельные исходы (~60% животных) наблюдали на 28–50-е сутки.

Средняя степень была характерна тем, что клиническая картина болезни формировалась в те же сроки, что и при тяжелой степени, отмечали почти все перечисленные признаки с той разницей, что развивались они медленнее, а степень выраженности значительно слабее. В 20–40% случаев были возможны смертельные исходы.

Легкая степень отличалась тем, что болезнь протекала с маловыраженными клиническими симптомами. Существенно не изменялась масса тела, отмечено кратковременное понижение двигательной активности и пищевой возбудимости. Патологоанатомические исследования обнаруживали острый гастрит (до 15–20 сут). Смертельных исходов не было.

Полулетальные дозы $LD_{50/30}$ по величине поглощенных доз β -облучения ЖКТ радиоактивными частицами желудка и толстого отдела кишечника морских свинок составили ~47 и ~11 Гр

соответственно. Для $LD_{50/60}$ поглощенные дозы в желудке составили ~37 Гр, а в толстом кишечнике ~8.5 Гр. Подсвинки показали более высокую радиочувствительность. Формирование средних поглощенных доз облучения ЖКТ величиной около 10 Гр было способно приводить у них к летальным исходам. В табл. 7 представлены активности и дозиметрические показатели, характерные для разных степеней острого радиационного язвенного гастроэнтероколита у моногастричных животных после однократного перорального поступления “трехкомпонентных” РЧ.

Данные, представленные в табл. 7, позволяют предложить следующую дозиметрическую шкалу степеней проявления острого радиационного язвенного гастроэнтероколита по диапазонам средних поглощенных доз на слизистую критического отдела ЖКТ (желудка у морских свинок и свиней, толстого отдела кишечника у крыс): для легкой степени у крыс – от 4 до 14 Гр, у морских свинок – от 4 до 13 Гр, у поросят, по совокупности проанализированных признаков радиационного поражения, – от 1 до 5 Гр; для средней степени заболевания у крыс – от 14 до 42 Гр, у морских свинок – от 13 до 39 Гр, у поросят – от 5 до 11 Гр; для тяжелой степени у крыс – от 42 до 57 Гр, у морских свинок – от 39 до 53 Гр, у поросят – от 11 до 21 Гр; для крайне тяжелой степени у крыс – более 57 Гр, у морских свинок – более 53 Гр, у поросят – более 21 Гр. При этом в очагах язвенного поражения локальные дозы могут превышать средние значения примерно в 3 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиологические аспекты загрязнения природной среды и аграрных экологических систем радиоактивными частицами нашли отражение в исследованиях ВНИИРАЭ и ряда институтов-соисполнителей на территории СССР, выполненных в 70-е гг. прошлого столетия по вопросам потенциальной опасности для сельского хозяйства радиационных факторов ядерных взрывов. Представленные в настоящей работе результаты экспериментальных исследований, долгие годы являвшихся недоступными для широкой научной общественности, сохраняют актуальность и могут оказаться полезными в задачах радиационной безопасности, связанных с загрязнением окружающей среды радиоактивными частицами различного генезиса. Исходными данными для построения математических моделей транспорта РЧ в ЖКТ животных были экспериментальные материалы, полученные на базе ныне уже не существующего уникального радиологического комплекса ФИЦВиМ, созданного под руководством профессора И.А. Чистякова в начале 70-х годов прошлого столетия в соответствии с решениями правительства страны для оценки последствий воздействия поражающих факторов ядерного взрыва на сельскохозяйственных животных. Санитарным паспортом на технологические системы комплекса регламентирована приемка до 1.11 ТБк/год (30 Ки/год) молодых продуктов ядерного деления, их расфасовка, дистанционная доставка в кормушки животных и на конечном этапе — бездымная утилизация органических радиоактивных материалов. В 80-е годы прошлого столетия эти исследования были признаны потерявшими актуальность и прерваны на полпути. Данное обстоятельство во многом явилось причиной незавершенности радиобиологических исследований, особенно в области дозиметрии излучений инкорпорированных радионуклидов, присутствующих в составе радиоактивных частиц различного генезиса. Если для острой лучевой болезни, вызванной внешним облучением, радиобиологические эффекты анализируются в зависимости от поглощенных доз, являющихся мерой биологического действия ионизирующих излучений, то основная часть исследований последствий внутреннего облучения оперирует терминами поступившей активности того или иного радионуклида. При этом особые сложности в трактовке дозиметрической картины внутреннего облучения возникают в случае перорального и/или ингаляционного поступления “горячих” радиоактивных частиц. Радионуклиды, поступившие в организм в растворимой форме, как правило, гомогенно (или почти гомогенно) распределяются в объеме различных органов и тканей, поэтому разработанные к настоящему времени расчетные коды предполагают равномерное

распределение. Как мы видим из результатов настоящей работы, а также данных, полученных на крупном рогатом скоте и овцах [45, 46], распределение РЧ в содержимом ЖКТ и по площади слизистой оболочки неравномерно, что в конечном итоге приводит к очаговому характеру язвенного гастроэнтероколита. Проведенный анализ дозиметрической, клинической и патологоанатомической картин радиационного воздействия “горячих” РЧ на отделы желудочно-кишечного тракта моногастричных животных позволил определить основные факторы формирования язвенного поражения. К ним следует отнести неравномерное распределение частиц в содержимом отделов ЖКТ, концентрирование РЧ на отдельных участках слизистой оболочки с последующим формированием локальных уровней облучения, превышающих средние значения поглощенных доз более чем в 3 раза. На основании результатов расчета средних поглощенных доз β -облучения слизистой оболочки пищеварительного тракта моногастричных животных была получена дозиметрическая шкала степеней проявления острого радиационного язвенного гастроэнтероколита.

В заключение хотелось бы выразить благодарность и отметить непосредственное участие в проведении настоящей работы профессора Виктора Алексеевича Бударкова, неожиданно для нас ушедшего из жизни в августе 2021 года.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Salbu B., Krekling T., Hove K. et al.* Biological relevance of hot particles ingested by domestic sheep // International Symposium on Environmental Impact of Radioactive Releases. Vienna: IAEA, 1995. P. 312–313.
2. *Aarkrog A.* Manmade radioactivity / Eds E. Van der Stricht, R. Kirchman // Radioecology: Radioactivity and Ecosystems. 2001. P. 55–78.
3. *Dale P., Robertson I., Toner M.* Radioactive particles in dose assessments // J. Environ. Radioac. 2008. V. 99. № 10. P. 1589–1595.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2008.06.005>
4. Radioactive particles in the Environment: Sources, Particle Characterization and Analytical Techniques // IAEA-TECDOC-1663. V. 1663. Vienna: IAEA, 2011. P. 1–77.
5. *Анненков Б.Н.* Сельское хозяйство после крупных радиационных аварий. Ростов-на-Дону: ЗАО Ростиздат, 2010. 284 с. [*Annenkov B.N.* Selskoe khozyajstvo posle krupnykh radiacionnykh avarij. Rostov-na-Donu: ZAO Rostizdat, 2010. 284 p. (In Russ.)]
6. *Бударков В.А., Zenkin A.S., Kozmin G.V.* Особенности биологического действия искусственных радиоактивных частиц // Сб. мат. междунар. конф. “Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы”. Обнинск.: ВНИИРАЭ, 2018. С. 61–64. [*Budarkov V.A., Zenkin A.S., Kozmin G.V.* Osobennosti

- biologicheskogo dejstviya iskusstvennykh radioaktivnykh chasticz // Sb. mat. mezhdunar. konf. "Radiacionnye tehnologii v selskom khozyajstve i pishhevoj promyshlennosti: sostoyaniye i perspektivy". Obninsk: VNIIRAE, 2018. P. 61–64. (In Russ.)]
7. Бударков В.А., Киришин В.А., Пантелеев Л.И. и др. Методические указания по моделированию воздействия радиационных факторов наземного ядерного взрыва на сельскохозяйственных животных в лабораторных условиях. М.: ГУ МСХ СССР, 1982. 25 с. [Budarkov V.A., Kirshin V.A., Panteleev L.I. i dr. Metodicheskie ukazaniya po modelirovaniyu vozdeystviya radiacionnykh faktorov nazemnogo yadernogo vzryva na selskoxozyajstvennykh zhivotnykh v laboratornykh usloviyakh. Moskva: GU MSX SSSR, 1982. 25 p. (In Russ.)]
 8. Kozmin G.V., Fesenko S., Snegirev A.S. et al. Environmental behaviour of radioactive particles: Transfer to animals // J. Environ. Radioact. 2020. V. 213. P. 106–111. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106111>
 9. Shichijo K., Nariaki Fujimoto N., Uzbekov D. et al. Internal exposure to neutron-activated ^{56}Mn dioxide powder in Wistar rats. Part 2: pathological effects // Radiat. Environ. Biophys. 2017. V. 56. № 1. P. 55–61. <https://doi.org/10.1007/s00411-016-0676-z>
 10. Stepanenko V. et al. Microdistribution of internal radiation dose in biological tissues exposed to ^{56}Mn dioxide microparticles // J. Radiat. Res. 2022. V. 63. № 1. P. i21–i25. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrac023>
 11. Stepanenko V. et al. Estimation of "dose-depth" profile in the surface layers of a quartz-containing tile from the former Hiroshima University building indicates the possible presence of beta-irradiation from residual radioactivity after A-bombing // J. Radiat. Res. 2022. V. 63. № 1. P. i54–i60. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrac029>
 12. ICRP Publication 108: Environmental Protection: The Concept and Use of Reference Animals and Plants // Ann. ICRP. 2008. V. 38. № 4. P. 1–251.
 13. Пантелеев Л.И., Анненков Б.Н., Сарapultsev И.А. и др. Теоретические и экспериментальные разработки дозиметрических моделей сельскохозяйственных объектов при радиоактивном загрязнении территорий. Обнинск: ВНИРАЭ, 1981. 180 с. [Panteleev L.I., Annenkov B.N., Sarapultsev I.A. i dr. Teoreticheskie i eksperimentalnye razrabotki dozimetricheskikh modelei selskoxozyaistvennykh obektov pri radioaktivnom zagryaznenii territorii. Obninsk: VNIIRAE, 1981. 180 p. (In Russ.)]
 14. Целищев С.П. Искусственные радиоактивные частицы для изучения радиационного поражения животных на следе наземного ядерного взрыва в модельных экспериментах // Проблемы животноводства в зоне следа наземного ядерного взрыва / Под ред Б.Н. Анненкова. Обнинск, 1978. С. 29–49. [Celishev S.P. Iskustvennye radioaktivnye chastici dlya izucheniya radiacionnogo porajeniyaivotnih na slede nazemnogo yadernogo vzryva v modelnih eksperimentah // Problemy zhivotnovodstva v zone sleda nazemnogo yadernogo vzryva / Pod red. B.N. Annenkov. Obninsk, 1978. P. 29–49. (In Russ.)]
 15. Куринный В.Д. Моделирование радиоактивных частиц локальных выпадений наземных ядерных взрывов: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 1977. 106 с. [Kurinnyy V.D. Modelirovaniye radioaktivnykh chastits lokalnykh vypadenij nazemny yadernykh vzryvov. [Dissertation]. Moskva, 1977. 106 p. (In Russ.)]
 16. Козьмин Г.В. и др. Принципы моделирования радиоактивных частиц локального следа наземного ядерного взрыва // Докл. конф. ВНИИВВиМ. Покров, 1976. [Kozmin G.V. Printsipy modelirovaniya radioaktivnykh chastits lokalnogo sleda nazemnogo yadernogo vzryva // Doklady konf VNIIVVIM. Pokrov, 1976. (In Russ.)]
 17. Bell M.C. Radiation effects on farm animals. Survival of food crops and livestock in the event of nuclear war: Proc of Symposium Brookhaven National Lab // Conf. proc. Oak Rige, 1971. P. 656–669.
 18. Проблемы животноводства в зоне следа наземного ядерного взрыва / Под ред. Б.Н. Анненкова. Обнинск: ВНИИХРАЭ, 1980. 233 с. [Problemy zhivotnovodstva v zone sleda nazemnogo yadernogo vzryva / Pod red. B. N. Annenkov. Obninsk: VNIISHRAE, 1980. 233 p. (In Russ.)]
 19. Сарapultsev И.А., Козьмин Г.В. и др. Динамика транспорта оплавленных радиоактивных частиц в желудочно-кишечном тракте крыс // Мат. науч. конф., посвященной 60-летию со дня образования СССР. Покров, 1983. С. 9–11. [Sarapultsev I.A., Kozmin G.V. i dr. Dinamika transporta oplavlennykh radioaktivnykh chastits v zheludochno-kishechnom trakte krysa // Materialy nauchnoy konferentsii posvyaschennoj 60 letiyu so dnya obrazovaniya SSSR. Pokrov, 1983. P. 9–11. (In Russ.)]
 20. Сарapultsev И.А., Козьмин Г.В., Бударков В.А. и др. Транспорт оплавленных радиоактивных частиц и дозовые нагрузки в желудочно-кишечном тракте морских свинок при оральном поступлении "3-х компонентных" модельных частиц // Мат. науч. конф., посвященной 60-летию со дня образования СССР. Покров, 1983. С. 13–16. [Sarapultsev I.A., Kozmin G.V., Budarkov V.A. i dr. Transport oplavlennykh radioaktivnykh chastits i dozovye nagruzki v zheludochno-kishechnom trakte morskikh svinok pri oralnom postuplenii "3-h komponentnykh" modelnykh chastits // Materialy nauchnoy konferentsii posvyaschennoj 60 letiyu so dnya obrazovaniya SSSR. Pokrov, 1983. P. 13–16. (In Russ.)]
 21. Сарapultsev И.А., Расин И.М., Козьмин Г.В. Распределение поглощенных доз в желудочно-кишечном тракте свиней при поступлении с кормом оплавленных радиоактивных частиц // Проблемы животноводства в зоне следа наземного ядерного взрыва / Под общ. ред. Б.Н. Анненкова. Обнинск, 1980. С. 203–210. [Sarapultsev I.A., Rasin I.M., Kozmin G.V. Raspredelenie pogloschennykh doz v zheludochno-kishechnom trakte svinей pri postuplenii s kormom oplavlennykh radioaktivnykh chastits // Problemy zhivotnovodstva v zone sleda nazemnogo yadernogo vzryva / Pod obsch. red. B.N. Annenkov. Obninsk, 1980. P. 203–210. (In Russ.)]
 22. Осанов Д.П., Жихтаев И.А. Дозиметрия излучений инкорпорированных радиоактивных веществ. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1977. 200 с.

- [Osanov D.P., Jiihtarev I.A. Dozimetriya izlucheniya inkorporirovannykh radioaktivnykh veshchestv. Izd. 2-e pere-rab i dop. Moskva: Atomizdat, 1977. 200 p. (In Russ.)]
23. Одейчук А.Н. Обобщенный критерий эффективности моделей прогнозирования временных рядов в информационных системах // Бiонiка iнтелекту. 2009. Т. 70. № 1. С. 113–119. [Odejchuk A.N. Obobshhennyj kriterij effektivnosti modelej prognozirovaniya vremennykh ryadov v informacionnykh sistemax // Bionika intelektu. 2009. V. 70. № 1. P. 113–119. (in Russ.)]
 24. Шилова З.В., Шилов О.И. Теория вероятностей и математическая статистика: учебное пособие. Киров: Изд-во ВГГУ, 2015. 158 с. [Shilova Z.V., Shilov O.I. Teoriya veroyatnostej i matematicheskaya statistika. Uchebnoe posobie. Kirov: Izd-vo VGGU, 2015. 158 p. (in Russ.)]
 25. Агамиров Л. В. Статистические методы анализа результатов научных исследований: учебное пособие по курсам “Методы обработки и представления результатов научных исследований” и “Планирование проведения исследований”. М.: Изд-во МЭИ, 2018. 71 с. [Agamirov L. V. Statisticheskie metody analiza rezultatov nauchnyh issledovanij. Uchebnoe posobie po kursam “metody obrabotki i predstavleniya rezultatov nauchnyh issledovanij” i “planirovanie provedeniya issledovanij”. Moskva: Izd-vo MEI, 2018. 71 p. (in Russ.)]
 26. Osanov D.P. Experimental Validation of a Dosimetric Model of the Gastrointestinal Tract in Cattle // Health Phys. 1974. V. 26. № 6. P. 497–503.
 27. Козьмин Г.В., Спиринов Е.В., Ткаченко В.В. Дозиметрия β -излучения термолуминесцирующим фтористым литием // Радиобиология. 1978. Т. 18. № 5. С. 785–788. [Kozmin G.V., Spirin E.V., Tkachenko V.V. Dozimetriya β -izlucheniya termoluminesiruyuschim fluoristym litiem // Radiobiologiya. 1978. V. 18. № 5. P. 785–788. (in Russ.)]
 28. Hamby D.M. et al. VARSKIN 4: A Computer Code for Skin Contamination Dosimetry // U.S. Nuclear Regulatory Commission. 2011. P. 1–101.
 29. Berger M.J. Distribution of Absorbed Dose Around Point Sources of Electrons and Beta Particles in Water and Other Media // J. Nucl. Med. 1971. V. 12. № 5. P. 5–22.
 30. Сюрдо А.И., Болдеш А.В., Власов М.И. и др. Оценка погрешностей измерения поглощенных доз кожными и глазными дозиметрами с отличающимися толщинами активных и защитных слоев // АНРИ. 2014. Т. 1. № 76. С. 39–45. [Syurdo A.I., Boldesh A.V., Vlasov M.I. i dr. Otsenka pogreshnostej izmereniya pogloshchennykh doz kozhnymi i glaznymi dozimetrami s otlichayuschimisya tolschinami aktivnykh i zaschitnykh sloev // ANRI. 2014. V. 1. № 76. P. 39–45. (in Russ.)]
 31. Ветеринарная радиобиология // Сб. мат. конф. / Под общ. ред. В.А. Бударкова. Покров, 1983. 135 с. [Veterinarnaya radiobiologiya // Sb.mat. konf. / Pod obsch. red. V.A. Budarkova. Pokrov, 1983. 135 p. (in Russ.)]
 32. Rowland M., Tozer T.N. Clinical Pharmacokinetics and Pharmacodynamics: Concepts and Applications. Philadelphia: Wolters Kluwer Health/Lippincott William & Wilkins, 2011. 1267 p.
 33. Sakaguchi E., Itoh H., Uchida S. et al. Comparison of fibre digestion and digesta retention time between rabbits, guinea-pigs, rats and hamsters // Br. J. Nutr. 1987. V. 58. P. 149–158.
 34. De Cuyper A. et al. The uneven weight distribution between predators and prey: comparing gut fill between terrestrial herbivores and carnivores // Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology. 2020. V. 243. P. 110–683.
 35. Stevens C.E., Hume I.D. Contributions of microbes in vertebrate gastrointestinal tract to production and conservation of nutrients // Physiol. Rev. 1998. V. 78. P. 393–427.
 36. Franz R. et al. Intake, selection, digesta retention, digestion and gut fill of two coprophageous species, rabbits (*Oryctolagus cuniculus*) and guinea pigs (*Cavia porcellus*), on a hay-only diet // J. Animal. Physiol. Animal. Nutr. 2011. V. 95. № 5. P. 564–570.
 37. Potkins Z.V., Lawrence T.J., Thomlinson J.R. Effects of structural and non-structural polysaccharides in the diet of the growing pig on gastric emptying rate and rate of passage of digesta to the terminal ileum and through the total gastrointestinal tract // Br. J. Nutr. 1991. V. 65. № 3. P. 391–413.
 38. Partanen K., Jalava T., Valaja J. Effects of a dietary organic acid mixture and of dietary fibre levels on ileal and faecal nutrient apparent digestibility, bacterial nitrogen flow, microbial metabolite concentrations and rate of passage in the digestive tract of pigs // Animal. 2007. V. 1. № 3. P. 389–401.
 39. Wilfart A., Montagne L., Simmins H. et al. Digesta transit in different segments of the gastrointestinal tract of pigs as affected by insoluble fibre supplied by wheat bran // Br. J. Nutr. 2007. V. 98. P. 54–62. <https://doi.org/10.1017/S0007114507692981>
 40. Hoelzel F. The rate of passage of inert materials through the digestive tract // Am. J. Physiol. 1930. V. 92. P. 466–497.
 41. Сарапульцев И.А., Козьмин Г.В., Торубарова А.А., Зенкин А.С. Радиографическое исследование распределения оплавленных радиоактивных частиц в пищеварительном тракте крыс // Сб. мат. конф. Ветеринарная радиобиология. Покров, 1984. С. 10–14. [Sarapulcev I.A., Kozmin G.V., Torubarova A.A., Zenkin A.S. Radiograficheskoe issledovanie raspredeleniya oplavlennykh radioaktivnykh chastic v pishchevaritel'nom trakte krysv // Sb. mat. konf. Veterinarnaya radiobiologiya (Conf. Proc.). Pokrov, 1984. P. 10–14. (In Russ.)]
 42. Shapovalov S., Kozmin G. et al. Damage to the digestive tract of monogastric animals by “hot” radioactive particles // Phys.: Conf. Series. 2020. V. 1701. P. 012026-1–012026-7. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1701/1/012026>
 43. Шаповалов С.Г., Зенкин А.С., Бударков В.А., и др. Поражение пищеварительного тракта моногастрических животных “горячими” радиоактивными частицами // Междунар. науч.-практ. конф. “Ядерно-физические исследования и технологии в сельском хозяйстве”. Обнинск, 2020. С. 109–112. [Shapovalov S.G., Zenkin A.S., Budarkov V.A. i dr. Porazhenie pishchevaritelnogo trakta monogastrichnykh zhivotnykh “goryachimi” radioaktivnymi chastitsami //

- Mezhdunarodnaya nauchno prakticheskaya konferentsiya “yadernо fizicheskie issledovaniya i tehnologii v selskom hozyajstve”. Obninsk, 2020. P. 109–112. (in Russ.)]
44. Бударков В.А., Зенкин А.С., Шаповалов С.Г. Симптоматика и течение радиационного язвенного гастроэнтероколита // III Междунар. (XVI Регионал.) науч. конф. “Техногенные системы и экологический риск”. Обнинск, 2020. С. 297–299. [Budarkov V.A., Zenkin A.S., Shapovalov S.G. Symptomatika i techenie radiacionnogo yazvennogo gastroenterokolita // III Mezhdunar. (XVI Regional.) nauch. konf. “Tekhnogennye sistemy i ekologicheskij risk”. (Conference proceedings) Obninsk, 2020. P. 297–299. (In Russ.)]
 45. Козьмин Г.В., Епимахов В.Г. Закономерности поведения радиоактивных частиц в пищевой цепочке и желудочно-кишечном тракте крупного рогатого скота // Радиационная биология. Радиоэкология. 2015. Т. 55. № 5. С. 1–14. [Kozmin G.V., Epimachov V.G. Zakonomernosti povedeniya radioaktivnykh chastits v pischevoj tsepochke i zheludочно-kishechnom trakte krupnogo rogatogo skota // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya. 2015. V. 55. № 5. P. 1–14. (in Russ.)]
 46. Козьмин Г.В., Епимахов В.Г., Снегирев А.С. и др. Транспорт радиоактивных частиц в желудочно-кишечном тракте овец // Радиационная биология. Радиоэкология. 2018. Т. 58. № 3. С. 305–318. [Kozmin G.V., Epimachov V.G., Snegiryov A.S. i dr. Transport radioaktivnykh chasticz v zheludочно-kishechnom trakte ovez // Radiacionnaya biologiya. Radioekologiya. 2018, V. 58. № 3. P. 305–318. (in Russ.)] <https://doi.org/10.7868/S0869803118030104>

Dosimetric Indicators of Damage to the Digestive Tract of Monogastric Animals by Incorporated Radioactive Particles

S. G. Shapovalov^{a, #} and G. V. Kozmin^a

^a Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

[#]E-mail: shapovalovstanislav93@gmail.com

The analysis of dosimetric parameters of internal irradiation and biological effects in monogastric animals (rats, guinea pigs, pigs) caused by orally received “hot” radioactive particles causing ulcerative necrotic lesions of the gastrointestinal tract is presented. Mathematical models of particle transport and formation of absorbed doses in the digestive tract have been developed. The features of the deep distribution of absorbed doses in the mucous membrane depending on the spectral characteristics of β -radiation of radionuclides that are part of silicate particles are given. It is shown that the main factors in the formation of ulcerative lesions of the digestive tract were the uneven distribution of particles in the contents and the concentration of particles in certain areas of the mucous membrane, followed by the formation of high local dose loads. A dosimetric scale of extremely severe, severe, medium and mild acute radiation ulcerative gastroenterocolitis is proposed, which allows extrapolating the results of model experiments on scenarios of radioactive contamination of the environment by particles of various genesis. The results obtained can be taken into account in the tasks of radiation safety.

Keywords: hot radioactive particles, internal exposure, biological effect, digestive tract, monogastric animals, rats, guinea pigs, pigs, absorbed dose, acute radiation ulcerative gastroenterocolitis

УДК 539.163:631.45:631.95:614.876

ДИНАМИКА КОЭФФИЦИЕНТОВ ПЕРЕХОДА ^{137}Cs В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННУЮ ПРОДУКЦИЮ ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧАЭС: ЗЕРНО, КАРТОФЕЛЬ И ОВОЩИ

© 2023 г. С. В. Фесенко^{1,*}, П. В. Прудников², Е. С. Емлютина¹, И. Э. Епифанова¹, И. Е. Титов¹,
О. А. Шубина¹

¹ Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия

² Центр химизации и сельскохозяйственной радиологии “Брянский”,
Брянск, п. Мичуринский, Брянская область, Россия

*E-mail: Corwin_17F@mail.ru

Поступила в редакцию 18.07.2022 г.

После доработки 28.11.2022 г.

Принята к публикации 21.12.2022 г.

Представлены результаты анализа изменения коэффициентов перехода (K_p) ^{137}Cs в продукцию растениеводства (зерно, картофель и овощи) в районах Брянской области, пострадавших после аварии на ЧАЭС. Коэффициенты перехода в год выпадений, так же, как и динамика K_p в последующем, существенно зависели от исходного плодородия почв, подвергшихся загрязнению. Коэффициенты перехода ^{137}Cs в продукцию в районах с более высоким плодородием были в 3–8 раз (в зависимости от вида растений) ниже, чем в районах с низким агрофоном, а наиболее значительные различия отмечены для зерновых. Снижение K_p носило неравномерный характер. Рассчитаны периоды полуснижения коэффициентов перехода за период с 1986 по 2021 г. Показано, что первые периоды полуснижения, рассчитанные для периода интенсивного проведения агрохимических мероприятий (1987–1991), составили от 0.7 до 1.4 года. Вторые периоды полуснижения варьировали: для зерна от 7.3 до 17.3 года. В некоторых районах после сильного снижения концентраций ^{137}Cs в продукции после 1994 г. отмечен медленный рост K_p ^{137}Cs в зерно, что объясняется недостаточной компенсацией снижения плодородия почв геохимическим связыванием ^{137}Cs в почве. В последующем динамика загрязнения продукции определялась разнонаправленными процессами, т.е. увеличением поступления ^{137}Cs в растения, которое компенсировалось естественным снижением биологической доступности радионуклидов в почвах под действием геохимических процессов. В районах с интенсивным применением контрмер в сельском хозяйстве уменьшение K_p в сельскохозяйственную продукцию определялось в большей степени влиянием защитных мероприятий. В районах с ограниченным применением контрмер преобладающий вклад в снижение K_p вносили естественные биогеохимические процессы, определяющие связывание радионуклидов почвенно-поглощающим комплексом. Отмечены ограничения в применении подхода, основанного на оценке периодов полуснижения, и необходимость использования истории применения агрохимических мероприятий, а также исходного агрофона для прогноза поступления ^{137}Cs в растения.

Ключевые слова: Чернобыльская АЭС, коэффициент перехода, сельскохозяйственная продукция, юго-западные районы Брянской области, мониторинг в сельском хозяйстве, ^{137}Cs

DOI: 10.31857/S0869803123020042, **EDN:** EOQNHXJ

Ликвидация последствий аварии на ЧАЭС в сельском хозяйстве потребовала выполнения многолетних радиоэкологических исследований по оценке закономерностей поведения радионуклидов в разнообразных условиях окружающей среды [1–5]. Для решения задач, связанных со смягчением последствий аварии в АПК загрязненных регионов, в России была создана система радиационного контроля и мониторинга сельскохозяйственных объектов, и проведено ее техническое оснащение. Было выполнено более 250 тыс. измерений содержания ^{137}Cs в продукции расте-

ниеводства (включая корма для животных) и более 1 млн измерений содержания радионуклидов в продукции животноводства. Внедрение программ радиационного мониторинга позволило принять оперативные меры по переработке продукции, не соответствующей нормативам, и предложить стратегии защитных мероприятий, обеспечивающих максимальный эффект от их внедрения. В то же время объемы и сроки проведения мониторинга различных видов продукции существенно отличались в зависимости от необходимости в их контроле. Период мониторинга

содержания ^{137}Cs в овощах и картофеле охватывал 21 год после аварии, тогда как измерения содержания ^{137}Cs в зерне и кормовых культурах продолжались до 2021 г.

Начиная с 1986 г. в пострадавших районах широко применялись агрохимические мероприятия, направленные на снижение поступления ^{137}Cs в сельскохозяйственную продукцию. Площади сельскохозяйственных угодий, на которых проводились работы, постоянно увеличивались, достигнув к 1991 г. 7700 тыс. га [4, 5]. Проводимые мероприятия оказали существенное влияние на поступление радионуклидов в сельскохозяйственную продукцию, являясь важным фактором, определяющим динамику коэффициентов перехода (K_p) из почвы в растения в этот период времени [1]. В настоящее время объемы проведения мониторинга в районах, пострадавших после аварии на ЧАЭС, существенно снизились и проводятся в очень ограниченных масштабах, а параметры биологической доступности ^{137}Cs стабилизировались и не наблюдается их существенных изменений [10].

Для проведения настоящих исследований была создана база данных по концентрациям ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции, содержащая информацию, накопленную за 35 лет, прошедших после аварии на Чернобыльской АЭС. Выполнен анализ динамики изменения содержания этого радионуклида в продукции растениеводства: зерне, картофеле, овощах [11, 12]. Это позволило выявить факторы, определяющие интенсивность поступления ^{137}Cs в продукцию растениеводства, и дать прогноз ее загрязнения в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС [11]. В то же время при обобщении этих данных не учитывалась плотность загрязнения сельскохозяйственных угодий, что ограничивает их ценность для сравнения с информацией, полученной в других регионах.

К числу основных параметров, используемых для прогнозирования содержания радионуклидов в продукции сельского хозяйства, относятся коэффициенты перехода радионуклида из почвы в растения (K_p). В наших предыдущих работах представлены данные по динамике K_p в основные виды растений и продукции растениеводства на основе информации, полученной в период с 1987 по 1992 г. [1–4, 6, 7]. Показано, что естественное (без применения защитных мероприятий) снижение коэффициентов перехода носило неравномерный характер и описывалось, в большинстве случаев, двухкомпонентной моделью. При этом точность оценки второй компоненты была довольно низкой, что ограничивало использование этих данных для долгосрочных прогнозов радиоактивного загрязнения продукции.

Целью исследования, представленного в настоящей статье, являлся анализ наблюдающихся

на протяжении более чем 30-летнего периода после аварии на Чернобыльской АЭС закономерностей изменения K_p ^{137}Cs в зерно, картофель и овощи. Предполагается, что данная статья будет дополнена публикациями, представляющими аналогичные данные о коэффициентах перехода ^{137}Cs в кормовые культуры, молоко и мясо, завершая цикл многолетних исследований по закономерностям миграции этого радионуклида в сельскохозяйственных пищевых цепочках.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Используемые данные

Для оценки K_p ^{137}Cs в продукцию растениеводства (зерно, картофель и овощи) использовали данные мониторинга, проводимого центром Агрохимрадиология “Брянский” в юго-западных районах Брянской области: Гордеевском, Злынковском, Климовском, Клинцовском, Красnogорском, Новозыбковском и Стародубском [11, 16]. В рамках этих работ в период с 1986 по 2021 г. отбирали основные виды продукции растениеводства, включая зерно, картофель и овощи, производимые в хозяйствах, находящихся на загрязненной территории. Объемы проведения мониторинга содержания ^{137}Cs в продукции в различные периоды времени после аварии на Чернобыльской АЭС были не одинаковы (рис. 1).

Информация, использованная для оценки коэффициентов перехода, содержала более 30 тыс. значений концентрации ^{137}Cs в зерне, измеренных в период с 1986 по 2021 г., более 9 тыс. в картофеле, измеренных с 1986 по 2007 г. и более 5 тыс. в овощах, измеренных с 1986 по 2010 г. [11, 16].

Наибольшее количество проб растениеводческой продукции при проведении мониторинга было отобрано в 1986–1993 гг. В этот период наблюдалось и наиболее активное применение защитных мероприятий в сельском хозяйстве.

Наряду с радиационным мониторингом загрязнения сельскохозяйственной продукции, в юго-западных районах Брянской области Брянским центром “Агрохимрадиология” проведено несколько циклов детального обследования плотности загрязнения ^{137}Cs почв сельскохозяйственных земель. Это позволило определить коэффициенты перехода этого радионуклида в растения и сельскохозяйственную продукцию.

Для расчета коэффициентов перехода использовали результаты всех обследований, проведенных до 2021 г. При этом данные каждого обследования пересчитывали к плотности загрязнения почв 1986 г. В качестве оценки плотностей загрязнения в настоящей работе использовали средние геометрические значения, рассчитанные по данным всех туров обследования [16, 17].

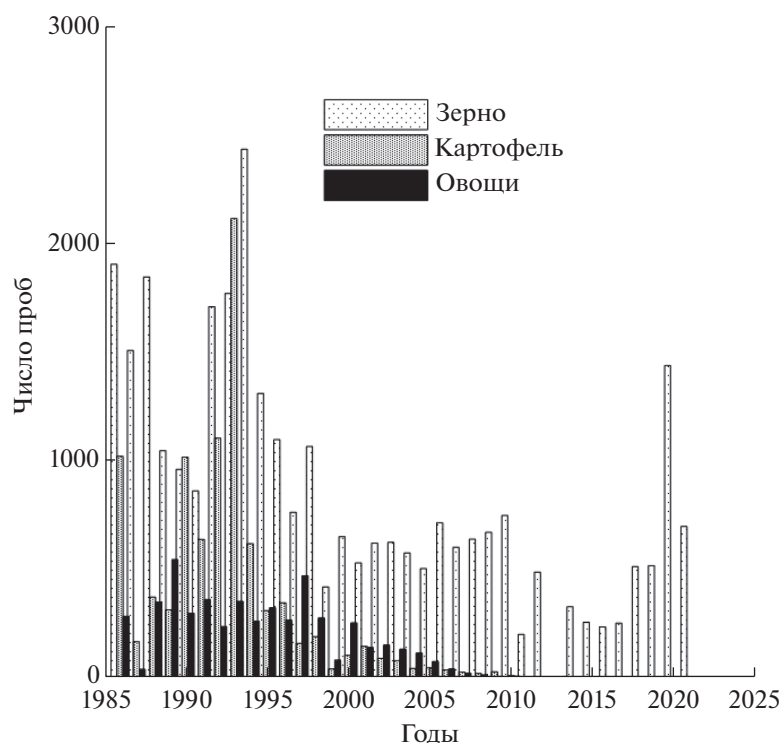


Рис. 1. Число проб зерна, картофеля и овощей, отобранных в юго-западных районах Брянской области в 1986–2021 гг. [11].
Fig. 1. Number of grains, potato and vegetable samples taken in the southwestern districts of Bryansk Region in 1986–2021 [11].

Параметры

По определению, агрегированный коэффициент перехода (K_n) представляет собой отношение

концентрации радионуклидов в продукции (Бк/кг) к плотности загрязнения почвы, на которой эта продукция получена (кБк/м²) [2].

$$K_n(t) = \frac{\text{Концентрация радионуклида в продукции, Бк/кг}}{\text{Плотность загрязнения почвы, кБк/м}^2} \quad (1)$$

Периоды полуснижения коэффициентов перехода ($T_{1/2}$) рассчитывали как промежуток времени, в течение которого K_n в выделенные виды продукции под влиянием всех факторов уменьшается в 2 раза [2, 3]. Таким образом, для оценки периодов полуснижения K_n использовали следующее выражение:

$$K_n(t) = K_n(t_k) \times e^{-\lambda \times t}, \quad T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}. \quad (2)$$

Реабилитационные мероприятия

В рассматриваемый период времени (1986–2021 гг.) на динамику изменения коэффициентов перехода ^{137}Cs в сельскохозяйственную продукцию значительное влияние оказывали агрохимические мероприятия, проводимые в загрязненных районах в рамках союзных и федеральных программ по преодолению последствий аварии

на Чернобыльской АЭС [5, 6]. Особенно интенсивно мероприятия применялись в первые годы после Чернобыльской аварии [1–5, 11, 12]. В этот период в качестве основной защитной меры, обеспечивающей снижение поступления цезия в зерновые и пропашные культуры, применяли повышенные дозы минеральных удобрений. Дополнительные дозы калийных удобрений на пашне составляли: в 1986–1990 гг. 56 кг/га K_2O [4, 11, 16]. Начиная с 1991 г. в хозяйствах загрязненных районов Брянской и других областей объемы проведения этих мероприятий начали снижаться, а применение удобрений на 1 га пашни в этих районах уменьшилось до 8 раз. Более детальное описание проведения защитных мероприятий в АПК в период после аварии на Чернобыльской АЭС представлено в публикациях [5, 8, 9, 11, 16].

Таблица 1. Геометрические средние содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства, нормированные на плотность выпадений на момент уборки, произведенной в 1986 г. в юго-западных районах Брянской области**Table 1.** Geometric means of ^{137}Cs concentrations in crops normalized to the deposition density at the time of harvesting performed in 1986 in the southwestern districts of the Bryansk region

Районы	Плотность выпадений на пашне, кБк/м^2	Концентрация ^{137}Cs , нормированная на плотность выпадений, $(\text{Бк/кг})/(\text{кБк/м}^2)$		
		зерно	картофель	овощи
Гордеевский	366 ± 24	2.6	0.19	0.34
Злынковский	361 ± 31	0.48	0.26	0.44
Климовский	156 ± 20	2.2	0.51	0.58
Клинцовский	232 ± 31	2.6	1.76	0.67
Красногорский	321 ± 90	4.3	0.96	0.29
Новozyбковский	526 ± 10	0.26	0.19	0.27

КОНЦЕНТРАЦИИ ^{137}Cs В ПРОБАХ ЗЕРНА, КАРТОФЕЛЯ И ОВОЩЕЙ В 1986 ГОДУ

Коэффициенты перехода ^{137}Cs в продукцию для 1986 г. можно классифицировать как K_p в какой-то мере условно, поскольку загрязнение продукции было связано с аэральным загрязнением растений, а также пылеобразованием при уборке. В то же время, рассматривая K_p как интегральный параметр, обобщающий все пути поступления, мы использовали этот параметр для всего периода наблюдений, включая 1986 г.

Данные по коэффициентам перехода ^{137}Cs в рассматриваемые виды сельскохозяйственной продукции приведены в табл. 1. Количество измерений, использованных для оценки K_p 1986 г., составило более 100 тыс. проб почвы, 1907 проб зерна, 1024 проб картофеля и 286 проб овощей.

Максимальные геометрические средние значения K_p ^{137}Cs в зерно в 1986 г. ($4.3 (\text{Бк/кг})/(\text{кБк/м}^2)$) отмечены в Красногорском районе. Высокие и довольно близкие значения ($2.2\text{--}2.6 (\text{Бк/кг})/(\text{кБк/м}^2)$) зафиксированы в Гордеевском, Клинцовском и Климовском районах, а минимальные, примерно в 10 раз ниже, в Новозыбковском и Злынковском районах. Различия между загрязненными районами в меньшей степени отмечались для картофеля и овощей. Наибольшие значения K_p в картофель и овощи были зарегистрированы в Клинцовском районе, а минимальные значения были характерны для Новозыбковского района. При этом следует отметить отсутствие явной зависимости загрязнения зерна и картофеля от плотности выпадений.

Полученные оценки показывают, что K_p для ^{137}Cs в зерно, рассчитанные для Злынковского и Новозыбковского районов (0.26 и $0.48 (\text{Бк/кг})/(\text{кБк/м}^2)$), статистически достоверно отличаются от коэффициентов перехода, рассчитанных для остальных четырех районов, находящихся в диапазоне

от 2.2 до $4.3 (\text{Бк/кг})/(\text{кБк/м}^2)$. Следует также отметить, что коэффициенты перехода для различных видов продукции растениеводства, производимых в этих районах, довольно близки и находятся в диапазоне от 0.19 до $0.48 (\text{Бк/кг})/(\text{кБк/м}^2)$. К основным отличиям между районами относятся уровни плодородия почв пахотных земель.

Сравнивая агрохимическую характеристику почв Злынковского и Новозыбковского районов с другими юго-западными районами Брянской области (Гордеевским, Климовским, Клинцовским и Красногорским), необходимо отметить высокий достигнутый уровень плодородия почв в этих двух районах. В почвах пахотных земель этих районов средневзвешенное содержание подвижного калия составляло 180 и 174 мг/кг , подвижного фосфора 193 и 215 мг/кг , а степень кислотности (pH_{KCl}) 6.1 и 5.9 соответственно. Такие уровни содержания основных элементов питания в почвах обеспечивали бездефицитный баланс калия, кальция и фосфора в почвенном растворе, что в значительной степени снижало переход ^{137}Cs в растения.

Исходя из этого критерия районы были разделены на две группы: Гордеевский, Климовский, Клинцовский, Красногорский районы (группа 1) и Злынковский (с 1959 до 1988 г. был в составе Новозыбковского района), Новозыбковский районы (группа 2). При этом необходимо отметить, что коэффициенты перехода ^{137}Cs в зерно Новозыбковского и Злынковского районов, рассчитанные по состоянию на 1986 г., статистически отличаются от коэффициентов перехода, оцененных для остальных районов. Вследствие этого оценки статистических характеристик коэффициентов перехода в зерно, картофель и овощи в 1986 г. были сделаны как для территории радиоактивного загрязнения в целом, так и отдельно для двух групп выделенных районов (табл. 2).

Таблица 2. Статистические параметры содержания $K_p^{137}\text{Cs}$ в продукцию растениеводства, рассчитанные на момент уборки в 1986 г., (Бк/кг)/(кБк/м²)**Table 2.** Statistical parameters of ^{137}Cs T_{ag} to plant products, calculated for the time of harvest in 1986, (Bq/kg)/(kBq/m²)

Районы	N	Среднее	Статистическое отклонение	Геометрическое среднее	Медиана	95%-ные доверительные интервалы	
						нижний	верхний
Зерно							
1 группа	49	3.00	1.71	2.6	2.35	2.52	3.47
2 группа	25	0.38	0.22	0.33	0.32	0.28	0.35
Все районы	74	2.1	1.9	1.3	1.7	1.69	2.54
Картофель							
1 группа	51	0.81	0.63	0.60	0.65	0.64	0.99
2 группа	25	0.23	0.10	0.21	0.22	0.19	0.28
Все районы	76	0.62	0.58	0.43	0.38	0.49	0.76
Овощи							
1 группа	37	0.56	0.35	0.46	0.51	0.44	0.68
2 группа	17	0.38	0.19	0.33	0.32	0.25	0.78
Все районы	54	0.50	0.32	0.42	0.42	0.41	0.59

Авария на Чернобыльской АЭС произошла в конце апреля 1986 г. до начала посадок картофеля и овощей. Яровые зерновые и зернобобовые культуры были высеяны не на всей планируемой площади, а около 70% посевных площадей зерновых культур в юго-западных районах Брянской области составляли озимые, механизмы загрязнения которых в 1986 г. отличались от механизмов загрязнения яровых зерновых культур, картофеля и овощей. В первый год после аварии корневое поступление в озимые растения было возможно только из верхнего горизонта почвы, тогда как в яровые и пропашные культуры поступление радионуклидов происходило из всего пахотного слоя. Вследствие этого параметры перехода ^{137}Cs в зерно озимых культур отличались от параметров загрязнения, характерных для яровых, а доля озимых в урожае существенно может отражаться на средних характеристиках загрязнения урожая.

Среднее значение $K_p^{137}\text{Cs}$ в зерно, производимое в юго-западных районах Брянской области, было примерно в 5 раз выше, чем в картофеле и в 6 раз, чем в овощах. Эти отношения значительно варьировали в зависимости от района и менялись от 14.8 — (отношение K_p для зерна к K_p для овощей) в Красногорском районе до 0.96 — в Новозыбковском районе.

Во всех рассмотренных случаях средние значения были больше медианы и геометрического среднего, а коэффициент вариации данных варьировал от 0.5 до 0.9. Это позволяет сделать вывод, что распределение этого параметра носят для рассмотренных ситуаций асимметричный характер, что определяет необходимость использовать логнормальное распределение для вероятност-

ных оценок загрязнения сельскохозяйственной продукции.

Полученные результаты имеют важное значение для практики аварийного реагирования и могут быть использованы для анализа широкого спектра сценариев загрязнения окружающей среды. Для оценки K_p в год радиоактивных выпадений в регионах с плодородными почвами и достаточно высоким уровнем земледелия для прогнозирования загрязнения продукции растениеводства можно предложить значение 0.33 (Бк/кг)/(кБк/м²) для всех рассматриваемых видов продукции. Для регионов с низким плодородием целесообразно использовать более высокие оценки, полученные для группы, включающей Гордеевский, Климовский, Клиновский и Красногорский районы, а именно, 2.6, 0.6 и 0.46 (Бк/кг)/(кБк/м²) для зерна, картофеля и овощей соответственно. Для консервативных оценок в обоих случаях можно использовать верхние доверительные интервалы, приведенные в табл. 2.

Периоды полуснижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в продукцию растениеводства

Периоды полуснижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в зерно и картофель и овощи, производимые в юго-западных районах Брянской области в период с 1987 по 2021 г., приведены в табл. 3. Для зерна можно выделить три временных интервала, периоды полуснижения между которыми статистически различны (рис. 1): с 1987 по 1990 г., с 1991 по 2010 г. и с 2011 по 2021 г. Первый период охватывает промежуток времени, когда агрохимические мероприятия применялись в постоянно

Таблица 3. Периоды полуснижения $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$ в основные виды продукции растениеводства в юго-западных районах Брянской области
Table 3. Half-lives of ^{137}Cs T_{ag} to major crops produced in the southwestern districts of the Bryansk region

Районы	$T_{1/2}^1$, годы	R^2	$T_{1/2}^2$, годы	R^2	$T_{1/2}^3$, годы	R^2
Зерно						
Гордеевский	0.7	0.96	–10.4 (1991–2011)	0.63	14.7 (2012–2020)	0.46
Злынковский	1.7	0.78	13.5 (1991–2020)	0.68		
Климовский	0.8	0.91	17.3 (1991–2017)	0.54		
Клинцовский	0.8	0.36	–20.4 (1991–2007)	0.39	6.9 (2008–2020)	
Красногорский	0.8	0.87	–18.5 (1991–2011)	0.28	17.4 (2012–2020)	0.26
Новozyбковский	1.3	0.92	7.5 (1991–2003)	0.88	–17.3 (2004–2020)	0.36
Стародубский			23.9 (1995–2020)	0.7		
Картофель						
Гордеевский	1.1	0.90	4.1 (1991–1997)	0.91	12.8 (1997–2007)	0.85
Злынковский	0.7	0.96	20.6 (1991–2006)	0.18		
Климовский	0.7	0.95	7.4 (1991–2005)	0.38		
Клинцовский	0.7	0.77	7.4 (1991–2007)	0.42		
Красногорский	2.4	0.86	14.7 (1991–2003)	0.62		
Новozyбковский	2.3	0.82	16.2 (1991–2006)	0.56		
Овощи						
Злынковский	1.0	0.91	8.5 (1991–2004)	0.41		
Климовский	0.8	0.69	43 (1991–2007)	0.21		
Клинцовский	0.9	0.99	18.2 (1991–2007)	0.49		
Новozyбковский	1.4	0.86	16.5 (1991–2007)	0.57		

¹Период полуснижения рассчитан на основе данных для 1987–1990 гг.

увеличивающих масштабах, второй, когда объемы их проведения ограничивались относительно небольшим количеством “критических” хозяйств, и третий период, когда эффект от мероприятий был практически нивелирован, а снижение загрязнения продукции определялось главным образом естественным снижением биологической доступности ^{137}Cs в почве и радиоактивным распадом.

Первые периоды (1987–1990 гг.) полуснижения $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$ в зерно, картофель и овощи довольно близки и находятся в большинстве случаев в диапазоне от 0.7 до 1.0 года. Более длинные периоды 1.3–2.4 отмечены для Новozyбковского и Злынковского районов (зерно). Отмеченные расхождения, по-видимому, связаны с различиями в уровнях плодородия почв, сложившихся в этих районах к 1986 г., поскольку на более бедных почвах Гордеевского, Красногорского и Клинцовского районов применение больших доз мине-

ральных удобрений давало больший эффект, чем на более плодородных почвах Новozyбковского района.

Снижение $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$ в зерно замедлилось во всех районах после 1991 г., а периоды полуснижения (с 1991 по 2011 г.) в большинстве случаев находятся в диапазоне от 7.4 до 17.3 года. В Стародубском районе проведение мониторинга продукции растениеводства было начато в 1993 г., что позволяет оценить только второй период полуснижения коэффициентов перехода, который оказался равным 23.9 годам. В этот период особое значение приобретает зависимость поступления радионуклидов от погодных условий, поскольку в зависимости от погодных условий конкретного года коэффициенты перехода из почвы в растения могут изменяться до 5 раз [1, 4]. Этим во многом объясняются высокая вариабельность $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$ в продукции и недостаточно высокие значения R^2 в усло-

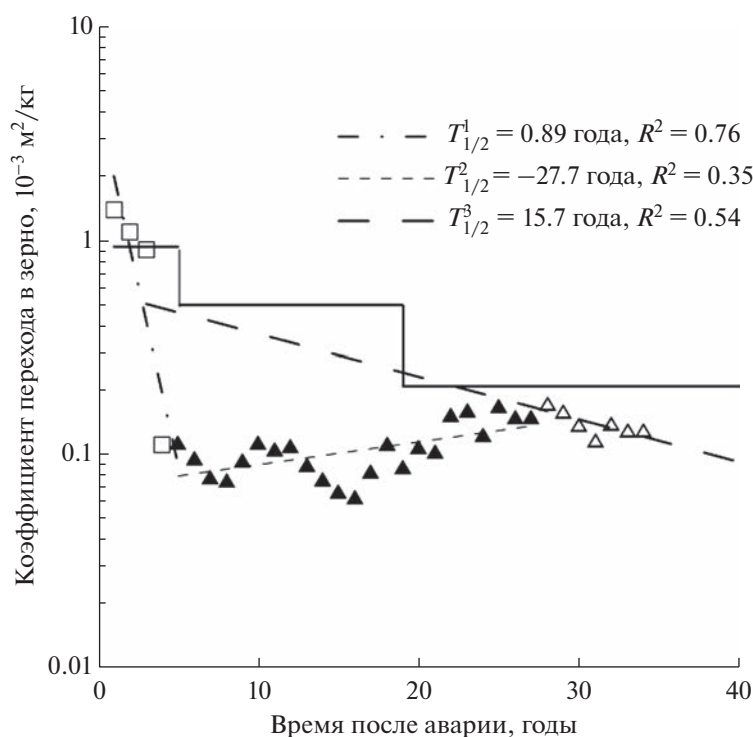


Рис. 2. Динамика снижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в зерно юго-западных районов Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС. Сплошная линия показывает значения $K_{\text{п}}$, приведенные в рекомендациях по ведению АПК и периоды их применения.

Fig. 2. Dynamics of ^{137}Cs aggregated transfer factor values (T_{ag}) to grain of the south-western districts of the Bryansk region after the Chernobyl accident. The solid line shows the T_{ag} values given in the recommendations for the agriculture and the periods of their application.

виях, когда влияние других факторов незначительно, либо они компенсируют друг друга.

Закономерности динамики $K_{\text{п}}^{137}\text{Cs}$ в продукцию растениеводства

Обобщенные данные по динамике коэффициентов перехода ^{137}Cs в зерно, картофель и овощи представлены на рис. 2–4.

Также на этих рисунках приводятся значения $K_{\text{п}}$, предложенные для прогнозирования поступления ^{137}Cs в продукцию в различные периоды времени после аварии на Чернобыльской АЭС (табл. 4). Первые (временные) рекомендации по ведению агропромышленного производства в Белорусской ССР на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению, были изданы ВНИИРАЭ (на тот момент времени ВНИИСХР) уже в середине 1986 г. [18] (табл. 4). В этих рекомендациях были представлены значения коэффициентов перехода для второго года после аварии и на последующий период до 1991 г. (рис. 2–4). Для оценки коэффициентов перехода использовались радиоэкологические данные исследований, выполненные на глобальных выпадениях и в зоне аварии на Южном Урале. В последующем

значения коэффициентов перехода уточнялись на основе текущей информации [18–21].

В 1991 г. вышли Рекомендации по ведению сельского хозяйства в условиях радиоактивного загрязнения территории в результате аварии на Чернобыльской АЭС на период 1991–1995 гг., которые содержали уточненные значения коэффициентов перехода, актуальные на начало 90-х годов, которые и использовались в восстановительный период после аварии на Чернобыльской АЭС [19].

В 2005 г. ВНИИРАЭ опубликовал Руководство по ведению сельскохозяйственного производства на радиоактивно загрязненных территориях Республики Беларусь и Российской Федерации, которые также включали рекомендации по выбору $K_{\text{п}}$ в продукцию растениеводства в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС [20].

Во всех этих документах были предложены значения коэффициентов перехода для почв различного механического состава, что позволяло проводить их более точную адаптацию к условиям загрязненных регионов (табл. 4). Для сравнения с данными мониторинга на рис. 2–4, данные табл. 4 были пересчитаны на основе данных руко-

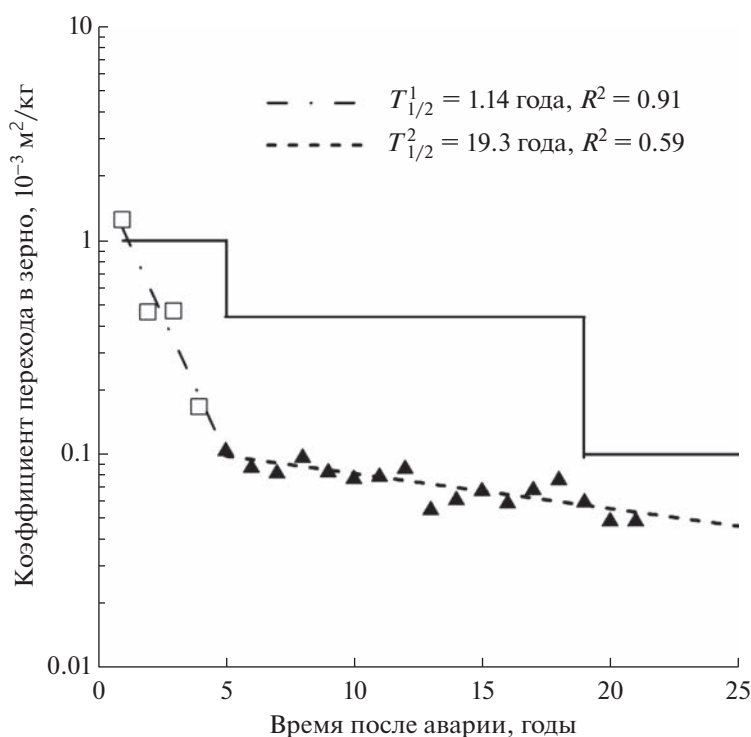


Рис. 3. Динамика снижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в картофель юго-западных районов Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС. Сплошная линия показывает значения $K_{\text{п}}$, приведенные в рекомендациях по ведению АПК и периоды их применения.

Fig. 3. Dynamics of ^{137}Cs transfer factors reduction in potatoes of south-western districts of Bryansk region after the Chernobyl accident. The solid line shows the T_{ag} values given in the recommendations for the agriculture and the periods of their application.

водств [18–20] с учетом почвенных характеристик рассматриваемых районов [21].

Видно, что рекомендуемые значения в большинстве случаев, за исключением $K_{\text{п}}$ в зерно в 1987–1989 гг. и картофель в 1987 г., давали консервативную оценку содержания ^{137}Cs в продукции растениеводства, достаточно адекватно отражая динамику снижения $K_{\text{п}}$. Так, в период с 1991 по 2005 г., использование параметров, предложенных в работе [19], в 5–7 раз превышали $K_{\text{п}}$, представленные в настоящей работе. В первую очередь эти различия объяснялись тем, что активное применение агрохимических мероприятий позволило добиться существенного снижения загрязнения продукции, а также постепенным снижением коэффициентов перехода в результате сорбции цезия в почве. Результаты расчетов на основе $K_{\text{п}}$, предложенных для отдаленного периода [20], когда влияние мероприятий нивелировалось, превышали реальные данные в 2–3 раза (рис. 4).

Динамика снижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в продукцию растениеводства носила неравномерный характер. Можно выделить несколько периодов времени после аварии, когда

динамика снижения $K_{\text{п}}$ ^{137}Cs в продукцию существенно различалась. Активное проведение мероприятий, таких как известкование кислых почв и внесение повышенных доз минеральных удобрений способствовали быстрому снижению коэффициентов перехода в продукцию растениеводства. Другим фактором, способствующим уменьшению $K_{\text{п}}$ ^{137}Cs в продукцию, является снижение биологической доступности ^{137}Cs в результате необменной фиксации его в почвенном поглощающем комплексе [13–15]. Процесс сорбции ^{137}Cs обычно описывается двухкомпонентной экспоненциальной моделью [13–15], при этом первый период полуснижения после однократного загрязнения существенно короче второго периода,

Для первого периода времени характерны самые короткие периоды полуснижения $K_{\text{п}}$ ^{137}Cs в продукцию — от 0.8 (картофель) до 1.4 года (зерно). В целом эти данные согласуются с результатами более ранних оценок, приведенных в работах [2, 9, 13, 14, 22, 23].

Начиная с 1991 г. после аварии, объемы проведения защитных мероприятий существенно сократились, что непосредственно отразилось на темпах поступления ^{137}Cs в продукцию. Более то-

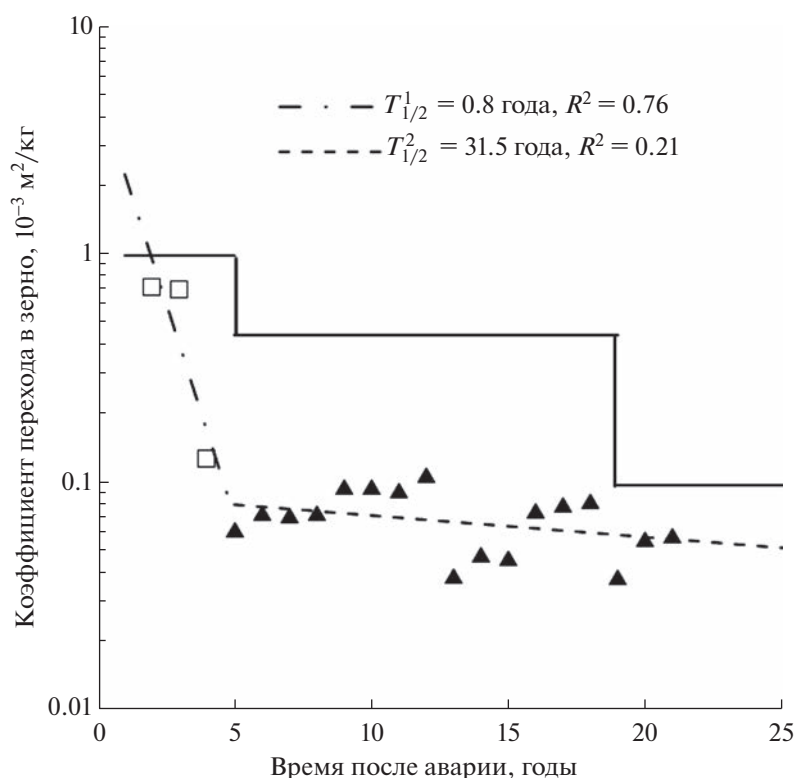


Рис. 4. Динамика снижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в овощи юго-западных районов Брянской области после аварии на Чернобыльской АЭС. Сплошная линия показывает значения $K_{\text{п}}$, приведенные в рекомендациях по ведению АПК и периоды их применения.

Fig. 4. Dynamics of ^{137}Cs aggregated transfer factors to vegetables produced in the south-western districts of the Bryansk region after the Chernobyl accident. The solid line shows the T_{ag} values given in the recommendations for the agriculture and the periods of their application.

го, применение минеральных удобрений в низких дозах приводило к росту загрязнения сельскохозяйственной продукции выше уровня, характерного для применения оптимальных доз удобрений.

В этот период увеличение поступления ^{137}Cs в растения за счет ухудшения плодородия почв не могло компенсироваться естественным снижением биологической доступности радионуклида, что предопределяло общее увеличение коэффициентов перехода.

Внедрение мероприятий ФЦП “Сохранение и восстановление плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения и агроландшафтов как национального достояния России на 2006–2013 годы” позволило в определенной степени приостановить снижение плодородия почв, а динамика уменьшения ^{137}Cs стала соответствовать параметрам естественного снижения поступления радионуклидов в растения [12].

В результате этих процессов снижение $K_{\text{п}}$ радионуклидов в продукцию сильно замедлилось, а период полуснижения, в зависимости от вида

продукции, составил 31.5 года для овощей, 19.3 года — для картофеля и 15.7 года — для зерна.

Следует отметить отличия в динамике поступления ^{137}Cs в зерновые культуры, картофель и овощи (рис. 2–4). В первую очередь это может быть связано с тем, что в основе системы удобрений зерновых культур лежит применение минеральных удобрений, особенно калийных удобрений, тогда как значительную долю в питании картофеля и корнеплодов играют органические удобрения и повышенные дозы применения калийных и фосфорных удобрений. Вследствие этого резкое снижение поставок минеральных удобрений в 1990-х годах в большей степени сказалось на обеспеченности элементами минерального питания зерновых культур, в меньшей степени — картофеля и овощей.

Полученные результаты позволяют выделить два типа динамики изменения коэффициентов перехода после аварии на Чернобыльской АЭС, примеры которых представлены на рис. 5 и 6.

К первому типу можно отнести динамику $K_{\text{п}}$, характеризующуюся сильным снижением в на-

Таблица 4. Значения коэффициентов перехода, рекомендованные для прогнозирования загрязнения урожая в различные периоды времени после аварии на ЧАЭС**Table 4.** Aggregated transfer factor values recommended for predicting crop contamination in different time periods after the Chernobyl accident

Год выхода	Культура	Часть урожая	Почвы – дерново-подзолистая: механический состав		
			песчаная	супесчаная	среднесуглинистая
1986 [18]	Пшеница озимая	Зерно	0.5	0.26	0.07
	Пшеница яровая	Зерно	1.5	0.7	0.17
	Рожь	Зерно	0.5	0.26	0.07
	Ячмень	Зерно	1.3	0.66	0.13
	Картофель	Клубнеплоды	1	0.7	0.19
	Овощи	Корнеплоды	1.3	1.65	0.29
1991 [19]	Пшеница озимая	Зерно	0.7	0.3	0.1
	Рожь озимая	Зерно	0.6	0.3	0.1
	Пшеница яровая	Зерно	0.9	0.5	0.17
	Ячмень	Зерно	0.8	0.6	0.2
	Картофель	Клубнеплоды	0.5	0.4	0.3
	Овощи	Корнеплоды	0.5	0.3	0.2
2005 [20]	Рожь озимая	Зерно	0.20		0.06
	Ячмень	Зерно	0.30		0.1
	Картофель	Клубнеплоды	0.10		0.05
	Овощи	Корнеплоды	0.15		0.1

чальный период, обусловленное интенсивным применением агрохимических мероприятий в районах с низким агрофоном. В этот период обеспеченность растений быстро достигает нормы и снижается существенно ниже потребности растений в элементах минерального питания. После практически полного прекращения применения минеральных удобрений наблюдается рост K_n до уровня обеспеченности растений элементами минерального питания в период времени до аварии на ЧАЭС, и затем отмечается снижение K_n , которое определяется естественным связыванием радионуклидов в почве (старение цезия) (рис. 5). Экстраполяция тренда, характерного для отдаленного периода (который можно принять как тренд естественного снижения K_n), к первым годам после выпадений совпадает с 3–4 годом после выпадений, т.е. соответствуют второй компоненте связывания цезия в почвенно-поглощающем комплексе почвы. В случае достаточно высокого плодородия почв эффект от применения агрохи-

мических защитных мероприятий ниже, и прекращение их применения не приводит к существенному увеличению поступления ^{137}Cs в растения (рис. 6).

Снижение K_n в это время определяется “старением” радионуклидов в почве. Примерно через 25 лет после выпадений K_n в продукцию растениеводства в районах с более высоким и низким агрофоном сближаются. При этом можно ожидать, что по прошествии этого времени динамика коэффициентов перехода в этих районах будет близка. Отметим, что эти закономерности носят достаточно общий характер и наблюдаются как для зерновых, так и для картофеля и овощей (рис. 5 и 6). Вследствие этого при оценке снижения K_n ^{137}Cs в продукцию необходимо учитывать как плодородие почв и особенности возделывания этих культур, так и историю применения мероприятий, направленных на снижение поступления ^{137}Cs в растения.

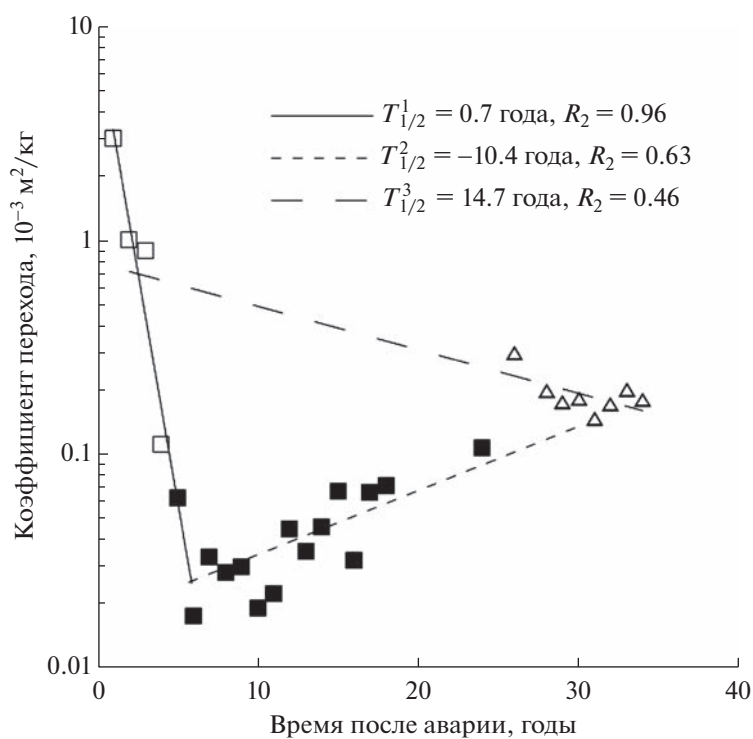


Рис. 5. Динамика изменения $K_{\text{п}}$ в ^{137}Cs в зерно в Гордеевском районе Брянской области.

Fig. 5. Dynamics of ^{137}Cs T_{ag} values to grain produced in the Gordeyevsky district of the Bryansk region.

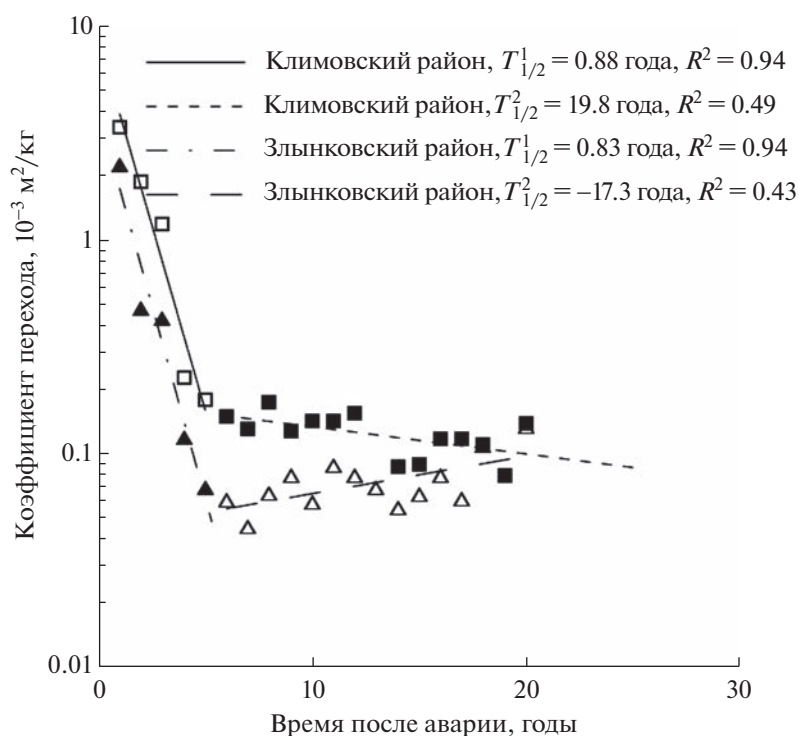


Рис. 6. Динамика изменения $K_{\text{п}}$ ^{137}Cs в картофель в Климовском и Злынковском районах Брянской области.

Fig. 6. Dynamics of ^{137}Cs T_{ag} values to potato produced in the Klimovsky and Zlunkovsky districts of the Bryansk region.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Снижение K_p в продукцию растениеводства в районах, пострадавших после аварии на Чернобыльской АЭС, носило сложный характер. Коэффициенты перехода в год выпадений, так же, как и динамика K_p в последующем, существенно зависели от исходного плодородия почв, подвергшихся загрязнению. Коэффициенты перехода ^{137}Cs в продукцию в районах с более высоким плодородием были в 3–8 раз (в зависимости от вида растений) ниже, чем в районах с низким агрофоном, а наиболее значительные различия отмечены для зерновых. Снижение K_p в районах с низким плодородием происходило более быстро, а достигнутый эффект по снижению K_p был выше, чем в районах с высоким плодородием. В некоторых районах после сильного снижения концентраций ^{137}Cs в продукции после 1991 г. отмечен медленный рост K_p ^{137}Cs в зерно, что объясняется недостаточной компенсацией снижения агрофона геохимическим связыванием ^{137}Cs в почве. В последующем динамика загрязнения продукции определялась разнонаправленными процессами, т.е. увеличением поступления ^{137}Cs в растения, которое компенсировалось естественным снижением биологической доступности радионуклидов в почвах под действием геохимических процессов, называемых в литературе “старением цезия”. В районах с интенсивным применением контрмер в сельском хозяйстве уменьшение K_p в сельскохозяйственную продукцию определялось в большей степени влиянием защитных мероприятий. В районах с ограниченным применением контрмер преобладающий вклад в снижение K_p вносили естественные биогеохимические процессы, определяющие связывание радионуклидов почвенно-поглощающим комплексом почвы. Вследствие этого адекватный прогноз поступления радионуклидов в растения невозможен без учета истории применения агрохимических мероприятий и исходного плодородия почв, подвергшихся загрязнению.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность д-ру сельскохозяйственных наук Николаю Николаевичу Цыбулько за ценные замечания, позволившие улучшить представление материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alexakhin R.M., Fesenko S.V., Sanzharova N.I. Serious radiation accidents and the radiological impact on agriculture // Radiat. Prot. Dosim. 1996. V. 64. P. 37–42.
2. Fesenko S.V., Colgan P.A., Sanzharova N.I. et al. The dynamics of the transfer of caesium-137 to animal fodder in areas of Russia affected by the Chernobyl accident

and resulting doses from the consumption of milk and milk products // Radiat. Prot. Dosim. 1997. V. 69. № 4. P. 289–299.

3. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Sanzharova N.I., Spiridonov S.I. Dynamics of ^{137}Cs concentration in agricultural products in areas of Russia contaminated as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant // Radiat. Prot. Dosim. 1995. V. 60. № 2. P. 155–166.
4. Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Balonov M.I. et al. An extended critical review of twenty years of countermeasures used in agriculture after the Chernobyl accident // Sci. Total Environ. 2007. V. 383. P. 1–24.
5. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий: Монография / Под ред. Н.И. Санжаровой и С.В. Фесенко. М.: РАН, 2018, 278 с. [Radioekologicheskie posledstviya avarii na Chernobyl'skoj AES: biologicheskie efekty, migraciya, reabilitaciya zagryaznennykh territorij: Monografiya / Pod red. chl.-korr. RAN N.I. Sanzharovoj i prof. S.V. Fesenko. M.: RAN, 2018. 278 p. (In Russ.)]
6. International Atomic Energy Agency. Environmental Consequences of the Chernobyl Accident and Their Remediation: Twenty Years of Experience. Report of the UN Chernobyl Forum Expert Group “Environment” (EGE). Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009.
7. Фесенко С.В., Санжарова Н.И., Лисянский К.Б., Алексахин Р.М. Динамика снижения коэффициентов перехода ^{137}Cs в сельскохозяйственные растения после аварии на Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 1998. Т. 38. № 2. С. 256–273. [Fesenko S.V., Sanzharova N.I., Lisyansky K.B., Alexakhin R.M. Dynamics of reduction of ^{137}Cs transfer factors to agricultural plants after the Chernobyl accident // Radiation Biology. Radioecology. 1998. V. 38. № 2. P. 256–273. (In Russ.)]
8. Fesenko S.V., Jacob P., Alexakhin R. et al. Important factors governing exposure of the population and countermeasure application in rural settlements of the Russian Federation in the long term after the Chernobyl accident // J. Environ. Radioact. 2001. V. 56. P. 77–98.
9. Alexakhin R.M., Sanzharova N.I., Fesenko S.V. et al. Chernobyl radionuclide distribution, migration, and environmental and agricultural impacts // Health Phys. 2007. V. 93. № 5. P. 418–426.
10. Панов А.В., Фесенко С.В., Санжарова Н.И. и др. Влияние сельскохозяйственных контрмер на облучение населения территорий, пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС // Радиация и риск. 2006. Т. 46. № 2. С. 273–279. [Panov A.V., Fesenko S.V., Sanzharova N.I. et al. Impact of Agricultural Countermeasures on the Exposure of the Population of the Areas Affected by the Chernobyl Accident // Radiation and Risk. 2006. V. 46. № 2. P. 273–279 (In Russ.)]
11. Фесенко С.В., Прудников П.В., Емлютина Е.С. и др. Динамика содержания ^{137}Cs в сельскохозяйственной продукции после аварии на ЧАЭС: зерно, картофель и овощи // Радиационная гигиена. 2022. Т. 15. № 4.

- С. 81–93. [Fesenko S.V., Prudnikov P.V., Emlyutina E.S. et al. Dynamics of ^{137}Cs concentrations in agricultural products after the Chernobyl accident: cereals, potato, and vegetables // *Radiation Hygiene*. 2022. V. 15. № 4. P. 81–93. (In Russ.)]
12. Фесенко С.В., Прудников П.В., Исамов Н.Н. и др. Динамика снижения содержания ^{137}Cs в кормовых культурах в отдаленный период после аварии на Чернобыльской АЭС // *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2022. Т. 62. № 2. С. 185–195. [Fesenko S.V., Prudnikov P.V., Isamov N.N. et al. Dynamics of ^{137}Cs Concentration in Fodders in the Long-Term after the Chernobyl Accident // *Radiation Biology. Radioecology*. 2022. V. 62. № 2. P. 185–195. (In Russ.)]
 13. Pröhl G., Ehlen S., Fiedler I., Kirchner G. et al. Ecological half-lives of ^{90}Sr and ^{137}Cs in terrestrial and aquatic ecosystems. 2006 // *J. Environ. Radioact.* 2006. V. 91. № 1–2. P. 41–72.
 14. Mück K. Long-term effective decrease of cesium concentration in foodstuffs after nuclear fallout // *Health Phys.* 1997. V. 72. № 5. P. 659–673.
 15. Маркина З.Н., Курганов А.А., Воробьев Г.Т. Радиоактивное загрязнение продукции растениеводства Брянской области. Брянск: Брянский Центр “Агрохимрадиология”, 1997. 241 с. [Markina Z.N., Kurganov A.A., Vorob'ev G.T. Radioaktivnoe zagriznenie produktsii rastenievodstva Brjanskoj oblasti. Brjansk: Brjanskij Centr “Agrohimradiologija”, 1997 241 p. (In Russ.)]
 16. Прудников П.В. Использование агрономических руд и новых комплексных минеральных удобрений на радиоактивно загрязненных почвах. Брянск: ФГБУ Центр химизации и сельскохозяйственной радиологии “Брянский”, 2012. 212 с. [Prudnikov P.V. Ispol'zovanie agronomicheskikh rud i novykh kompleksnykh mineral'nykh udobrenij na radioaktivno zagriznennykh pochvakh. Brjansk: FGBU Centr himizacii i sel'skhozjajstvennoy radiologii “Brjanskiy”; 2012. 212 p. (In Russ.)]
 17. Гераськин С.А., Фесенко С.В., Черняева Л.Г., Санжарова Н.И. Статистические методы анализа эмпирических распределений коэффициентов накопления радионуклидов растениями // *Сельскохозяйственная биология*. 1991. № 1. С. 130–137. [Geras'kin S.A., Fesenko S.V., Chernyaeva L.G., Sanzharova N.I. Statisticheskie metody analiza jempiricheskikh raspredelenij koeficientov nakoplenija radionuklidov rastenijami // *Sel'skhozjajstvennaja biologija*. 1991. № 1. P. 130–137. (In Russ.)]
 18. Временные рекомендации по ведению агропромышленного производства в Белорусской ССР на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению. Государственный агропромышленный комитет СССР. М.: Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии (ВНИИСХР), 1986. 241 с. [Vremennye rekomendacii po vedeniju agropromyshlennogo proizvodstva v Belorusskoj SSR na territorii, podvergshejsja radioaktivnomu zagrizneniju. Moskva: VNIISHR, 1986. 41 p. (In Russ.)]
 19. Рекомендации по ведению сельского хозяйства в условиях радиоактивного загрязнения территории в результате аварии на Чернобыльской АЭС на период 1991–1995 гг. М.: Государственная комиссия Совета министров СССР по продовольствию и закупкам Всесоюзный научно-исследовательский институт сельскохозяйственной радиологии (ВНИИСХР). Обнинск, 1991. 39 с. [Rekomendacii po vedeniju sel'skogo hozjajstva v uslovijah radioaktivnogo zagriznenija territorii v rezul'tate avarii na Chernobyl'skoj AJeS na period 1991–1995. Moskva–Obninsk: VNIISHR, 1991. 39 p. (In Russ.)]
 20. Руководство по ведению сельскохозяйственного производства на радиоактивно загрязненных территориях Республики Беларусь и Российской Федерации. Минск–Москва: МинЧС Российской Федерации, Минсельхоз Российской Федерации, Минсельхоз Республики Беларусь, 2005. 40 с. [Rukovodstvo po vedeniju sel'skhozjajstvennogo proizvodstva na radioaktivno zagriznennykh territorijah Respubliki Belarus' i Rossijskoj Federacii. Minsk–Moskva: MinChS Rossijskoj Federacii, Minsel'hoz Rossijskoj Federacii, Minsel'hoz Respubliki Belarus', 2005. 40 p. (In Russ.)]
 21. Воробьев Г.Т. Почвы Брянской области. Брянск: Грани, 1993. 160 с. [Vorob'ev G.T. Pochvy Brjanskoj oblasti. Brjansk: Grani; 1993. 160 p. (In Russ.)]
 22. Tagami K., Tsukada H., Uchida S., Howard B.J. Changes in the soil to brown rice concentration ratio of radiocaesium before and after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident in 2011 // *Environ. Sci. Technol.* 2018. V. 52. P. 8339.
 23. Tagami K., Uchida S. Effective half-lives of ^{137}Cs in giant butterbur and field horsetail, and the distribution differences of potassium and ^{137}Cs in aboveground tissue parts // *J. Environ. Radioact.* 2015. V. 141. P. 138–145.

Dynamics of ^{137}Cs Transfer Factors to Agricultural Products after the Chernobyl Accident: Grain, Potatoes, and Vegetables

S. V. Fesenko^{a, #}, P. V. Prudnikov^b, E. S. Emlyutina^a, I. E. Epifanova^a, I. E. Titov^a, and O. A. Shubina^a

^a Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia

^b Bryansk Center of Chemicalization and Agricultural Radiology, Bryansk Michurinskiy village, Bryansk region, Russia

[#]E-mail: Corwin_17F@mail.ru

The results of the analysis of the ^{137}Cs aggregated transfer factors (T_{ag}) to crops (cereals, potatoes, and vegetables) produced in the districts of the Bryansk region affected after the Chernobyl accident are presented. The aggregated transfer factors in the year of the deposition as well as the dynamics of T_{ag} in the subsequent

years depended considerably on the fertility of soils subjected to contamination. The transfer factors of ^{137}Cs to crops in the areas with higher fertility were 3–8 times lower (depending on the plant species) than in the areas with low fertility, and the most significant differences were observed for cereals. Decrease in T_{ag} values was of irregular nature. The half-lives of ^{137}Cs aggregated transfer factors for the period from 1986 to 2021 were calculated. It is shown that the first half-life values calculated for the period of intensive application of countermeasures (1987–1991) were from 0.7 to 1.4 years. The second half-lives varied from 7.3 to 17.3 years. In some areas, after a strong reduction in ^{137}Cs concentrations in crops after 1994, there was a slow increase in ^{137}Cs aggregated transfer factors, which can be explained by insufficient compensation for this decrease of geochemical binding of ^{137}Cs in the soil. Later the dynamics of crop contamination was determined by multidirectional processes: i.e., increase in ^{137}Cs transfer to plants and natural decrease of radionuclides bioavailability in soils under the influence of geochemical processes. In areas with intensive application of countermeasures, the reduction of T_{ag} to crops was determined to a greater extent by the influence of agrochemical countermeasures. In the areas with limited application of countermeasures, the natural biogeochemical processes determining radionuclide binding by the soil-absorbing complex made the predominant contribution to the T_{ag} reduction. Limitations of the approach based on the estimation of half-lives and the necessity of using the history of countermeasures implemented, as well as the soil fertility for prediction of the ^{137}Cs intake by plants is noted.

Keywords: Chernobyl NPP, transfer factor, agricultural products, south-western districts of Bryansk region, monitoring in agriculture, ^{137}Cs

УДК 539.163:631.4:58.009:621:502.5

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ^{137}Cs В ПОЧВАХ И РАСТЕНИЯХ ГОРОДСКИХ ЭКОСИСТЕМ ВБЛИЗИ ЭЛЕКТРОСТАЛЬСКОГО ЗАВОДА ТЯЖЕЛОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

© 2023 г. Д. Н. Липатов^{1,*}, В. А. Вараченков¹, Д. В. Манахов¹, С. В. Мамихин¹, А. И. Щеглов¹

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Факультет почвоведения, Москва, Россия

*E-mail: dlip@soil.msu.ru

Поступила в редакцию 05.07.2022 г.

После доработки 20.12.2022 г.

Принята к публикации 21.12.2022 г.

В городских экосистемах к западу от Электростальского завода тяжелого машиностроения через 6 лет после радиационного инцидента выявлены локальные участки общей площадью 0.2 км² с повышенной мощностью эквивалентной дозы γ -излучения, составляющей 0.15–0.40 мкЗв/ч, и высокой удельной активностью ^{137}Cs , достигающей в верхних горизонтах почв 8328–8740 Бк/кг. Отмечены статистически значимые прямые корреляционные связи между удельной активностью ^{137}Cs в слое 0–10 см почв и мощностью эквивалентной дозы γ -излучения на поверхности и высоте 1 м. Определены типы вертикального распределения ^{137}Cs в почвах загрязненных урбоэкосистем, включая те, на которых проводились земляные дезактивационные работы. Рассчитанные коэффициенты перехода ^{137}Cs возрастают в ряду деревьев: ива белая < рябина обыкновенная < клен платановидный < яблоня домашняя < ольха серая < клен американский; и травянистой растительности: рогоз широколистный < полынь обыкновенная < мать-и-мачеха < бодяк полевой < крапива двудомная.

Ключевые слова: радиоцезий, радиационная обстановка, радиационный мониторинг, урбоэкосистемы, почвенный профиль, городские почвы, дезактивационные мероприятия, коэффициент перехода ^{137}Cs

DOI: 10.31857/S0869803123020066, EDN: EOYBRP

Радиоэкологические исследования городской среды чрезвычайно важны [1, 2]. Радиоактивное загрязнение урбанизированных ландшафтов может происходить вследствие аварий в атомной промышленности [3, 4], а также в результате инцидентов с источниками ионизирующего излучения [5, 6].

Результаты мониторинга в г. Припять в ближайшей зоне воздействия от Чернобыльской АЭС показали, что радиоактивное загрязнение урбандо-ландшафтов имеет специфические закономерности, не свойственные природным и аграрным экосистемам [3, 7]. Зоны аккумуляции радиоактивных осадков прослеживаются вокруг зданий, расположенных по основным направлениям ветрового поля города. На радиоактивно загрязненной территории г. Фукусима в парках отмечено увеличение уровней мощности эквивалентной дозы γ -излучения на ненарушенных участках почвы, тогда как на заасфальтированных этот показатель уменьшается, а на рекультивированных поверхностях снижен до фоновых значений [8].

Радиационные исследования на загрязненных городских территориях направлены на решение

следующих основных задач: определение дозиметрических показателей в отдельных микрорайонах; оценку степени загрязнения радионуклидами поверхности почв, растительного покрова, зданий и дорожных покрытий; контроль эффективности проводимых дезактивационных мероприятий [9, 10].

^{137}Cs является основным дозообразующим долгоживущим техногенным радионуклидом, поступающим в окружающую среду в результате испытаний ядерного оружия (1950–1970-е гг.) и тяжелых радиационных аварий (Чернобыль, 1986 г. и Фукусима, 2011 г.). В радиоактивно загрязненных урбандо-ландшафтах происходят процессы техногенной миграции ^{137}Cs . В результате дождевого стока и гидрологического переноса растворенных и коллоидных форм ^{137}Cs отмечено формирование конечных депо аккумуляции этого радионуклида, приуроченные к мезо- и микропонижениям [11]. Значения удельной активности ^{137}Cs , повышенные до 165 Бк/кг, могут обнаруживаться в чердачной пыли зданий [12]. На радиоактивно загрязненных территориях возможна ресуспензия ^{137}Cs в урбоэкосистемах населенных пунктов [13].

При исследовании в г. Озерск вблизи предприятия ядерного топливного цикла выявлен различный характер пространственного распределения ^{137}Cs в почвах, принадлежащих к отдельным урболандшафтам [14]. Сравнительный анализ уровней загрязнения ^{137}Cs в различных урбоэкосистемах необходим для оценки радиационной обстановки, а также при обосновании и проектировании дезактивационных и рекультивационных мероприятий.

Согласно ежегодному отчету НПО «Тайфун» за 2018 г., среднегодовая величина мощности эквивалентной дозы γ -излучения (МЭДГИ), измеряемая на высоте 1 м, для территории Московской области составляет 0.12 мкЗв/ч [15]. Плотность загрязнения ^{137}Cs в почвах различных районов Московской области составляет 0.8–3.0 кБк/м², удельная активность этого радионуклида в верхних горизонтах почв варьирует от 2 до 15 Бк/кг, соответствуя уровням, обусловленным глобальными выпадениями [16]. В качестве верхней границы референтного фонового уровня удельной активности ^{137}Cs для почвогрунтов Московского региона рекомендована величина 40 Бк/кг [17]. Определение средних уровней и показателей пространственного варьирования ^{137}Cs в различных почвах является одной из основных задач радиоэкологического мониторинга городской среды как на фоновых, так и на загрязненных территориях.

В г. Электросталь в апреле 2013 г. на заводе тяжелого машиностроения произошел радиационный инцидент: попадание источника ^{137}Cs в плавильную печь, его расплавление с выбросом радиоактивных аэрозолей из вентиляционной трубы в городскую среду. Активность расплавленного источника оценена на уровне 1000–7000 Ки (37–259 ТБк). Площадь загрязнения на территории завода составила 7500 м², и распространение радиоактивных аэрозолей происходило также в западном направлении в прилегающий микрорайон города [18]. В промышленной зоне на месте инцидента и на близлежащей городской территории в 2013 г. проводились дезактивационные мероприятия, включавшие снятие и вывоз загрязненной почвы с ее заменой на новый сертифицированный грунт [19].

Цель работы — проанализировать уровни мощности эквивалентной дозы γ -излучения и удельной активности ^{137}Cs в почвах и растениях урболандшафтов на радиоактивно загрязненной городской территории вблизи Электростальского завода тяжелого машиностроения (ЭЗТМ).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Полевые исследования проводили в г. Электросталь Московской области в 2018–2019 гг., т.е.

через 5–6 лет после локальных выпадений ^{137}Cs вследствие радиационного инцидента. Обследованный район города вблизи завода тяжелого машиностроения включал улицы Красную, Первомайскую, Жулябина, Советскую, Рабочую и проспект Ленина, охватывая территорию в пределах географических координат: 55°47'35.5"–55°47'55.4" северной широты и 38°26'23.1"–38°27'21.7" восточной долготы (рис. 1). На 45 контрольных площадках (5 × 5 м), заложенных вблизи завода в основных типах урболандшафтов города, проведено измерение мощности эквивалентной дозы γ -излучения (МЭДГИ) на поверхности почвы и на высоте 1 м с помощью дозиметра-радиометра МКС-АТ6130С. На 22 исследованных площадках наряду с измерением МЭДГИ выполняли пробоотбор почв из слоя 0–10 см цилиндрическим пробоотборником в двух повторностях. На шести площадках (три — в прилежащих к ЭЗТМ промышленных урбоэкосистемах, три — в близлежащих селитебных) были заложены почвенные прикопки глубиной 30 см, и по этим вертикальным профилям проводили сплошной отбор проб из 5-сантиметровых слоев почв. В ходе полевого обследования на городской территории фиксировались характеристики урболандшафтов и морфологическое строение верхних горизонтов почв (табл. 1). На площадках с прикопками также были отобраны пробы древесной и травянистой растительности, произрастающей в исследованных экосистемах.

В лабораторных условиях после высушивания и гомогенизации во всех почвенных и растительных пробах выполняли определение удельной активности ^{137}Cs на сцинтилляционном гамма-спектрометре с детектором NaI(Tl) 63 × 63 «Мультирад» (ООО НТЦ «Амплитуда», Россия). Энергетическое разрешение по линии 662 кэВ составляет 9%. Минимальная детектируемая активность при экспозиции 3600 с составляет 3 Бк.

Для образцов, отобранных в прикопках, проводили взвешивание и расчет плотности сложения почвенных слоев. Результаты этих измерений были использованы для расчета значений плотности загрязнения ^{137}Cs и коэффициентов перелома этого радионуклида в растениях.

При статистической обработке данных проводили проверку нормального закона распределения на основе критерия Уилка–Шапиро для исходных значений, и логнормального — после их преобразования с помощью вычисления десятичного логарифма. Для выявления взаимосвязей между мощностью эквивалентной дозы γ -излучения и удельной активностью ^{137}Cs рассчитывали коэффициенты корреляции Спирмена.

Таблица 1. Местоположение контрольных площадок с прикопками, характеристика урбоэкосистем и почв
Table 1. Location of control sites with digs, characteristics of urban ecosystems and soils

Расстояние до источника выброса ^{137}Cs , местоположение	Номер площадки на карте	Назначение урбо-экосистемы	Растительность	Тип почвы (горизонты)
Промышленные экосистемы (промзона ЭЗТМ)				
30 м, ул. Красная	№ 17	Полоса отвода вблизи надземного трубопровода	Рудерально-разнотравная, единично рябины, яблони	Стратозем урбо-стратифицированный оподзоленный (RYur-AYe,ur-BE1-BF)
60 м, ул. Красная	№ 42	Полоса отвода вблизи бетонного забора завода	Рудерально-разнотравная, поросль ольхи	Стратозем урбо-стратифицированный (RY1ur- RY2ur-RY3ur)
100 м, ул. Красная	№ 21	Участок складирования отходов	Ивняк рогозово-осоковый	Торфяно-глеезем урбо-стратифицированный (Tmr,ur-Bg,ur-G)
Селитебные экосистемы				
200 м, ул. Первомайская	№ 44	Пустырь	Заросли клена американского, поросль клена платановидного	Стратозем урбо-стратифицированный (AYur-RY1ur-RY2ur)
280 м, ул. Первомайская	№ 45	Двор пятиэтажного дома	Злаково-разнотравная, единично липы	Стратозем урбо-стратифицированный (RY1ur-RY2ur-RY3f)
410 м, ул. Жулябина	№ 39	Двор пятиэтажных домов, парк	Деревья ольхи серой, клена платановидного	Стратозем урбо-стратифицированный оподзоленный (RYur-AYe,ur-BE1)

ской территории вблизи ЭЗТМ составляют от 0.05 до 0.38 мкЗв/ч. Значения МЭДГИ, измеренные на высоте 1 м, варьируют от 0.04 до 0.41 мкЗв/ч (табл. 2). Фоновые уровни МЭДГИ на высоте 1 м, составляющие менее 0.10 мкЗв/ч, зафиксированы к северу, востоку и юго-западу от промышленной зоны ЭЗТМ. К северо-западу и западу от трубы плавильного цеха, являвшейся источником радиоактивных выпадений, выявлен ореол повышенного уровня МЭДГИ со значениями более 0.10 мкЗв/ч протяженностью (с востока на запад) 600–750 м и шириной (с севера на юг) 250–300 м. При этом наиболее высокие уровни МЭДГИ, составлявшие 0.15–0.40 мкЗв/ч, отмечены в промзоне ЭЗТМ и в близлежащих урбоэкосистемах на пустырях между улицами Красная и Первомайская. Вдоль самих этих улиц после радиационного инцидента в 2013 г. проводились дезактивационные мероприятия, благодаря которым значения МЭДГИ снижены до 0.10–0.15 мкЗв/ч на участках напротив промзоны по ул. Красной и вдоль пятиэтажных домов № 26, 28 по ул. Первомайской. Отдельный локальный участок с повышенным уровнем МЭДГИ отмечен на южной границе промзоны ЭЗТМ рядом с ул. Советской вдоль заводской железной дороги (площадка № 12).

В 31 из 45 исследованных контрольных площадок значения МЭДГИ на поверхности почвы были больше, чем на высоте 1 м.

Уровни удельной активности ^{137}Cs в верхнем слое 0–10 см почв на обследованной территории вблизи ЭЗТМ варьируют от 6 до 8328 Бк/кг (табл. 2). Площадь ореола радиоактивного загрязнения с удельной активностью ^{137}Cs более 40 Бк/кг составляет около 0.2 км², включает не только локальные участки на прилегающей к заводу ул. Красной, но и на нескольких дворовых территориях по ул. Первомайской (д. 26, 28), ул. Жулябина (д. 3) и рядом с детским садом № 28 (рис. 1). По периферии исследованной городской территории на ул. Рабочей (площадка № 2), просп. Ленина (площадка № 8), ул. Советской (площадка № 11), ул. Первомайской, дом 30 (площадка № 33) и в сквере рядом с Электростальским политехническим институтом (площадки № 14, 29) в верхнем горизонте почв зафиксированы фоновые уровни удельной активности ^{137}Cs : от 6 до 40 Бк/кг.

В профилях почв загрязненных промышленных урбоэкосистем, расположенных в 30–100 м от источника выброса ^{137}Cs , выявлены разнотипные вертикальные распределения радионуклида

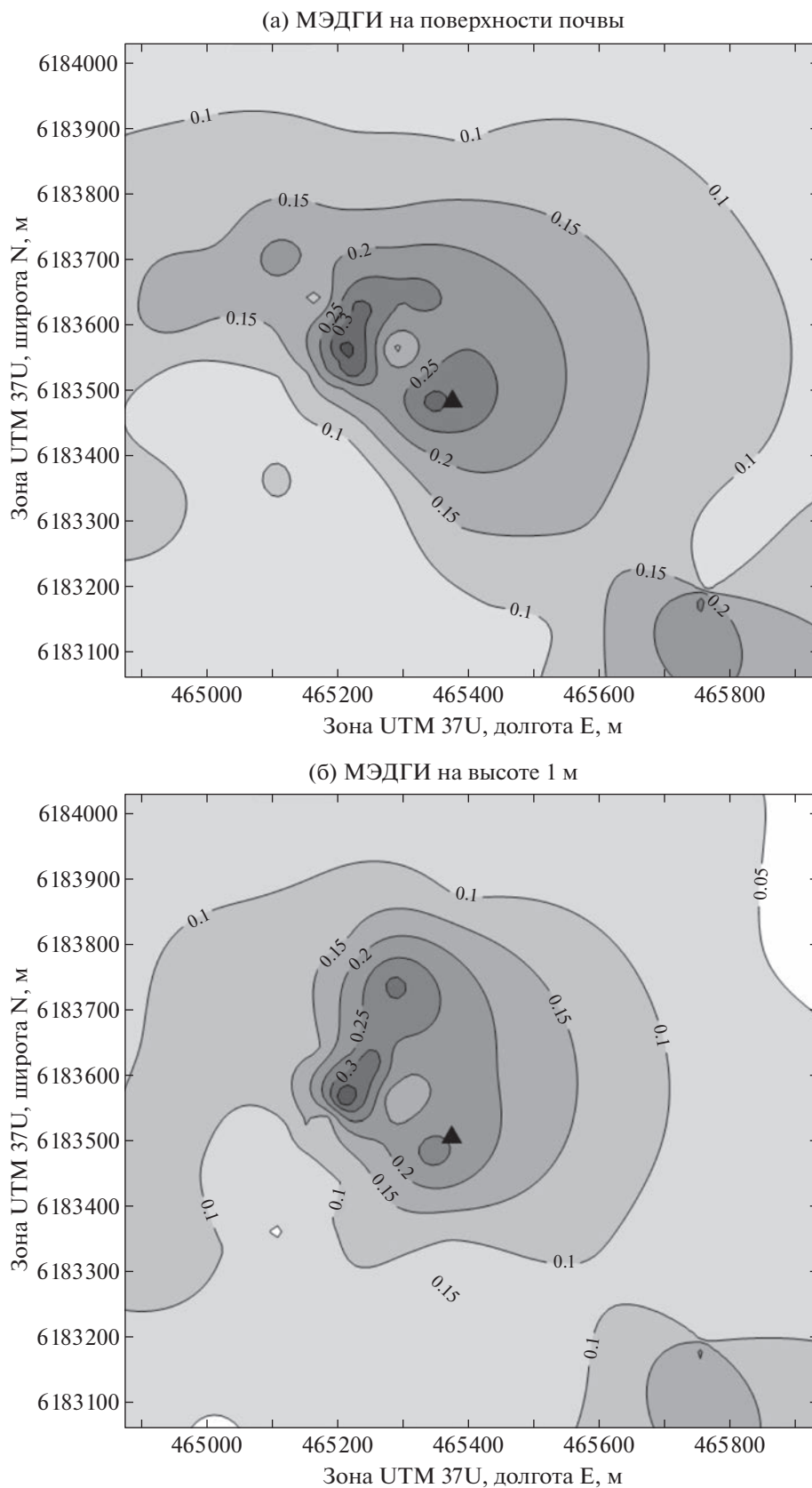


Рис. 2. Картограммы мощности эквивалентной дозы γ -излучения (мкЗв/ч) на исследованной территории вокруг Электростальского завода: измеренные на поверхности почвы (а), измеренные на высоте 1 м от поверхности (б).

Fig. 2. Cartograms of the equivalent dose rate of γ -radiation (mSv/hour) in the studied area around the Elektrostal plant: measured on the soil surface (a), measured at a height of 1 meter from the surface (b).

Таблица 2. Статистические характеристики варьирования мощности эквивалентной дозы γ -излучения и удельной активности ^{137}Cs в слое 0–10 см почв на территории вблизи Электростальского завода**Table 2.** Statistical characteristics of the variation of the equivalent dose rate of γ radiation and the specific activity of ^{137}Cs in a layer of 0–10 cm of soil in the area near the Elektrostal plant

Показатели	МЭДГИ на поверхности, мкЗв/ч	МЭДГИ на высоте 1 м, мкЗв/ч	Удельная активность ^{137}Cs в слое 0–10 см, Бк/кг
Объем выборки	45	45	22
Среднее	0.16	0.14	1031
Медиана	0.13	0.12	392
Минимум	0.05	0.04	6
Максимум	0.38	0.41	8328
Стандартное отклонение	0.09	0.09	1901
Коэффициент вариации, %	58.8	62.7	184.4
Закон распределения	Логнормальный	Логнормальный	Логнормальный

(рис. 3, а). Плотность загрязнения ^{137}Cs , рассчитанная для почвенных профилей в исследованных промышленных урбоэкосистемах на западной границе ЭЗТМ, составляет 102–691 кБк/м² (2.8–18.7 Ки/км²). Исследованные селитебные экосистемы расположены на расстоянии 200–450 м от источника выброса ^{137}Cs , поэтому уровни загрязнения в их почвенных профилях меньше, чем в промышленных (рис. 3, б). Плотность загрязнения ^{137}Cs , рассчитанная для профилей почв в селитебных урбоэкосистемах к западу от ЭЗТМ, составляет 56–417 кБк/м² (1.5–11.3 Ки/км²).

Уровни удельной активности ^{137}Cs , зафиксированные в растениях, значительно повышены в загрязненных урбоэкосистемах вблизи ЭЗТМ (табл. 3). Самые большие значения удельной активности ^{137}Cs , составлявшие 9142–40170 Бк/кг, отмечены во внешней коре взрослых (25–30 лет) деревьев: яблони домашней, рябины обыкновенной, клена американского, произрастающих в 30–200 м в западном направлении от источника выброса. Повышенные уровни удельной активности радионуклида также выявлены в старых крупных ветвях этих деревьев. Во внешней коре 5-летней поросли ивы белой и ольхи серой, исследованной в урбоэкосистемах вблизи ЭЗТМ, значения удельной активности ^{137}Cs примерно в 100 раз ниже, чем у старых деревьев.

Уровни удельной активности ^{137}Cs , отмеченные в молодых ветках, листьях и древесине загрязненных деревьев, значительно ниже, чем в коре и старых ветвях. Наименее загрязненными ^{137}Cs являются плоды яблони и древесина различных пород деревьев: <40 Бк/кг (табл. 3). В моло-

дых ветках (побегах) исследованных деревьев на радиоактивно загрязненной территории вблизи ЭЗТМ уровни удельной активности ^{137}Cs составляют 33–113 Бк/кг. Более загрязненными являются листья этих деревьев, удельная активность ^{137}Cs в них достигает 446–459 Бк/кг для американского клена и яблони. Рассчитанные на основе выявленных уровней значения коэффициентов перехода ^{137}Cs из почвы в листья возрастают в следующем ряду исследованных деревьев: ива белая < рябина обыкновенная < клен платановидный < яблоня домашняя < ольха серая < клен американский. Коэффициенты перехода ^{137}Cs в молодые ветки и древесину в несколько раз меньше, чем полученные для листьев.

В исследованной травянистой растительности наибольшая удельная активность ^{137}Cs отмечена для рудерального сообщества, произрастающего на сильно загрязненном участке в промышленной зоне ЭЗТМ (площадка № 17). Вместе с тем коэффициенты перехода радионуклида из почвы в травянистые растения на этой площадке не самые высокие (табл. 3). Наибольший коэффициент перехода ^{137}Cs был зафиксирован в селитебной урбоэкосистеме для листьев крапивы двудомной, составив 2.05 (Бк/кг)/(кБк/м²). Наименьший коэффициент перехода ^{137}Cs , равный 0.24 (Бк/кг)/(кБк/м²), отмечен для листьев рогоза широколистного, произрастающего в заболоченной урбоэкосистеме. Рассчитанные коэффициенты перехода ^{137}Cs увеличиваются в следующем ряду представителей травянистой растительности: рогоз широколистный < полынь обыкновенная < мать-и-мачеха < бодяк полевой < крапива двудомная.

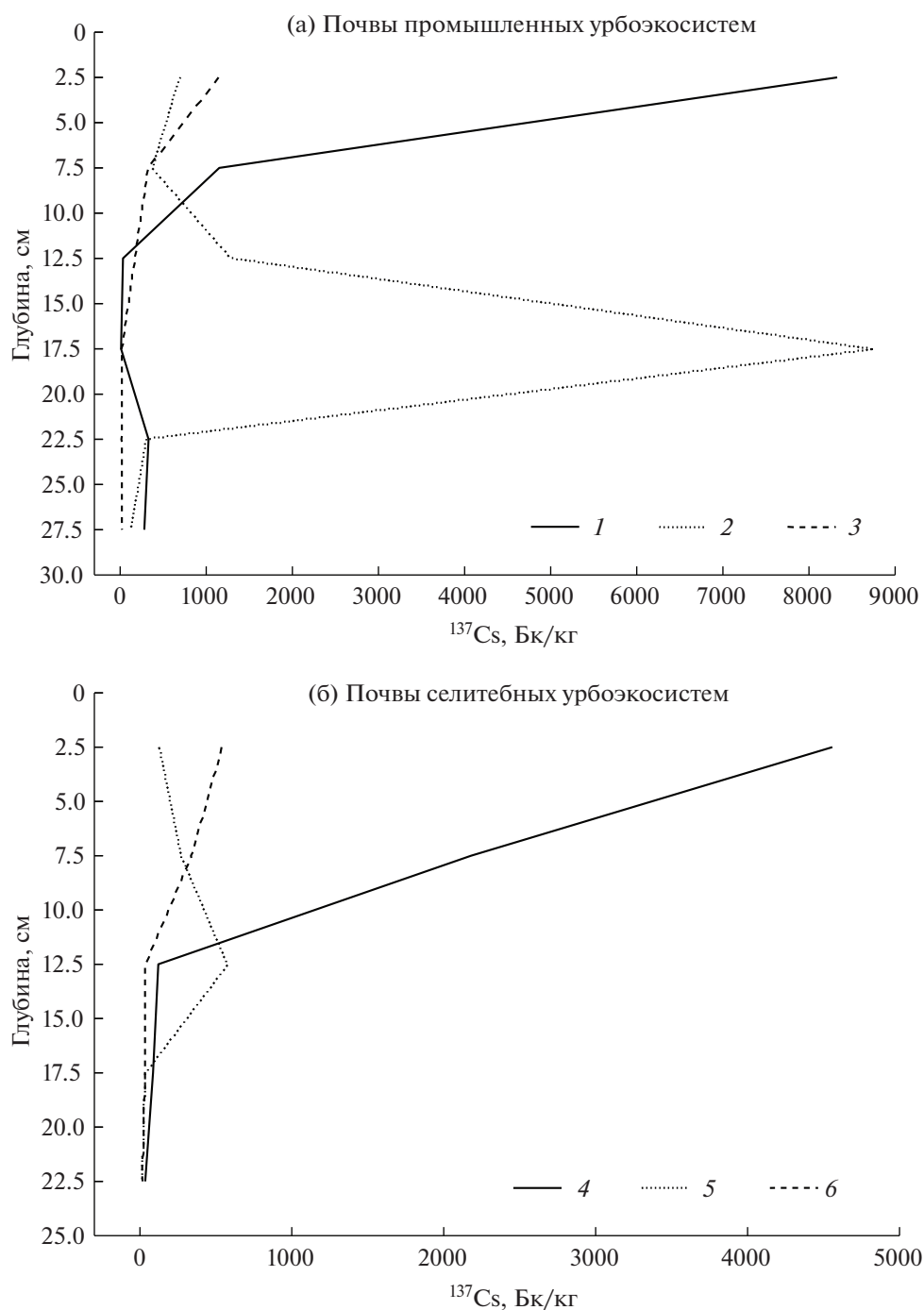


Рис. 3. Вертикальное распределение удельной активности ^{137}Cs в профилях почв промышленных урбоэкосистем (а): 1 – на площадке № 21, 2 – на площадке № 17; 3 – на площадке № 42; в профилях почв селитебных урбоэкосистем (б): 4 – на площадке № 44, 5 – на площадке № 45, 6 – на площадке № 39.

Fig. 3. Vertical distribution of the specific activity of ^{137}Cs in the soil profiles of industrial urban ecosystems (a): 1 – at site № 21, 2 – at site № 17; 3 – at site № 42; in the soil profiles of residential urban ecosystems (b): 4 – on site № 44, 5 – on site № 45, 6 – on site № 39.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенных измерений МЭДГИ показывают, что площадь радиоактивного загрязнения к западу от ЭЗТМ составляет около 0.2 км^2

и охватывает не только прилегающую к заводу ул. Красную, но и включает отдельные участки вдоль улиц Первомайской, Жулябина и Советской (рис. 1, 2). Средний показатель МЭДГИ на высоте

Таблица 3. Удельная активность в компонентах растительности и коэффициенты перехода ^{137}Cs
Table 3. Specific activity in vegetation components and transfer coefficients ^{137}Cs

Площадка (плотность загряз- нении ¹³⁷ Cs,кБк/м ²)	Растение (лат.), возраст дерева	Компонент растения	Удельная активность ¹³⁷ Cs, Бк/кг	Коэффициент перехода ¹³⁷ Cs, (Бк/кг)/(кБк/м ²)
Древесные растения урбоэкосистем				
№ 21 (590 кБк/м ²)	Ива белая(Salix alba), 5 лет	Внешняя кора	308	0.19 0.24 0.06
		Ветки молодые	113	
		Листья	143	
		Древесина	38	
№ 17 (691 кБк/м ²)	Яблоня домашняя (Malus domestica), 25–30 лет	Внешняя кора	40 170	0.67 0.05
		Ветви старые	8656	
		Листья	459	
		Плоды	34	
	Рябина обыкновенная (Sórbus aucupária), 25–30 лет	Внешняя кора	26 240	0.36
		Ветви старые	6415	
№ 42 (102 кБк/м ²)	Ольха серая (Alnus incana),5 лет	Листья	246	0.60 0.90 0.14
		Внешняя кора	248	
		Ветки молодые	61	
		Древесина	14	
№ 44 (417 кБк/м ²)	Клен американский (лат. Ácer negúndo), 25–30 лет	Внешняя кора	9142	0.22 1.07 0.10
		Ветви старые	3689	
		Ветки молодые	93	
		Листья	446	
		Древесина	40	
	Клен платановидный (Ácer platanoídes), 4–5 лет	Ветки молодые	33	0.08
Листья	196	0.47		
Травянистые растения урбоэкосистем				
№ 21 (590 кБк/м ²)	Рогоз узколистый (Týpha angustifólia)	Все надземные части	142	0.24
№ 17 (691 кБк/м ²)	мать-и-мачеха (Tussilágo fárfara)	Все надземные части	540	0.78
	полынь обыкновенная (Artemisia vulgáris)	Все надземные части	310	0.45
	бодяк полевой (Cirsium arvense)	Все надземные части	1098	1.59
№ 45 (60 кБк/м ²)	крапива двудомная (Urtíca díóica)	Все надземные части	124	2.05

Примечание. Коэффициенты перехода не рассчитывались для внешней коры и старых ветвей, имеющих внешнее загрязнение от радиоактивных выпадений 2013 г.

1 м, составивший на исследованной территории 0.14 мкЗв/ч, лишь немного превышает среднегодовой уровень 0.12 мкЗв/ч, установленный для Московской области [15]. Однако максимальные значения МЭДГИ, выявленные вблизи промзо-

ны ЭЗТМ между улицами Красной и Первомайской в урбоэкосистемах на площадках № 21 и № 44, где, по-видимому, не проводились дезактивационные мероприятия, выше этого контрольного уровня в 3.2–3.4 раза. Коэффициенты вариации

МЭДГИ на поверхности и высоте 1 м составляют около 60% (табл. 2), показывают высокую степень пространственного варьирования этого показателя. Распределение значений МЭДГИ не подчиняется нормальному закону, но удовлетворяет логнормальному ($p = 0.05$), отражая локальный характер участков с повышенным уровнем γ -излучения на исследованной городской территории вокруг ЭЗТМ.

Среднее значение удельной активности ^{137}Cs в поверхностном почвенном слое 0–10 см на исследованной городской территории вокруг ЭЗТМ составляет 1031 Бк/кг (табл. 2), превышая в 25 раз верхнюю границу референтного фонового уровня 40 Бк/кг, рекомендованную для почвогрунтов Московского региона [17]. Фоновые значения удельной активности ^{137}Cs (< 40 Бк/кг) отмечены в урбопочвах к востоку, северу и юго-западу от ЭЗТМ, а также в западном направлении в районе просп. Ленина. Максимальные величины загрязнения ^{137}Cs выявлены в верхнем слое почв пустыря (площадка № 44) и заболоченной урбоэкосистемы (площадка № 21), в которых не проводились дезактивационные и рекультивационные мероприятия, между улицами Красной и Первомайской. Коэффициент вариации удельной активности ^{137}Cs в верхнем горизонте почв составил 184.4%, отражая очень высокую степень варьирования этого показателя. Медиана в 2.5 раза меньше среднего арифметического, распределение значений удельной активности ^{137}Cs в слое 0–10 см исследованных городских почв удовлетворяет логнормальному закону ($p = 0.05$). Такие особенности пространственного распределения указывают на малую площадь участков с экстремально высоким уровнем загрязнения, тогда как во многих городских урбоэкосистемах вокруг ЭЗТМ почвы характеризуются более низкими и фоновыми значениями удельной активности ^{137}Cs .

Увеличение значений МЭДГИ на поверхности почвы на 0.02–0.10 мкЗв/ч по сравнению с измеренными на высоте 1 м связано с тем, что почвы, загрязненные радиоактивными выпадениями, выступают источником γ -излучения. Коэффициент корреляции Спирмена между значениями МЭДГИ на поверхности почвы и высоте 1 м составляет +0.77 и является статистически значимым ($p = 0.05$). Коэффициенты корреляции Спирмена для значений удельной активности ^{137}Cs в слое 0–10 см почв с дозиметрическими показателями также статистически значимы ($p = 0.05$) и составляют с МЭДГИ на поверхности почвы: +0.84, с МЭДГИ на высоте 1 м: +0.82. Эта корреляция указывает прямые связи между показателями. Пространственное варьирование МЭДГИ обусловлено уровнями загрязнения ^{137}Cs в почвах на исследованной территории вблизи ЭЗТМ.

В исследованных профилях почв загрязненных промышленных урбоэкосистем отмечено несколько типов вертикального распределения ^{137}Cs (рис. 3, а). На площадке № 21 в заболоченной урбоэкосистеме, используемой для складирования строительных, промышленных и бытовых отходов, распределение ^{137}Cs в верхней части профиля торфяно-глеезема является регрессивно-аккумулятивным с максимумом в поверхностном слое 0–5 см, сформированном радиоактивными выпадениями в 2013 г. Кроме того, в этом профиле почвы при переходе к глеевому горизонту G (25–30 см), в котором были вскрыты почвенно-грунтовые воды, прослеживается слабо выраженный максимум, указывающий на прогрессивно-грунтово-аккумулятивный тип распределения ^{137}Cs и возможную латеральную внутрипочвенную миграцию радионуклида.

В профиле стратозема урбостратифицированного оподзоленного на площадке № 17 выявлен резко выраженный максимум удельной активности ^{137}Cs в горизонте АУе,ur на глубине 15–20 см, составлявший 8740 Бк/кг, тогда как в вышележащем RYur уровень загрязнения в 12 раз меньше. Такое вертикальное распределение техногенного радионуклида, по-видимому, обусловлено насыпным происхождением верхнего слоя, привезенного в ходе проводившихся земляных дезактивационных работ в 2013 г., и погребенным состоянием горизонта АУе,ur, который в момент радиоактивных выпадений был поверхностным и оказался наиболее загрязненным. В другом профиле стратозема на площадке № 42 отмечается равномерно-аккумулятивный тип распределения ^{137}Cs при значительном уменьшении уровня загрязнения всех горизонтов (рис. 3, а). Подобная очистка почвы вблизи источника радиоактивных выпадений происходила вследствие снятия и вывоза загрязненного поверхностного слоя в ходе проведенных дезактивационных работ на этом участке.

В почвах селитебных экосистем на исследованной загрязненной территории отмечены типы распределения ^{137}Cs , сходные с выявленными для промышленных участков. Регрессивно-аккумулятивный тип распределения радионуклида зафиксирован в почве урбоэкосистемы пустыря, заросшего американским кленом, на площадке № 44 (рис. 3, б). В этой селитебной экосистеме земляные дезактивационные работы не проводились, поэтому ^{137}Cs по-прежнему сосредоточен в поверхностном горизонте АУur (0–10 см). В профиле стратозема, исследованного на площадке № 45 во дворе пятиэтажного дома № 28 по ул. Первомайской, распределение ^{137}Cs проявляет максимум в горизонте RY2ur на глубине 10–15 см, тогда как в вышележащем RY1ur уровень загрязнения в 4 раза меньше. Такое вертикальное распределе-

ние техногенного радионуклида обусловлено насыпным характером верхнего слоя, завезенного в ходе проведения земляных дезактивационных работ в 2013 г., и погребенным состоянием горизонта RY2ur, который в момент радиоактивных выпадений был поверхностным и остается наиболее загрязненным. В профиле стратозема в соседнем дворе пятиэтажных домов на площадке № 39 отмечается равномерно-аккумулятивный тип распределения ^{137}Cs при сходном уровне загрязнения (рис. 3, б). На этой дворовой территории, включающей детский сад № 28, в 2013 г. проводились снятие и вывоз загрязненного поверхностного слоя почв, эти дезактивационные мероприятия позволили значительно снизить удельную активность ^{137}Cs и дозиметрические показатели.

Таким образом, в почвах загрязненных урбоэкосистем к западу от ЭЗТМ, в которых не проводились дезактивационные мероприятия, сохраняется регрессивно-аккумулятивный тип профильного распределения ^{137}Cs . В урбопочвах, которые подвергались земляным дезактивационным работам, могут формироваться специфичные типы распределения ^{137}Cs , включающие максимумы в погребенных загрязненных горизонтах и низкие уровни в поверхностных насыпных слоях.

Очень высокие уровни удельной активности ^{137}Cs , зафиксированные в коре и крупных ветвях старых деревьев яблони, рябины и американского клена, произрастающих в урбоэкосистемах к западу от ЭЗТМ (табл. 3), объясняются тем, что они были загрязнены непосредственно в момент радиоактивных выпадений в 2013 г., их биологическое обновление весьма долгое, а дезактивация этого древостоя не проводилась. Зафиксированное значение удельной активности ^{137}Cs в старых ветвях клена американского, равное 3689 Бк/кг, сходно с уровнями в этом компоненте древостоя клена трехраздельного, отмеченными японскими радиоэкологами после фукусимских выпадений в 200 км от места аварии на АЭС [21]. Длительному накоплению радионуклида в коре яблони домашней может способствовать сильная шероховатость ее внешней поверхности, а также слабо выраженные процессы самоочищения. Сниженные в 100 раз значения удельной активности ^{137}Cs в коре 5-летней поросли ивы белой и ольхи серой объясняются тем, что эти молодые деревья выросли уже после выпадений и не подвергались внешнему загрязнению. Дополнительная аккумуляция ^{137}Cs во внешних органах деревьев может происходить в результате процессов ресуспензии, пылепереноса и осаждения загрязненных частиц почвы на поверхности ствола и кроны в течение многих лет после радиоактивных выпадений. В урбоэкосистемах факторами, инициирующими ресуспензию ^{137}Cs , могут являться различные

земляные, строительные работы и движение автотранспорта на загрязненных участках.

Низкие уровни удельной активности ^{137}Cs в древесине, молодых ветках и плодах деревьев, исследованных в загрязненных урбоэкосистемах вблизи ЭЗТМ, обусловлены поступлением радионуклида в эти органы только за счет корневого поглощения из загрязненной почвы. Выявленные минимальные уровни удельной активности ^{137}Cs в древесине по сравнению с другими структурными компонентами деревьев отмечались и в условиях лесных экосистем на территориях чернобыльских радиоактивных выпадений [22]. Повышенные уровни удельной активности ^{137}Cs , зафиксированные в листьях яблони и американского клена, часто обнаруживаются в физиологически активных компонентах фитомассы различных пород деревьев [23]. Рассчитанные коэффициенты перехода ^{137}Cs в древесину ($0.06\text{--}0.14\text{ (Бк/кг)/(кБк/м}^2\text{)}$), ветки молодые ($0.08\text{--}0.60$) и листья ($0.24\text{--}1.07$) в исследованных загрязненных урбоэкосистемах соответствуют нижней границе диапазонов варьирования этого показателя, описанных для древостоев на территориях чернобыльских выпадений. По-видимому, в условиях локальных выпадений ^{137}Cs и проведенных дезактивационных мероприятий вблизи ЭЗТМ не произошло сплошного загрязнения корнеобитаемой толщи почв, поэтому накопление этого радионуклида в растущих тканях деревьев происходило менее интенсивно, чем в большинстве лесных экосистем в районах чернобыльских выпадений.

Накопление ^{137}Cs отмечено в отдельных видах травянистой растительности исследованных урбоэкосистем (табл. 3). Повышенные значения коэффициентов перехода ^{137}Cs , выявленные для крапивы двудомной и бодяка полевого (табл. 3), указывают на то, что эти представители рудеральной растительности могут являться концентраторами радионуклида. Увеличение коэффициентов накопления ^{137}Cs для крапивы двудомной отмечалось и в исследованиях радиоактивного загрязнения лекарственных растений [24]. Низкий коэффициент перехода ^{137}Cs зафиксирован для рогоза широколистного, поэтому его можно отнести к видам-дискриминаторам радионуклида, аналогичный статус этого растения отмечался в экосистемах влажных пойменных лугов [25]. Еще одним фактором, определяющим коэффициенты перехода радионуклида в растения, являются тип и глубина их корневых систем. В урбоэкосистемах наблюдается неравномерная локализация ^{137}Cs в почвах, и интенсивность поглощения радионуклида связана с распределением корней в загрязненных и незагрязненных слоях.

В целом проведенные радиационные исследования показывают, что на загрязненных территориях в урбоэкосистемах пространственные

параметры радиационной обстановки проявляют большую неоднородность, чем в природных ландшафтах. Это необходимо учитывать при планировании радиационного мониторинга и проектировании рекультивационных мероприятий в загрязненных городских экосистемах.

ВЫВОДЫ

1. На городской территории к западу от Электростальского завода тяжелого машиностроения через 6 лет после инцидента с расплавлением источника ионизирующего излучения сохраняются отдельные урбоэкосистемы с неблагоприятной радиационной обстановкой: повышенной мощностью эквивалентной дозы γ -излучения, составляющей 0.15–0.40 мкЗв/ч, и высокой удельной активностью ^{137}Cs в верхних горизонтах почв, достигающей 8328–8740 Бк/кг.

2. Логнормальный закон распределения мощности эквивалентной дозы γ -излучения и удельной активности ^{137}Cs в исследованных почвах указывает на малую площадь локальных участков с сильным загрязнением, при этом урбоэкосистемы к северу, востоку и юго-западу от Электростальского завода тяжелого машиностроения характеризуются низкими и фоновыми параметрами радиационной обстановки.

3. Пространственное распределение мощности эквивалентной дозы γ -излучения на высоте 1 м от поверхности обусловлено уровнями удельной активности ^{137}Cs в слое 0–10 см почв, это подтверждается статистически значимым коэффициентом корреляции Спирмена между ними, равном +0.82 ($p = 0.05$), на исследованной загрязненной городской территории.

4. Регрессивно-аккумулятивный тип вертикального распределения ^{137}Cs характерен для профилей почв загрязненных урбоэкосистем, в которых не проводились дезактивационные мероприятия. В урбопочвах, которые подвергались земляным дезактивационным работам, сформированы специфичные типы распределения с низкими уровнями удельной активности ^{137}Cs в поверхностных насыпных слоях и максимумами в погребенных загрязненных горизонтах.

5. Высокие уровни удельной активности ^{137}Cs , зафиксированные в коре и крупных ветвях старых деревьев яблони домашней, рябины обыкновенной и клена американского, произрастающих в урбоэкосистемах к западу от завода, обусловлены их внешним загрязнением, произошедшем в момент радиоактивных выпадений в 2013 г. Сформированные за счет поглощения корнями из загрязненных урбопочв, коэффициенты перехода ^{137}Cs значительно различаются для отдельных компонентов деревьев: для древесины — низ-

кие (0.06–0.14 (Бк/кг)/(кБк/м²)), для листьев — наиболее высокие (0.24–1.07 (Бк/кг)/(кБк/м²)).

6. В травянистом покрове городских экосистем повышенные коэффициенты перехода ^{137}Cs отмечены для крапивы двудомной и бодяка полевого, эти представители рудеральной растительности относятся к видам-концентраторам радионуклида. Рогоз широколистный имеет низкий коэффициент перехода ^{137}Cs , поэтому является видом-дискриминатором этого радионуклида.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № АААА-А21-121012290189-8) и при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде: Пер. с англ. / Под ред. Ф. Уорнера, Р. Харрисона. М.: Мир, 1999. 512 с. [Biogeochemical pathways of artificial radionuclides / Eds F. Warner, R. Harrison. M.: Mir, 1999. 512 p. (In Russ.)]
2. Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н. Радиоактивность окружающей среды. Теория и практика. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. 286 с. [Sapozhnikov Yu.A., Aliev R.A., Kalmykov S.N. Radioactivity of the environment. Theory and practice. 2006. M.: BINOM, Laboratoriya znanii. 286 p. (In Russ.)]
3. Гащак С.П., Бондарьков М.Д., Иванов Ю.А. и др. Радиоэкология урбанизированного ландшафта на примере г. Припять // Проблемы Чернобыльской зоны отчуждения. 2009. № 9. С. 40–56. [Gashchak S.P., Bondarkov M.D., Ivanov Yu.A. et al. Radioecology of urbanized landscape on the example of Pripjat // Problems of the Chernobyl exclusion zone. 2009. № 9. P. 40–56 (In Ukr.)]
4. Tsuboi T., Wada H., Yanaga M. Distribution of ^{134}Cs and ^{137}Cs radioactivity of surface soil originated in the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident at Shizuoka city, Japan // Radiat. Safety Managem. 2012. V. 11. № 1. P. 11–18. [https://doi.org/10.12950/rsm.11.11]
5. The Radiological Accident in Goiania. STI/PUB/815. Vienna: IAEA, 1988. 157 p.
6. Волков В.Г., Волкович А.Г., Данилович А.С. и др. Подготовка объектов Подольского завода цветных металлов к реабилитации // Атомная энергия. 2010. T. 109. № 2. С. 89–94. [Volkov V.G., Volkovich A.G., Danilovich A.S. et al. Preparation of objects at the Podolsk nonferrous metals works for rehabilitation // Atomic Energy. 2010. V. 109. № 2. P. 113–120. (In Russ.)] [https://doi.org/10.1007/s10512-010-9332-x]

7. Бондарьков М.Д. Научное обоснование и оптимизация методов обеспечения радиэкологического мониторинга окружающей среды и контроля РАО АЭС: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Киев, 2012. 50 с. [*Bondarkov M.D. Scientific substantiation and optimization of methods for ensuring radioecological monitoring of the environment and control of radioactive waste of nuclear power plant: Abstr. Diss. doct. techn. sci. Kiev, 2012. 50 p. (In Ukr.)*]
8. Hohara S., Inagaki M., Yamanishi H. et al. Survey of radioactive contamination in Fukushima Naka-Dori region, Fukushima, Japan // *Progr. Nucl. Sci. Technol.* 2014. V. 4. P. 39–42. <https://doi.org/10.15669/pnst.4.39>
9. Иванов Ю.А., Бондарьков М.Д. Нерешенные радиэкологические проблемы зоны отчуждения Чернобыльской АЭС на поздней фазе аварии // *Радиационная биология. Радиоэкология.* 2009. № 3. С. 302–310. [*Ivanov Yu.A., Bondarkov M.D. Unsolved radioecological problems of Chernobyl NPP exclusion zone at late phase of the accident // Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya. 2009. № 3. P. 302–310 (In Russ.)*]
10. Decontamination Projects for Radioactive Contamination Discharged by Tokyo Electric Power Company Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. Japan, Tokyo: Ministry of the Environment, 2018. 461 p.
11. Селезнев А.А. Поверхностная локальная миграция ^{137}Cs в условиях экосистемы города // *Вопр. радиац. безопасности.* 2009. № 3. С. 70–76. [*Seleznev A.A. Surface local migration of ^{137}Cs in the conditions of the ecosystem city // Radiation safety issues. 2009. № 3. P. 70–76. (In Russ.)*]
12. Tserendorj D., Szabó K.Z.S., Völgyesi P.V. et al. Comparative study of Cs-137 activity concentration between attic dust and urban soil from Salgotarjan city, Hungary. EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr 2021, EGU21-16233. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-16233>
13. Лошилов Н.А., Кашпаров В.А., Процак В.П. Влияние вторичного пылепереноса радиоактивных веществ на загрязнение населенных пунктов в зоне Чернобыльской аварии // *Гигиена и санитария.* 1993. № 5. С. 39–41. [*Loshilov N.A., Kashparov V.A., Protzak V.P. The influence of secondary dust transfer of radioactive substances on the pollution of settlements in the Chernobyl accident zone // Gigiena i sanitariya. 1993. № 5. P. 39–41. (In Russ.)*]
14. Тимофеев И.В., Кузьменкова Н.В. Пространственное распределение ^{137}Cs в почвах г. Озерск (Челябинская область) // *Вестн. Моск. Ун-та. Сер. 5. География.* 2013. № 6. С. 23–29. [*Timofeyev I.V., Kuz'menkova N.V. Spatial distribution of ^{137}Cs in the soils of Ozersk (Chelyabinsk region) // Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography. 2013. № 6. P. 23–29 (In Russ.)*]
15. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 году. Ежегодник. Обнинск: ФГБУ “НПО “Тайфун”. Росгидромет, 2019. 324 с. [*Radiation situation in Russia and neighboring countries in 2018. Yearbook. Obninsk: FGBU “NPO “Tajfun”. Rosgidromet, 2019. 360 p. (In Russ.)*]
16. Липатов Д.Н., Манахов Д.В., Мамихин С.В., Агапкина Г.И. Распределение естественных радионуклидов и ^{137}Cs в профилях почв лесных, агро- и урбоэкосистем Московской области // *Радиационная биология. Радиоэкология.* 2020. Т. 60. № 4. С. 426–438. [*Lipatov D.N., Manakhov D.V., Mamikhin S.V., Agapkina G.I. Distribution of natural radionuclides and ^{137}Cs in soil profiles of forest, agricultural and urban ecosystems of the Moscow Region // Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya. 2020. V. 60. № 4. P. 426–438 (In Russ.)*]
17. Петрова Т.Б. Особенности формирования радиационного фона г. Москвы, обусловленного гамма-излучающими радионуклидами природного и техногенного происхождения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, 2011. 32 с. [*Petrova T.B. Features of the formation of the radiation background of Moscow caused by gamma-emitting radionuclides of natural and man-made origin: Abstr. Diss. ... kand. techn. sci. Moscow: FMBC named after A.I. Burnazyan, 2011. 32 p. (In Russ.)*]
18. Романович И.К., Брук Г.Я., Громов А.В., Рамзаев В.П. Радиационная обстановка на Электростальском заводе тяжелого машиностроения и прилегающей территории г. Электросталь, связанная с расплавлением радионуклидного источника // *Актуальные вопросы радиационной гигиены: Сб. тез. конф. СПб., 2014. С. 165–167. [Romanovich I.K., Brook G.Ya., Gromov A.V., Ramzaev V.P. Radiation situation at the Elektrostal heavy Engineering plant and the adjacent territory of Elektrostal associated with the melting of a radionuclide source // Topical issues of radiation hygiene: Coll. of conference abstracts. St. Petersburg, 2014. P. 165–167. (In Russ.)*]
19. Информационно-аналитический сайт AtomInfo.Ru (Электронный ресурс). Ликвидацию последствий радиоактивного излучения завершили на заводе в Подмосковье. URL: <http://atominfo.ru/newse/10199.htm> (дата обращения 5.07. 2022) [Information and analytical website AtomInfo.Ru (Electronic resource). The elimination of the consequences of radioactive radiation was completed at a plant in the Moscow region. URL: <http://atominfo.ru/newse/10199.htm> (accessed 5.07. 2022) (In Russ.)]
20. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена. 2004. 342 с. [*Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. Classification and Diagnostic System of Russian Soils. 2004. Smolensk: Oikumena, 342 p. (In Russ.)*]
21. Yoshihara T., Matsumura H., Hashida S., Nagaoka T. Radiocesium contaminations of 20 wood species and the corresponding gamma-ray dose rates around the canopies at 5 months after the Fukushima nuclear power plant accident // *J. Environ. Radioact.* 2013. V. 115. P. 60–68. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.07.002>
22. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах. М.: Наука, 1999. 268 с. [*Shcheglov A.I. Biogeochemistry of technogenic radionuclides in forest ecosystems. Moscow: Nauka, 1999. 268 p. (In Russ.)*]

23. *Переволоцкий А.Н.* Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах. Гомель: РНИУП “Институт радиологии”, 2006. 255 с. [*Perevolotsky A.N.* Distribution of ^{137}Cs and ^{90}Sr in forest biogeocenoses. Gomel: RNRIUP “Institute of Radiology”, 2006. 255 p. (In Belarus)]
24. *Дьякова Н.А., Сливкин А.И., Гапонов С.П.* Изучение радионуклидного загрязнения лекарственного сырья Воронежской области на примере листьев подорожника большого и листьев крапивы двудомной // Вестн. ВГУ. Серия: Химия, Биология, Фармация. 2017. № 2. С. 118–123. [*Dyakova N.A., Slivkin A.I., Gaponov S.P.* Study of radionuclide contamination of medicinal raw materials of the Voronezh region on the example of the leaves of plantain large and leaves of nettle dioecious // Bulletin of VSU. Series: Chemistry, Biology, Pharmacy. 2017. № 2. P. 118–123. (In Russ.)]
25. *Цветнова О.Б., Щеглов А.И.* ^{137}Cs в компонентах природных комплексов 30-километровой зоны Смоленской АЭС // Вестн. Моск. Ун-та. Серия 17. Почвоведение. 2009. № 3. С. 3–8. [*Tsvetnova O.B., Shcheglov A.I.* ^{137}Cs in natural ecosystem components within the 30-km impact zone of the Smolensk nuclear power plant // Moscow University Soil Science Bulletin. 2009. V. 64. № 3. P. 99–104 (In Russ.)]

^{137}Cs Pollution in Soils and Plants of Urban Ecosystems Near the Elektrostal Heavy Machinery Plant

D. N. Lipatov^{a, #}, V. A. Varachenkov, D. V. Manakhov^a, S. V. Mamikhin^a, A. I. Shcheglov^a

^a *Lomonosov Moscow State University, Soil Science Faculty, Moscow, Russia*

[#] *E-mail: dlip@soil.msu.ru*

In urban ecosystems to the west of the Elektrostal Heavy Machinery Plant, 6 years after the radiation incident, local areas with a total area of 0.2 km² with an increased equivalent dose rate of γ radiation of 0.15–0.40 $\mu\text{Sv}/\text{hour}$ and a high specific activity of ^{137}Cs reaching 8328–8740 Bq/kg in the upper soil horizons were identified. Statistically significant direct correlations were noted between the specific activity of ^{137}Cs in a layer of 0–10 cm of soil and the equivalent dose rate of γ radiation at the surface and height of 1 meter. The types of vertical distribution of ^{137}Cs in soils of polluted urban ecosystems, including those on which earth decontamination works were carried out, have been determined. The calculated ^{137}Cs transfer coefficients increase in row of tree: *Salix alba* < *Sórbus aucupária* < *Ácer platanoídes* < *Malus domestica* < *Alnus incana* < *Ácer negúndo*; and grassy vegetation: *Týpha angustifólia* < *Artemísia vulgáris* < *Tussilágo fárfara* < *Cirsium arvense* < *Urtica dióica*.

Keywords: radiocesium, radiation situation, radiation monitoring, urban ecosystems, soil profile, urban soils, decontamination measures, transfer coefficient of ^{137}Cs

УДК 539.163:631.4:58.009

МОНИТОРИНГ ^{137}Cs , ^{90}Sr И ^{40}K В СЕРЫХ ЛЕСНЫХ ПОЧВАХ И РАСТЕНИЯХ РЕПЕРНЫХ УЧАСТКОВ ВЛАДИМИРСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2023 г. А. А. Уткин^{1,*}¹ Ивановская государственная сельскохозяйственная академия им. Д.К. Беляева, Иваново, Россия

*E-mail: aleut@inbox.ru

Поступила в редакцию 28.02.2022 г.

После доработки 07.11.2022 г.

Принята к публикации 21.12.2022 г.

Представлены результаты радиационного мониторинга серых лесных почв реперных участков сельскохозяйственного назначения Владимирской области, проведенного в 2011 и 2016 г. Исследованием установлены фоновые значения удельных активностей исследуемых радионуклидов в почвах реперных участков. По плотности загрязнения пахотного горизонта почв ^{137}Cs и ^{90}Sr был определен уровень экологической обстановки, что позволило отнести почвы всех реперных участков области к незагрязненным территориям, пригодным без ограничений для сельскохозяйственного использования. Установлены мощность экспозиционной дозы γ -излучения почв и вклад ^{40}K и ^{137}Cs в формирование γ -фона почв. Корреляционным анализом определены влияние отдельных физико-химических свойств почв на поведение и распределение радионуклидов в почве и взаимосвязи между самими радионуклидами. Исходя из значений удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в растительной продукции, выращенной на почвах реперных участков в 2011 и 2016 г., были построены ряды культурных растений, с убывающей способностью к накоплению из почвы данных радионуклидов. Вся выращенная растительная продукция по всем видам культур полностью удовлетворяла санитарно-гигиеническим нормам, предъявляемым к ограничению содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в растительных кормах (зеленая масса, солома и зерно) и пищевой продукции (яблоки). По коэффициентам перехода было установлено, что процесс перехода ^{90}Sr из почвы в растения всех видов протекал интенсивнее, чем переход ^{137}Cs . Рассчитанные коэффициенты линейной корреляции между значениями удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах и растениях позволили выявить силу и характер их зависимостей.

Ключевые слова: радиационный мониторинг, ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{40}K , серая лесная почва, растения, реперные участки, Владимирская область

DOI: 10.31857/S0869803123020121, EDN: EPFPEG

Почвы являются основным “депо” поступающих в них различных загрязнителей, в том числе искусственных радионуклидов (ИРН), которые могут в значительных количествах накапливаться в растительной продукции, поступать с ней в организм сельскохозяйственных животных и человека. По данным ряда исследователей, основное загрязнение почв и культурных растений агроценозов на территории России связано с долгоживущими ИРН: ^{137}Cs ($T_{1/2} = 30.17$ лет) и ^{90}Sr ($T_{1/2} = 28.79$ лет) [1].

Кроме ИРН, почвы, как природные объекты, сформированные при эволюции Земли, также могут содержать в себе и естественные радионуклиды (ЕРН), которые обуславливают природный радиационный фон почв [2]. К числу наиболее распространенных ЕРН в почвах относится ^{40}K с периодом полураспада $T_{1/2} = 1.28 \cdot 10^9$ лет [1].

Во Владимирской области, как в хорошо развитом аграрном регионе, расположенном в центре Европейской части России, встречаются почвы различного типа, среди которых наибольший интерес представляют плодородные серые лесные почвы, на которых возделывается широкий набор сельскохозяйственных культур. В научной литературе источники поступления и особенности накопления ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K серыми лесными почвами и растениями в почвенно-климатических условиях Владимирской области остаются недостаточно изучены [3] по сравнению с почвами других регионов России.

Цель настоящего исследования заключалась в проведении локального радиационного мониторинга серых лесных почв реперных участков сельскохозяйственных угодий Владимирской области на наличие содержания в них ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K , определении влияния отдельных физико-хи-

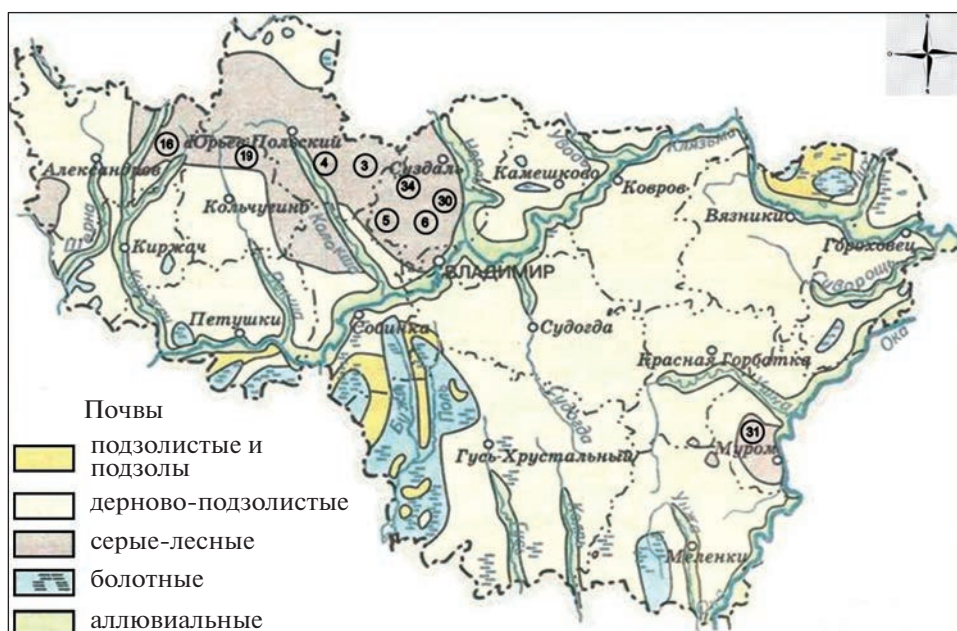


Рис. 1. Почвенная карта Владимирской области.

Fig. 1. Soil map of the Vladimir region.

мических свойств почв на поведение изучаемых радионуклидов (РН) в системе “почва—растение”, возможности получения безопасной растительной продукции, соответствующей санитарно-гигиеническим и экологическим требованиям.

Комплексная оценка современного уровня γ -излучения и содержания ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K в серых лесных почвах и культурных растениях агроценозов Владимирской области проводилась впервые. Данные, полученные в ходе проведенного мониторинга, в научной литературе ранее не находили своего глубокого изучения и освещения, что повышает ценность и актуальность проведенного исследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Агрохимическое и радиологическое обследование почв реперных участков и культурных растений на содержание ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K проводили в 2011 и 2016 г., в соответствии с ежегодным мониторингом почв земель сельскохозяйственного назначения на девяти реперных участках, занятых серыми лесными почвами, расположенными на территории Владимирской области (рис. 1), путем отбора образцов растений и почв из пахотного горизонта (0–20 см) для анализов.

Крутизна склонов реперных участков не превышала 3.5° . Реперные участки располагались, в основном, на пахотных землях и кормовых естественных угодьях, преобладающая растительность участков — культурные растения: вика по-

севная (*Vicia sativa* L.), овес посевной (*Avena sativa* L.), клевер розовый (*Trifolium hybridum* L.), тимopheвка луговая (*Phleum pratense* L.), кукуруза сахарная (*Zea mays* L.), пшеница мягкая (*Triticum aestivum* L.), рожь (*Secale cereale* L.), ячмень обыкновенный (*Hordeum vulgare* L.), козлятник восточный (*Galega orientalis* Lam.), яблоня домашняя (*Malus domestica* Borkh.) и злаковое разнотравье в виде полевицы собачьей (*Agrostis canina* L.) и мятлика лугового (*Poa pratensis* L.).

Общая площадь серых лесных почв реперных участков составила 386 га.

С отдельного реперного участка в зависимости от его площади с помощью тростьевого бура отбирали несколько смешанных образцов почвы. Один смешанный образец, массой около 0.5 кг, составлялся из 25–30 точечных проб и в среднем отбирался с каждых 6–7 га площади реперного участка.

Смешанную пробу растений массой около 0.5 кг натуральной влажности составляли из 8–10 точечных проб.

Пробы почв и растений отбирали с одних и тех же локаций реперных участков. Отобранные образцы почв и растений высушивали до воздушно-сухого состояния и измельчали на мельнице.

Физико-химические анализы почв были выполнены по следующим методикам: обменная кислотность ($\text{pH}_{\text{КСЛ}}$): ГОСТ Р 58594–2019; обменные основания кальция и магния (Ca и Mg): ГОСТ 26487–85; органическое вещество ($\text{C}_{\text{орг}}$) (по Тюрину в модификации ЦИНАО): ГОСТ 26213–91;

сумма поглощенных оснований (S) (по Каппену): ГОСТ 27821–88; фракции физической глины и ила (по Качинскому) [4].

Определение РН в почвах и растениях выполняли по принятым в радиобиологической практике методикам: ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве и растительных образцах производили на приборе УСК “Гамма Плюс” (Россия), согласно методическим рекомендациям [5] и ГОСТ Р 54040–2010, в счетных образцах на сцинтилляционном гамма-, бета-спектрометре с использованием программного обеспечения “Прогресс” (ВНИИФТРИ, 2003). Относительная погрешность определения удельной активности ИРН не более $\pm 10\%$. Гамма-спектрометрию проб почвы проводили в геометрии сосуда Маринелли объемом 1 л, растительности – в геометрии “дента” после ее сухого озоления при температуре 450°C .

Измерение МЭД γ -излучения проводили согласно методических указаний по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения [6].

МЭД γ -излучения измеряли в полевых условиях на высоте 1 м над поверхностью почвы сцинтилляционным геологоразведочным радиометром СРП–68–01 (Россия). На каждом реперном участке проводили восемь замеров, с последующим подсчетом среднего значения.

Для оценки перехода ИРН из почвы в растения рассчитывался коэффициент накопления (K_n), равный отношению удельной активности ИРН в растениях (Бк/кг сухой массы) к его активности в почве (Бк/кг сухой массы).

Коэффициент перехода (K_n) определяли как отношение удельной активности ИРН в растениях (Бк/кг сухой массы) к плотности загрязнения почвы на единицу площади (кБк/м²).

При статистической обработке данных проводили проверку закона нормального распределения с помощью критериев Колмогорова–Смирнова и Шапиро–Уилка. Средние уровни значений изучаемых показателей в исследуемых образцах при нормальном распределении сравнивали между собой с помощью двухвыборочного t -критерия Стьюдента для зависимых переменных, при ненормальном – с помощью критерия Вилкоксона. Для выявления взаимосвязей при нормальном распределении признака рассчитывали коэффициенты парной линейной корреляции Пирсона, с использованием статистической программы “Statistica” (версия 10).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Аккумуляция, распределение и миграция радионуклидов в почвах зависят от многих факторов, среди которых важное значение играют содержание органического вещества и его каче-

ственный состав, кислотность почвенной среды, химический, гранулометрический и минералогический составы, характер увлажнения, рельеф местности и др. [7].

Для изучения влияния физико-химических показателей почв на особенности поведения в них изучаемых радионуклидов было проведено агрохимическое обследование серых лесных почв реперных участков, его результаты приведены в табл. 1.

Серые лесные почвы участков в среднем имели преимущественно среднесуглинистый состав.

Средняя обеспеченность почв органическим веществом на протяжении всего периода наблюдения соответствовала низкому уровню содержания, а среднее содержание $C_{\text{орг}}$ в почвах участков мало подвергалось изменению.

Почвы участков в 2011 г. отличались преимущественно слабокислой реакцией среды, а в 2016 г. – слабокислой и близкой к нейтральной. В среднем, серые лесные почвы имели слабокислую реакцию среды.

Обеспеченность почв обменным Са в течение мониторинга, в основном, соответствовала повышенной степени, а обменным Mg, преимущественно, соответствовала очень высокой степени в 2011 г. и высокой – в 2016 г.

Среднее содержание оснований Са и Mg отвечало повышенному и высокому содержанию их в почве соответственно. Отметим, что с 2011 по 2016 г. произошло снижение среднего содержания Са и Mg в почвах участков.

Средняя доля присутствия обменных Са и Mg в общем составе поглощенных катионов в 2011 и 2016 г. составляла – 91.9 и 84.5% соответственно, что говорит о важной роли данных элементов в процессах генезиса и химизма изучаемых почв. Прослеживается тенденция снижения содержания обменных оснований, предположительно по причине их вымывания из корнеобитаемого слоя вниз по профилю и выноса товарной частью урожая сельскохозяйственными культурами.

Значения сумм поглощенных оснований (параметр S) почв большинства реперных участков соответствовали повышенным степеням обеспеченности. Средняя величина S почв участков за период наблюдений уменьшилась на 0.6 смоль(экв)/100 г почвы.

Отметим, что варьирование всех физико-химических показателей серых лесных почв участков подчинялось закону нормального распределения. Значения критериев Колмогорова–Смирнова и Шапиро–Уилка удовлетворяли следующим условиям: $p > 0.2$ и $p > 0.05$ соответственно.

Сравнение физико-химических показателей почв по двум аналогичным зависимым выборкам 2011 и 2016 г. показало, что существенные разли-

Таблица 1. Физико-химические свойства почв
Table 1. Physical and chemical properties of soils

№ реперного участка	Число смешанных образцов, <i>n</i>	Район	Фракция, %		$C_{орг}, \%$	pH_{KCl}	Ca	Mg	S
			<0.001	<0.01			смоль(экв)/100 г почвы		
3	6	Ю.-Польский	$\frac{n/o^*}{14.1}$	$\frac{n/o}{38.1}$	$\frac{2.0}{3.9}$	$\frac{5.2}{5.1}$	$\frac{15.0}{14.6}$	$\frac{2.8}{3.2}$	$\frac{18.3}{19.8}$
4	4	Ю.-Польский	$\frac{n/o}{16.2}$	$\frac{n/o}{33.7}$	$\frac{2.8}{3.9}$	$\frac{5.5}{5.4}$	$\frac{15.0}{10.8}$	$\frac{2.9}{3.2}$	$\frac{19.1}{16.5}$
5	4	Суздальский	$\frac{n/o}{22.4}$	$\frac{n/o}{34.9}$	$\frac{2.3}{1.3}$	$\frac{6.2}{5.8}$	$\frac{13.1}{11.0}$	$\frac{4.2}{2.9}$	$\frac{18.1}{19.6}$
6	3	Суздальский	$\frac{n/o}{26.3}$	$\frac{n/o}{31.2}$	$\frac{2.7}{1.8}$	$\frac{5.4}{5.2}$	$\frac{11.3}{10.3}$	$\frac{3.2}{2.7}$	$\frac{15.6}{16.9}$
16	4	Александровский	$\frac{n/o}{17.2}$	$\frac{n/o}{33.7}$	$\frac{1.8}{2.0}$	$\frac{5.1}{4.9}$	$\frac{10.6}{10.0}$	$\frac{4.9}{3.4}$	$\frac{20.9}{16.3}$
19	4	Кольчугинский	$\frac{n/o}{18.2}$	$\frac{n/o}{34.8}$	$\frac{2.8}{2.5}$	$\frac{5.7}{5.7}$	$\frac{11.3}{10.3}$	$\frac{4.7}{4.0}$	$\frac{16.3}{16.6}$
30	7	Суздальский	$\frac{n/o}{13.3}$	$\frac{n/o}{37.0}$	$\frac{2.8}{2.1}$	$\frac{5.3}{5.2}$	$\frac{12.5}{10.6}$	$\frac{3.5}{3.1}$	$\frac{16.3}{13.9}$
31	10	Муромский	$\frac{n/o}{20.9}$	$\frac{n/o}{28.1}$	$\frac{1.7}{0.8}$	$\frac{5.3}{5.8}$	$\frac{5.4}{6.6}$	$\frac{1.4}{2.3}$	$\frac{8.6}{9.6}$
34	10	Суздальский	$\frac{n/o}{17.4}$	$\frac{n/o}{35.6}$	$\frac{3.6}{3.4}$	$\frac{5.8}{5.8}$	$\frac{13.8}{11.3}$	$\frac{5.4}{3.3}$	$\frac{19.7}{18.6}$
<i>M</i>			$\frac{n/o}{18.4}$	$\frac{n/o}{34.1}$	$\frac{2.5}{2.4}$	$\frac{5.5}{5.4}$	$\frac{12.0}{10.6}$	$\frac{3.7}{3.1}$	$\frac{17.0}{16.4}$
$\pm m$			$\frac{n/o}{1.4}$	$\frac{n/o}{1.0}$	$\frac{0.2}{0.4}$	$\frac{0.1}{0.1}$	$\frac{1.0}{0.7}$	$\frac{0.4}{0.2}$	$\frac{1.2}{1.1}$

Примечания. * н/о — не определяли (то же в табл. 3–4). *M* — среднее арифметическое значение (то же в табл. 2 и 4); $\pm m$ — ошибка среднего арифметического (то же в табл. 2 и 4). Приведены средние арифметические значения (то же в табл. 2 и 4). Над чертой — 2011 г., под чертой — 2016 г., (то же в табл. 2–4).

чия имеются только по содержанию обменного Са, это подтверждалось расчетом значений *t*-критерия Стьюдента ($p < 0.05$).

Результаты определения удельной активности ЕРН позволяют дать более точную характеристику радиационной обстановки на исследуемой территории путем сравнения их удельных активностей в изучаемой почве с их общемировыми или региональными значениями, а ИРН — со среднестатистическим их содержанием в почвах мира, обусловленном глобальными выпадениями. Удельные активности ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K в серых лесных почвах участков представлены в табл. 2.

Удельные активности ^{40}K в почвах планеты варьируют в широких диапазонах. В качестве среднемировых принято значение 450 Бк/кг почвы. По данным Тихомирова, содержание ^{40}K в серых лесных почвах России в среднем составляет 450 Бк/кг [8].

Средняя удельная активность ^{40}K в серых лесных почвах реперных участков Владимирской об-

ласти за период мониторинга была в 1.09–1.29 раза выше фоновых значений.

Удельные активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в серых лесных почвах обследованных участков не превышали значений фона глобальных выпадений — 4–30 и 1–18 Бк/кг соответственно [9] (табл. 2).

Усредненная удельная активность почв участков по ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K в 2011 г. была в 1.12, 1.04 и 1.19 раза выше, чем в 2016 г.

Плотность загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr в пахотном горизонте (0–20 см) почв была значительно ниже допустимых уровней относительно удовлетворительной экологической обстановки в 1 и 0.1 Ки/км² соответственно, что позволяет отнести серые лесные почвы участков к незагрязненным территориям [10].

Варьирования значений показателей удельных активностей и плотностей загрязнения почв участков ^{137}Cs и ^{90}Sr подчинялись закону нормального распределения признака, для ^{40}K отме-

Таблица 2. Мощность экспозиционной дозы, удельная активность и плотность загрязнения почв ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K
Table 2. Exposure dose rate, specific activity and density of soil contamination ^{137}Cs , ^{90}Sr and ^{40}K

№ реперного участка	^{137}Cs		^{90}Sr		^{40}K		МЭД
	Бк/кг	Ки/км ²	Бк/кг	Ки/км ²	Бк/кг	Ки/км ²	мкР/ч
3	5.62	0.035	3.36	0.021	648	4.035	11.5
	3.04	0.019	2.03	0.013	492	3.064	12.0
4	6.81	0.043	4.01	0.025	667	4.154	12.0
	4.91	0.030	3.27	0.021	533	3.319	12.0
5	3.12	0.020	2.05	0.013	610	3.799	12.0
	3.78	0.024	2.52	0.016	552	3.437	12.0
6	5.06	0.031	3.20	0.019	647	4.029	12.0
	4.32	0.026	2.88	0.017	455	2.833	12.0
16	3.73	0.022	2.42	0.014	649	4.042	12.0
	5.09	0.030	3.39	0.020	518	3.225	12.0
19	4.51	0.027	2.87	0.017	569	3.543	12.0
	5.01	0.029	3.34	0.020	541	3.369	12.0
30	3.76	0.023	2.36	0.015	561	3.493	11.5
	3.95	0.025	2.63	0.016	546	3.400	12.0
31	4.31	0.024	2.84	0.016	335	2.086	7.0
	3.55	0.020	2.37	0.013	235	1.463	7.0
34	5.94	0.035	3.54	0.021	554	3.450	12.0
	5.33	0.031	3.55	0.021	538	3.350	12.0
<i>M</i>	4.76	0.029	2.96	0.018	582	3.626	11.3
	4.25	0.026	2.83	0.018	490	3.051	11.4
$\pm m$	0.40	0.003	0.21	0.001	34	0.212	0.5
	0.31	0.002	0.21	0.001	33	0.209	0.6

чалось ненормальное распределение указанных показателей. При сравнении между собой значений показателей ^{137}Cs и ^{90}Sr зависимых выборок 2011 и 2016 г. выявлено, что значимые различия отсутствуют ($p > 0.05$), что подтверждалось расчетом значений t -критерия Стьюдента. Расчет критерия Вилкоксона по удельной активности и плотности загрязнения ^{40}K двух зависимых выборок 2011 и 2016 г. показал, что между ними имеются существенные различия ($p < 0.05$).

Изменение значений показателей МЭД γ -фона на всем протяжении мониторинга подчинялось закону ненормального распределения признака. При сравнении значений МЭД зависимых выборок по критерию Вилкоксона выявлено, что достоверных различий не имеется ($p > 0.05$).

В среднем, за время проведения мониторинга МЭД γ -излучения серых лесных почв реперных участков Владимирской области соответствует среднему значению, характерному для почв сельскохозяйственных угодий России (11.4 мкР/ч) [11]. Кроме того, полученные нами значения МЭД γ -излучения почв участков полностью подтвер-

ждаются и данными, приведенными в работе Т.А. Трифионовой [12].

Проведенный корреляционный анализ показал наличие достоверных прямых корреляционных связей высокой силы между МЭД γ -излучения почвы и удельной активностью ^{40}K в 2011 г.: $r_{(\text{МЭД}/^{40}\text{K})} = 0.91$ и в 2016 г.: $r_{(\text{МЭД}/^{40}\text{K})} = 0.95$, при $r_{\text{знач}} = 0.67$. Следует отметить, что из ряда РН, являющихся γ -излучателями, ^{40}K отличается наибольшими концентрациями присутствия во многих почвах мира.

Отсутствие значимых корреляционных связей между МЭД γ -излучения почвы и удельной активностью ^{137}Cs в 2011 и 2016 г.: $r_{(\text{МЭД}/^{137}\text{Cs})} = 0.15$ и 0.06 соответственно, при $r_{\text{знач}} = 0.67$, можно объяснить очень низкими значениями активности и, следовательно, малым вкладом ^{137}Cs в формирование суммарного фона γ -излучения серых лесных почв участков Владимирской области.

Отмеченные корреляционные взаимосвязи между физико-химическими свойствами серой лесной почвы и удельными активностями ^{137}Cs ,

Таблица 3. Коэффициенты линейной корреляции Пирсона между свойствами почв и удельными активностями ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K **Table 3.** Pearson linear correlation coefficients between soil properties and specific activities ^{137}Cs , ^{90}Sr and ^{40}K

Свойства почвы/РН	Фракция <0.001 мм, %	Фракция <0.01 мм, %	$C_{\text{орг}}$, %	pH_{KCl}	Ca, смоль (экв)/100 г	Mg, смоль (экв)/100 г	S , смоль (экв)/100 г	^{137}Cs	^{90}Sr	^{40}K
^{137}Cs	$\frac{\text{н/о}}{0.25}$	$\frac{\text{н/о}}{-0.33}$	$\frac{0.44}{0.14}$	$\frac{-0.13}{0.25}$	$\frac{0.46}{-0.28}$	$\frac{-0.14}{0.36}$	$\frac{0.20}{0.08}$	—	0.99 1.00	$\frac{0.24}{0.08}$
^{90}Sr	$\frac{\text{н/о}}{0.25}$	$\frac{\text{н/о}}{-0.33}$	$\frac{0.41}{0.14}$	$\frac{-0.15}{0.25}$	$\frac{0.37}{-0.28}$	$\frac{-0.18}{0.36}$	$\frac{0.13}{0.08}$	0.99 1.00	—	$\frac{0.19}{0.08}$
^{40}K	$\frac{\text{н/о}}{-0.35}$	$\frac{\text{н/о}}{\mathbf{0.80}}$	$\frac{0.22}{0.51}$	$\frac{0.03}{-0.22}$	$\frac{\mathbf{0.80}}{\mathbf{0.67}}$	$\frac{0.44}{\mathbf{0.72}}$	$\frac{\mathbf{0.85}}{\mathbf{0.75}}$	$\frac{0.24}{0.08}$	$\frac{0.19}{0.08}$	—

Примечание. Значимые коэффициенты корреляции при $p < 0.05$ выделены полужирным (то же в табл. 4): $t_{\text{крит}} = 2.36$, $n = 9$, $r_{\text{знач}} = 0.67$.

^{90}Sr и ^{40}K , а также между самими изучаемыми радионуклидами указаны в табл. 3.

Данные по удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в культурных растениях и $K_{\text{п}}$ ^{137}Cs и ^{90}Sr из почвы в растения отражены в табл. 4.

Поступление РН из почв в растения зависит от типа почвы и ее свойств. В сельскохозяйственной радиобиологии установилось понимание того, что из кислых почв, обедненных основаниями Ca и Mg, легкого гранулометрического состава ^{137}Cs и ^{90}Sr более интенсивно поступают в растения по сравнению с высокоплодородными и богатыми основаниями почвами [13–15].

Кроме того, немаловажное влияние на накопление ИРН растениями оказывают и биологические особенности сельскохозяйственных культур, обусловленные видовой и сортовой принадлежностью. Например, различия в накоплении ^{90}Sr у зерновых и бобовых культур, выращенных на одной почве, различаются в 85 раз, у корнеплодов и овощных культур – в 350 раз [16], у кукурузы – в 10–15 раз [17], ^{137}Cs у картофеля – в 14 раз, а у моркови – в 2.5 раза [18].

ОБСУЖДЕНИЕ

Имеются многочисленные данные о связи содержания РН в почве с размером и удельной поверхностью почвенных частиц [19, 20].

Наличие мелкодисперсных частиц фракции физического ила (<0.001 мм, %) не коррелирует с накоплением изучаемых РН серой лесной почвой. В то же время, судя по значениям коэффициентов корреляции ($r = 0.80$, при $p = 0.05$), достоверно установлено, что содержание частиц фракции физической глины (<0.01 мм, %) приводит только к увеличению удельной активности ^{40}K в почве. Предположительно, это вызвано тем, что ^{40}K адсорбируется на поверхности почвенных ми-

нералов, размер частиц которых составляет от 0.01 до 0.001 мм.

Содержание $C_{\text{орг}}$ и уровень pH_{KCl} не оказывали достоверного влияния на аккумуляцию ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K серой лесной почвой.

Обменные Ca и Mg, а также другие поглощенные основания (параметр S) существенно влияли только на удельную активность ^{40}K в почвах участков.

Высокую корреляционную взаимосвязь прямой зависимости ($r = 0.99–1.00$, $p = 0.05$) между присутствием ^{137}Cs и ^{90}Sr в исследуемой почве, предположительно, можно объяснить некими схожими механизмами поглощения данных ИРН почвой (табл. 3).

Исследованием были определены последовательности культур в рядах накопления и перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr из серой лесной почвы реперных участков в 2011 и 2016 г. Установлено, что усредненное значение удельной активности в зеленой массе культур по ^{137}Cs снижалось в ряду: козлятник восточный > кукуруза сахарная > вика посевная, овес посевной > клевер розовый, тимopheевка луговая > ячмень > полевица собачья, мятлик луговой; удельная активность по ^{90}Sr снижалась в ряду: козлятник восточный > кукуруза сахарная > > полевица собачья, мятлик луговой > клевер розовый, тимopheевка луговая > вика посевная, овес посевной > ячмень.

Интенсивность перехода ^{137}Cs из почвы в растения снижалась в ряду: кукуруза сахарная > козлятник восточный > клевер розовый, тимopheевка луговая > вика посевная, овес посевной > полевица собачья, мятлик луговой > ячмень; ряд перехода ^{90}Sr был следующим: кукуруза сахарная > полевица собачья, мятлик луговой > козлятник восточный > клевер розовый, тимopheевка луговая > > вика посевная, овес посевной > ячмень.

Ряды последовательности культур по удельной активности и $K_{\text{п}}$ для ^{137}Cs несопоставимы между

Таблица 4. Параметры перехода и удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr в растениях
Table 4. Transition parameters and specific activity of ^{137}Cs and ^{90}Sr in plants

№ реперного участка	Культура (вид продукции)	Удельная активность, Бк/кг		$K_{\text{п}}$	
		^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr
3	<u>Ячмень (зеленая масса)</u> Пшеница (зерно/солома)	$\frac{1.18}{0.91/0.97}$	$\frac{1.22}{0.95/1.07}$	$\frac{0.91}{1.29/1.38}$	$\frac{1.57}{1.98/2.22}$
4	<u>Козлятник (зеленая масса)</u> Кукуруза (зеленая масса)	$\frac{2.05}{1.72}$	$\frac{2.17}{2.04}$	$\frac{1.29}{1.55}$	$\frac{2.35}{2.63}$
5	<u>н/о</u> Полевица, мятлик (зеленая масса)	$\frac{\text{н/о}}{1.32}$	$\frac{\text{н/о}}{1.99}$	$\frac{\text{н/о}}{1.49}$	$\frac{\text{н/о}}{3.36}$
6	<u>н/о</u> Яблоня (яблоки)	$\frac{\text{н/о}}{0.51}$	$\frac{\text{н/о}}{0.37}$	$\frac{\text{н/о}}{0.53}$	$\frac{\text{н/о}}{0.59}$
16	<u>н/о</u> Полевица, мятлик (зеленая масса)	$\frac{\text{н/о}}{1.27}$	$\frac{\text{н/о}}{1.37}$	$\frac{\text{н/о}}{1.14}$	$\frac{\text{н/о}}{1.85}$
19	<u>Клевер, тимopheевка (зеленая масса)</u> Вика, овес (зеленая масса)	$\frac{1.44}{1.32}$	$\frac{1.57}{1.39}$	$\frac{1.44}{1.23}$	$\frac{2.50}{1.88}$
30	<u>Клевер, тимopheевка (зеленая масса)</u> Полевица, мятлик (зеленая масса)	$\frac{1.00}{0.83}$	$\frac{1.21}{1.08}$	$\frac{1.18}{0.90}$	$\frac{2.18}{1.82}$
31	<u>Клевер, тимopheевка (зеленая масса)</u> Рожь (зерно/солома)	$\frac{1.29}{0.89/0.95}$	$\frac{1.40}{0.91/0.96}$	$\frac{1.45}{1.20/1.28}$	$\frac{2.36}{1.89/2.00}$
34	<u>Клевер, тимopheевка (зеленая масса)</u> Ячмень (зерно/солома)	$\frac{1.33}{1.23/1.35}$	$\frac{1.46}{1.31/1.36}$	$\frac{1.03}{1.07/1.18}$	$\frac{1.88}{1.69/1.75}$
$M \pm m$	Ячмень (зеленая масса)	1.18 ± 0.03	1.22 ± 0.02	0.91 ± 0.02	1.57 ± 0.02
	Пшеница (зерно/солома)	$0.91 \pm 0.02 / 0.97 \pm 0.03$	$0.95 \pm 0.03 / 1.07 \pm 0.02$	$1.29 \pm 0.02 / 1.38 \pm 0.02$	$1.98 \pm 0.02 / 2.22 \pm 0.03$
	Козлятник (зеленая масса)	2.05 ± 0.03	2.17 ± 0.04	1.29 ± 0.02	2.35 ± 0.05
	Кукуруза (зеленая масса)	1.72 ± 0.01	2.04 ± 0.02	1.55 ± 0.01	2.63 ± 0.03
	Полевица, мятлик (зеленая масса)	1.14 ± 0.16	1.48 ± 0.27	1.18 ± 0.17	2.35 ± 0.51
	Клевер, тимopheевка (зеленая масса)	1.27 ± 0.09	1.41 ± 0.08	1.27 ± 0.10	2.23 ± 0.13
	Яблоня (яблоки)	0.51 ± 0.02	0.37 ± 0.02	0.53 ± 0.01	0.59 ± 0.03
	Вика, овес (зеленая масса)	1.32 ± 0.02	1.39 ± 0.02	1.23 ± 0.02	1.88 ± 0.02
	Рожь (зерно/солома)	$0.89 \pm 0.01 / 0.95 \pm 0.02$	$0.91 \pm 0.01 / 0.96 \pm 0.01$	$1.20 \pm 0.01 / 1.28 \pm 0.01$	$1.89 \pm 0.02 / 2.00 \pm 0.02$
	Ячмень (зерно/солома)	$1.23 \pm 0.02 / 1.35 \pm 0.02$	$1.31 \pm 0.02 / 1.36 \pm 0.02$	$1.07 \pm 0.02 / 1.18 \pm 0.02$	$1.69 \pm 0.02 / 1.75 \pm 0.03$
$r_{\text{ИРН почва/ИРН растение}}$	Ячмень (зеленая масса)	0.45	0.57	$t_{\text{крит}} = 2.78, r_{\text{знач}} = 0.81$	
	Пшеница (зерно/солома)	0.69/0.46	0.89/0.38	$t_{\text{крит}} = 2.78, r_{\text{знач}} = 0.81$	
	Козлятник (зеленая масса)	0.98	0.82	$t_{\text{крит}} = 4.30, r_{\text{знач}} = 0.95$	
	Кукуруза (зеленая масса)	0.62	0.83	$t_{\text{крит}} = 4.30, r_{\text{знач}} = 0.95$	
	Полевица, мятлик (зеленая масса)	0.81	0.27	$t_{\text{крит}} = 2.78, r_{\text{знач}} = 0.81$	
	Клевер, тимopheевка (зеленая масса)	0.55	0.62	$t_{\text{крит}} = 4.30, r_{\text{знач}} = 0.95$	
	Яблоня (яблоки)	0.91	0.61	$t_{\text{крит}} = 2.78, r_{\text{знач}} = 0.81$	
	Вика, овес (зеленая масса)	0.72	0.59	$t_{\text{крит}} = 4.30, r_{\text{знач}} = 0.95$	
	Рожь (зерно/солома)	0.84/0.52	0.41/0.57	$t_{\text{крит}} = 2.31, r_{\text{знач}} = 0.63$	
	Ячмень (зерно/солома)	0.78/0.61	0.66/0.40	$t_{\text{крит}} = 2.31, r_{\text{знач}} = 0.63$	

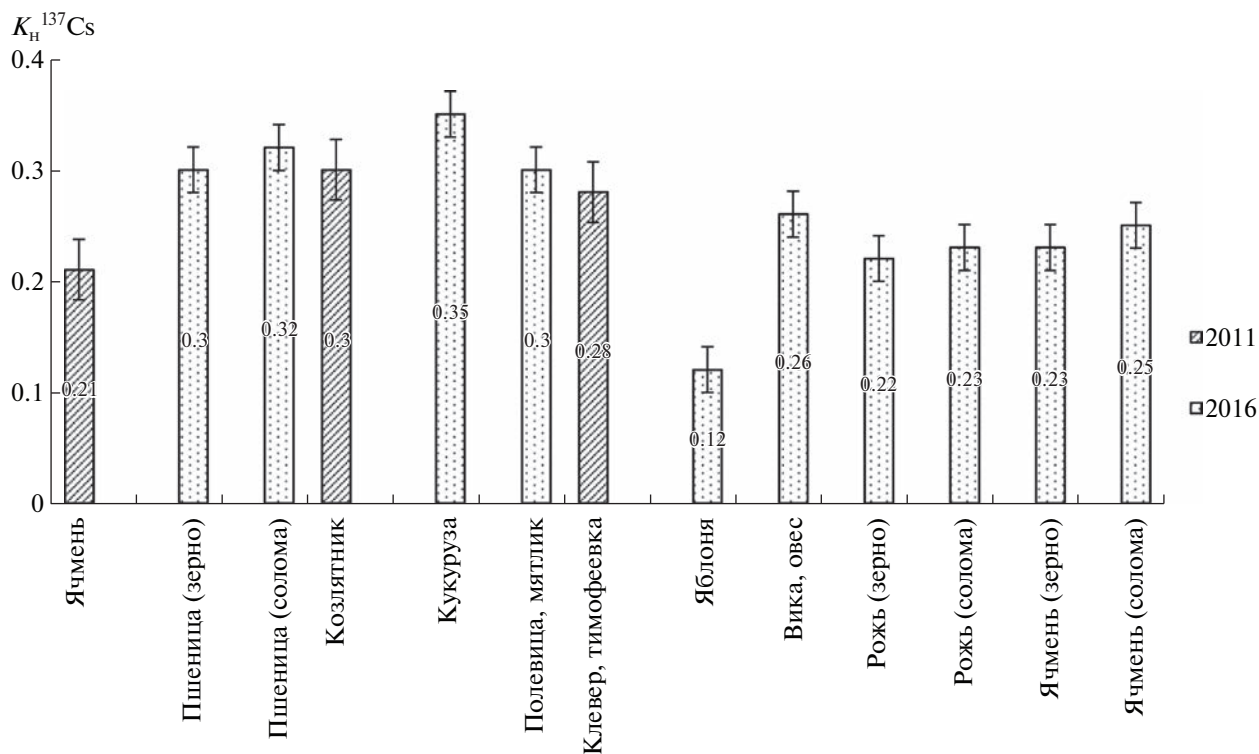


Рис. 2. Коэффициенты накопления ^{137}Cs растениями.
Fig. 2. Coefficients of accumulation of ^{137}Cs by plants.

собой, в отношении ^{90}Sr отмечалось сопоставление позиций в рядах для смесей из клевера и тимфеевки, вики и овса, а также ячменя.

Следует отметить, что в соломе ячменя больше накапливалось ^{137}Cs и ^{90}Sr , чем в зеленой массе этой культуры.

Среди зерновых культур удельная активность как по ^{137}Cs , так и по ^{90}Sr в соломе и зерне снижалась в ряду: ячмень > пшеница > рожь.

Фактические величины удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr (в пересчете на абсолютно сухое вещество) по всем видам культур полностью удовлетворяли санитарно-гигиеническим требованиям ВП 13.5.13/06–01 к ограничению содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в кормовых сеяных травах (зеленая масса) на уровне не более 100 и 50 Бк/кг и фуражном зерне злаковых — 200 и 140 Бк/кг в сырой массе соответственно [21].

Согласно СанПин 2.3.2.1078–01 [22], содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в плодах яблони не нормируется, однако плоды яблони отличались среди всех изучаемых культур наименьшим накоплением ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Установленные для культур величины K_n ^{137}Cs и ^{90}Sr для надземной фитомассы травостоев на обследованных участках укладывались в пределы от 0.12 до 0.36 и от 0.13 до 0.62 соответственно, что

достаточно хорошо подтверждалось значениями K_n ^{137}Cs = 0.12–2.08 и K_n ^{90}Sr = 0.20–0.86, приведенными в работе [23].

Многочисленными исследованиями установлено, что ИРН в генеративных органах растений (зерно, плоды и др.) накапливаются в меньших количествах, чем в надземных вегетативных органах (солома, листья) [20, 24]. В нашем исследовании зерно озимой ржи, яровой пшеницы и ячменя меньше накапливало как ^{137}Cs , так и ^{90}Sr по сравнению с соломой этих культур. Данный факт может указывать на наличие у этих растений защитных механизмов, препятствующих излишнему проникновению ^{137}Cs и ^{90}Sr в генеративные органы из вегетативных.

Накопление ^{90}Sr всеми культурами происходило в 1.1–2 раза более интенсивно, чем ^{137}Cs , о чем говорят полученные значения K_n (рис. 2, 3).

Расчет коэффициентов корреляции Пирсона ($p = 0.95$), показал, что между удельной активностью ^{137}Cs и ^{90}Sr в зерне и соломе пшеницы отмечена недостоверная взаимосвязь: $r_{^{137}\text{Cs зерно/солома}} = -0.13$ и $r_{^{90}\text{Sr зерно/солома}} = 0.58$, $r_{\text{знач}} = 0.81$; в зерне и соломе ржи выявлена недостоверная взаимосвязь: $r_{^{137}\text{Cs зерно/солома}} = 0.56$ и $r_{^{90}\text{Sr зерно/солома}} = -0.16$, $r_{\text{знач}} = 0.63$; в зерне и соломе ячменя установлена

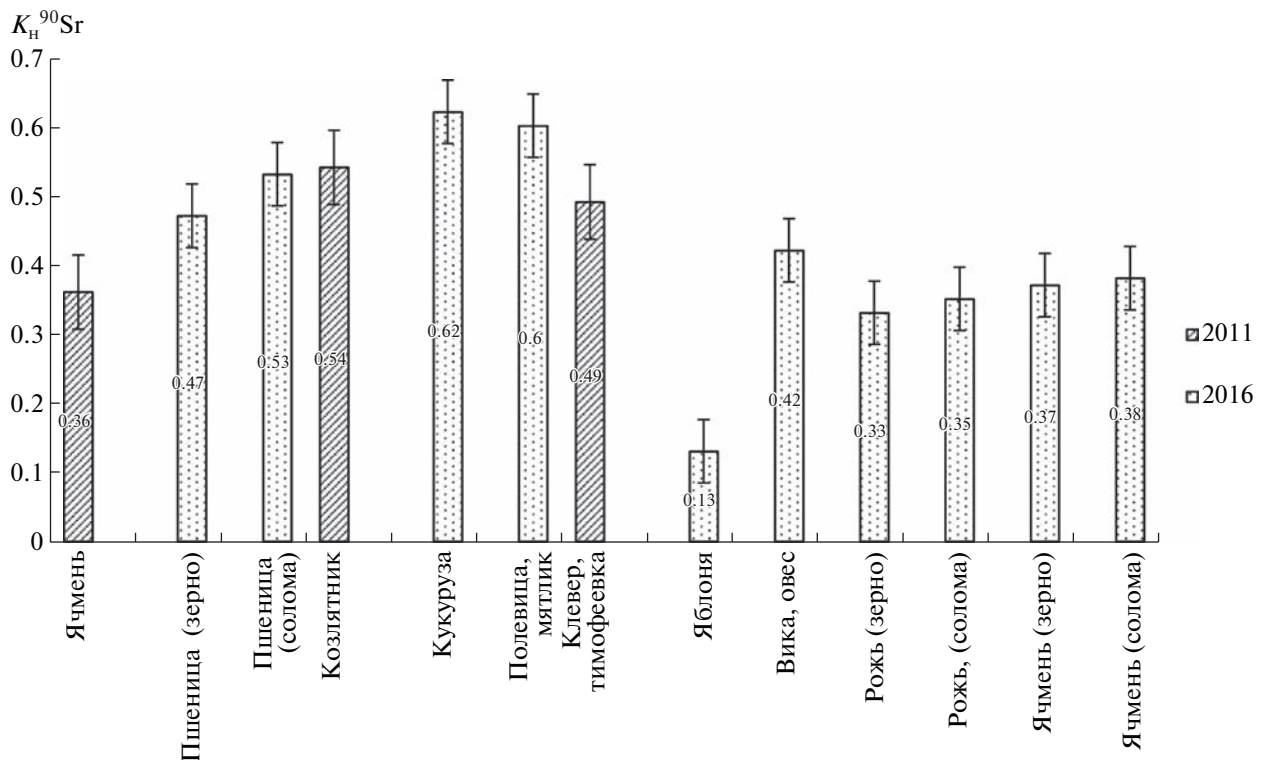


Рис. 3. Коэффициенты накопления ^{90}Sr растениями.

Fig. 3. Coefficients of accumulation of ^{90}Sr by plants.

прямая значимая взаимосвязь: $r_{^{137}\text{Cs} \text{ зерно/солома}} = 0.71$ и $r_{^{90}\text{Cs} \text{ зерно/солома}} = 0.68$, $r_{\text{знач}} = 0.63$.

Расчет коэффициентов перехода ^{137}Cs и ^{90}Sr (табл. 4) из почвы в сельскохозяйственные культуры показал, что процесс перехода ^{90}Sr из почвы в растения всех видов протекал интенсивнее, чем переход ^{137}Cs .

При сравнении значений K_n ^{137}Cs и ^{90}Sr для одних и тех же видов растений выяснилось, что ^{137}Cs и ^{90}Sr хуже переходят в плоды яблони, и лучше — в зеленую массу кукурузы.

Сила корреляционной взаимосвязи между значениями удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах и растениях изменялась в зависимости от видовой принадлежности культур (табл. 4). Между рассматриваемыми показателями отмечалась связь прямой зависимости, преимущественно средней и высокой силы взаимосвязи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенного радиационного мониторинга установлено, что средние значения удельных активностей ^{137}Cs и ^{90}Sr в серых лесных почвах реперных участков Владимирской области не превышали значений фона глобальных выпадений. Удельная активность почв участков по

^{40}K была в 1.09–1.29 раза выше среднемирового показателя и типичного значения, характерного для данной почвы.

Усредненная удельная активность почв участков по ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{40}K в 2011 г. была выше, чем в 2016 г.

Присутствие ^{137}Cs и ^{90}Sr в серой лесной почве обусловлено, в основном, глобальными выпадениями ИРН на территории области, а содержание ^{40}K определяется генезисом и физико-химическими свойствами почв.

Плотность загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr в пахотном горизонте почв участков была значительно ниже допустимых уровней относительно удовлетворительной экологической обстановки — 1 и 0.1 Ки/км² соответственно, что позволяет отнести серые лесные почвы всех участков к незагрязненным территориям, пригодным без ограничений для сельскохозяйственного использования.

Формируемое γ -излучение почв участков соответствует среднему значению, характерному для почв сельскохозяйственных угодий России. Наибольший достоверный вклад в формирование γ -излучения почв отмечался со стороны ^{40}K , а наименьший несущественный — от ^{137}Cs в течение всего периода радиационного мониторинга.

Существенная корреляционная взаимосвязь отмечалась только между удельной активностью ^{40}K с частицами фракции физической глины, а также между ^{40}K и содержанием обменных Са, Mg и других поглощенных оснований в почве. В остальных случаях достоверно отмеченной корреляции между другими физико-химическими свойствами почвы с удельными активностями изучаемых радионуклидов не обнаружено. Высокую корреляционную взаимосвязь между присутствием ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах реперных участков, вероятно, можно объяснить схожими механизмами поглощения данных радионуклидов серой лесной почвой.

Усредненное значение удельной активности зеленой массы культур по ^{137}Cs снижалось в ряду: козлятник восточный > кукуруза сахарная > вика посевная, овес посевной > клевер розовый, тимopheевка луговая > ячмень > полевица собачья, мятлик луговой; по ^{90}Sr : козлятник восточный > кукуруза сахарная > полевица собачья, мятлик луговой > клевер розовый, тимopheевка луговая > вика посевная, овес посевной > ячмень.

В соломе ячменя больше накапливалось ^{137}Cs и ^{90}Sr , чем зеленой массе этой культуры. Среди зерновых культур удельная активность как по ^{137}Cs , так и по ^{90}Sr в соломе и зерне снижалась в ряду: ячмень > пшеница > рожь.

Величины удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr по всем видам культур и выращенной продукции полностью удовлетворяли санитарно-гигиеническим нормам к ограничению содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в растительной продукции, предназначенной на корм животным и в пищу человеку (яблоку).

Судя по полученным значениям коэффициентов накопления, поглощение ^{90}Sr всеми растениями происходило в 1.1–2 раза более интенсивно, чем ^{137}Cs .

Между значениями удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в почвах и растениях отмечалась корреляция прямой связи, в основном, средней и высокой силы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физические величины: Справочник / Под ред. И.С. Григорьева и Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с. [Fizicheskie velichiny: Spravochnik / Pod red. I.S. Grigor'eva i E.Z. Meilikhova. M.: Energoatomizdat, 1991. 1232 p. (In Russ.)]
2. Saleh M.S., Ramli A.T., Alajerami Y. et al. Assessment of environmental ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K concentrations in the region of elevated radiation background in Segamat District, Johr, Malaysia // J. Environ. Radioact. 2013. V. 124. P. 130–140.
3. Уткин А.А. Оценка радиационной обстановки на реперных участках сельскохозяйственных угодий Владимирской области // Радиационная биология. Радиоэкология. 2022. Т. 62. № 6. С. 660–672. [Utkin A.A. Assessment of the radiation situation in reference areas of agricultural lands of the Vladimir region // Radiation biology. Radioecology. 2022. V. 62. № 6. P. 660–672. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.31857/S0869803122060133>
4. Гаврилова И.П., Касимов Н.С. Практикум по геохимии ландшафта. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1989. 73 с. [Gavrilova I.P., Kasimov N.S. Praktikum po geokhimmii landshafta. M.: Izd-vo Mosk. un-ta, 1989. 73 p. (In Russ.)]
5. Радиохимическое определение удельной активности цезия-137 и стронция-90 в пробах пищевой продукции, почвы, других объектов окружающей среды и биопробах: Методические рекомендации МР 2.6.1.0094–14. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2014. 43 с. [Radiokhimicheskoe opredelenie udel'noi aktivnosti tseziya-137 i strontsiya-90 v probakh pishchevoi produktsii, pochvy, drugih ob'ektov okruzhayushchei sredy i bioprobakh: Metodicheskie rekomendatsii MR 2.6.1.0094–14. M.: Federal'nyi tsentr gigeny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2014. 43 p. (In Russ.)]
6. Методические указания по проведению комплексного мониторинга плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения. М.: ФГНУ “Росинформагротех”, 2003. 240 с. [Metodicheskie ukazaniya po provedeniyu kompleksnogo monitoringa plodorodiya pochv zemel' sel'skohozyajstvennogo naznacheniya. M.: FGNU “Rosinformagrotekh”, 2003. 240 s. (In Russ.)]
7. Апарин Б.Ф., Мингареева Е.В., Санжарова Н.И. и др. Содержание радионуклидов (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{137}Cs) в черноземах Волгоградской области разных сроков отбора образцов // Почвоведение. 2017. № 12. С. 1457–1467. [Aparin B.F., Mingareeva E.V., Sanzharova N.I. et al. Concentrations of radionuclides (^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , and ^{137}Cs) in chernozems of Volgograd oblast sampled in different years // Euras. Soil Sci. 2017. V. 50. № 12. P. 1395–1405. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.7868/S0032180X17120036>
8. Почвоведение: Учеб. для ун-тов. В 2 ч. / Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. Ч. 1. Почва и почвообразование / Г.Д. Белицина, В.Д. Васильевская, Л.А. Гришина и др. М.: Высш. школа, 1988. 400 с. [Pochvovedenie: Ucheb. dlya un-tov. V 2 ch. / Pod red. V.A. Kovdy, B.G. Rozanova. Ch. 1. Pochva i pochvoobrazovanie / G.D. Belitsina, V.D. Vasil'evskaya, L.A. Grishina i dr. M.: Vysshaya shkola, 1988. 400 p. (In Russ.)]
9. Радиационная обстановка на территории СССР в 1990 г. / Под ред. К.П. Махонько. Госкомгидромет СССР. Обнинск: НПО “Тайфун”, 1991. [Radiatsionnaya obstanovka na territorii SSSR v 1990 g. / Pod red. K.P. Makhon'ko. Goskomgidromet SSSR. Obninsk: NPO “Taifun”, 1991. (In Russ.)]
10. Критерии оценки экологической обстановки территории для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия / Под ред. Н.Г. Рыбальского. М.: Минприроды России, 1992. [Kriterii otsenki ekologicheskoi obstanovki territorii dlya vyyavleniya zon chrezvychainoi ekolog-

- icheskoj situatsii i zon ekologicheskogo bedstviya / Pod red. N.G. Rybal'skogo. M.: Minprirody Rossii, 1992. (In Russ.)]
11. Орлов П.М., Сычев В.Г., Жиленко С.В. Радиоактивность почв юга России // Нива Поволжья. 2017. № 1 (42). С. 53–60. [Orlov P.M., Sychev V.G., Zhilenko S.V. Radioactivity of soils in the south of Russia // Volga Region Farmland. 2017. № 1 (42). P. 53–60. (In Russian)]
12. Трифонова Т.А. Экологический атлас Владимирской области / Под ред. Т.А. Трифоновой. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2007. 92 с. [Trifonova T.A. Ekologicheskii atlas Vladimirovskoi oblasti / Pod red. T.A. Trifonovoi. Vladimir: Izd-vo VIGU, 2007. 92 p. (In Russian)]
13. Сельскохозяйственная радиоэкология / Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М.: Экология, 1992. 400 с. [Sel'skokhozyaistvennaya radioekologiya / Pod red. R.M. Alexakhina, N.A. Korneeva. M.: Ekologiya, 1992. 400 p. (In Russ.)]
14. Staunton S., Hinsinger P., Guivarch A. et al. Root uptake and translocation of radiocaesium from agricultural soils by various plant species // Plant and Soil. 2003. V. 254. P. 443–455.
15. Zhu Y.-G., Smolders E. Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanisms, regulation and application // J. Exp. Bot. 2000. V. 51. № 351. P. 1635–1645.
16. Архипов Н.П., Федоров Е.А., Алексахин Р.М. и др. Почвенная химия и корневое накопление искусственных радионуклидов в урожае сельскохозяйственных растений // Почвоведение. 1975. № 11. С. 40–52. [Arhipov N.P., Fedorov Ye.A., Alexahin R.M. i dr. Pochvennaya himiya i kornevye nakopleniye iskusstvennykh radionuklidov v urozhay sel'skohozyajstvennykh rastenij // Pochvovedeniye. 1975. № 11. P. 40–52. (In Russ.)]
17. Schneider R., Kuznetsov V.K., Sanzharova N.I. et al. Soil-to-plant and soil-to-grain transfer of ^{137}Cs in fieldgrow maize hybrids during two contrasting seasons: assessing the phenotypic variability and its genetic component // Radiat. Environ. Biophys. 2008. V. 47. P. 241–252.
18. Кожыханов Т.Е., Лукашенко С.Н. Содержание радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{241}Am в продукции растениеводства на территориях, прилегающих к Семипалатинскому испытательному полигону // Радиация. Радиоэкология. 2017. Т. 57. № 2. С. 220–225. [Kozhakhanov T.E., Lukashenko S.N. Content of ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239+240}\text{Pu}$ and ^{241}Am radionuclides in vegetable products produced in the territory adjacent to the Semipalatinsk test site // Radiation biology. Radioecology. 2017. V. 57. № 2. P. 220–225. (In Russ.)]
<https://doi.org/10.7868/S0869803117020102>
19. Безносиков В.А., Лодыгин Е.Д., Шуктомова И.И. Искусственные и естественные радионуклиды в почвах южно- и среднетаежных подзон Республики Коми // Почвоведение. 2017. № 7. С. 824–829. [Beznosikov V.A., Lodygin E.D., Shuktomova I.I. Artificial and natural radionuclides in soils of the southern and middle taiga zones of Komi Republic // Euras. Soil Sci. 2017. V. 50. № 7. P. 814–819. (In Russ.)].
<https://doi.org/10.7868/S0032180X17050033>
20. Санжарова Н.И., Гешель И.В., Крыленкин Д.В. и др. Современное состояние исследований поведения ^{90}Sr в системе почва–сельскохозяйственные растения (обзор) // Радиация. Радиоэкология. 2019. Т. 59. № 6. С. 643–665. [Sanzharova N.I., Geshel I.V., Krylenkin D.V. et al. Current state of studies on ^{90}Sr behavior in the soil–agricultural plants system (overview) // Radiation biology. Radioecology. 2019. V. 59. № 6. P. 643–665. (In Russ.)].
<https://doi.org/10.1134/S0869803119060109>
21. Ветеринарно-санитарные требования к радиационной безопасности кормов, кормовых добавок, сырья кормового. Допустимые уровни содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs . Ветеринарные правила и нормы ВП 13.5.13/06–01 (утв. Минсельхозом РФ 19.12.2000). [Veterinarno-sanitarnye trebovaniya k radiatsionnoi bezopasnosti kormov, kormovykh dobavok, syr'ya kormovogo. Dopustimye urovni soderzhaniya ^{90}Sr i ^{137}Cs . Veterinarnye pravila i normy VP 13.5.13/06–01 (utv. Minsel'khozom RF 19.12.2000). (In Russ.)]
22. Постановление Главного государственного санитарного врача РФ от 14.11.2001 N 36 (ред. от 06.07.2011) “О введении в действие Санитарных правил” (СанПиН 2.3.2.1078–01. 2.3.2. Продовольственное сырье и пищевые продукты. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы, утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 06.11.2001). [Postanovlenie Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 14.11.2001 N 36 (red. ot 06.07.2011) “O vvedenii v deistvie Sanitarnykh pravil” (SanPiN 2.3.2.1078–01. 2.3.2. Prodovol'stvennoe syr'e i pishchevye produkty. Gigienicheskie trebovaniya bezopasnosti i pishchevoi tsennosti pishchevykh produktov. Sanitarно-epidemiologicheskie pravila i normativy, utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom RF 06.11.2001. (In Russ.)]
23. Ефремов И.В., Рахимова Н.Н., Янчук Е.Л. Особенности миграции радионуклидов цезия-137 и стронция-90 в системе почва – растение // Вестн. ОГУ. 2005. № 12. С. 42–46. [Efremov I.V., Rahimova N.N., Yanchuk E.L. Osobennosti migratsii radionuklidov ceziya-137 i stronciya-90 v sisteme pochva – rastenie // Vestnik OGU. 2005. № 12. S. 42–46. (In Russ.)]
24. Андреева Н.В., Белова Н.В., Кузнецов В.К. и др. Влияние различных видов органических удобрений на переход ^{137}Cs в урожай зерновых культур // Радиация. Биология. Радиоэкология. 2020. Т. 60. № 1. С. 117–125. [Andreeva N.V., Belova N.V., Kuznetsov V.K. et al. Influence of different types of organic fertilizers on the transfer of ^{137}Cs into the grain crops harvest // Radiation biology. Radioecology. 2020. V. 60. № 1. P. 117–125 (In Russ.)].
<https://doi.org/10.31857/S086980312001004X>

Monitoring of ^{137}Cs , ^{90}Sr and ^{40}K in Gray Forest Soils and Plants of Reference Sites of the Vladimir Region

A. A. Utkin^{a, #}

^a *Ivanovo State Agricultural Academy D.K. Belyaev, Ivanovo, Russia*

[#] *E-mail: aleut@inbox.ru*

The paper presents the results of radiation monitoring of gray forest soils of reference agricultural plots of the Vladimir region, conducted in 2011 and 2016. The study established background values of specific activities of the studied radionuclides in the soils of reference sites. According to the density of contamination of the arable horizon of soils ^{137}Cs and ^{90}Sr , the level of the ecological situation was determined, which made it possible to attribute the soils of all reference areas of the region to uncontaminated territories suitable without restrictions for agricultural use. The power of the exposure dose of gamma radiation of soils and the contribution of ^{40}K and ^{137}Cs to the formation of the gamma background of soils are established. Correlation analysis determined the influence of individual physical and chemical properties of soils on the behavior and distribution of radionuclides in the soil and the relationship between the radionuclides themselves. Based on the values of the specific activity of ^{137}Cs and ^{90}Sr in plant products grown on the soils of reference sites in 2011 and 2016, rows of cultivated plants were constructed, with a decreasing ability to accumulate these radionuclides from the soil. All grown plant products for all types of crops fully met the sanitary and hygienic standards required to limit the content of ^{137}Cs and ^{90}Sr in plant feeds (green mass, straw and grain) and food products (apples). According to the transition coefficients, it was found that the process of transition of ^{90}Sr from soil to plants of all kinds proceeded more intensively than the transition of ^{137}Cs . The calculated coefficients of linear correlation between the values of the specific activity of ^{137}Cs and ^{90}Sr in soils and plants revealed the strength and nature of their dependencies.

Keywords: radiation monitoring, ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{40}K , gray forest soil, plants, reference sites, Vladimir region

РЕЦЕНЗИИ

САЗЫКИНА Т.Г., КРЫШЕВ А.И., КРЫШЕВ И.И. Моделирование радиоэкологических процессов в окружающей среде. М.: ООО “Маска”, 2022. 638 с.

DOI: 10.31857/S086980312302008X, EDN: EOZXDG

Монография включает в себя 15 глав, объединенных в две части: Часть I. Моделирование переноса и накопления радионуклидов в природных экосистемах. Часть II. Радиационная безопасность окружающей среды – экологическое нормирование.

Сразу можно отметить, что материал, представленный в монографии, выходит за рамки темы применения математического моделирования в радиоэкологии. Однако это, с нашей точки зрения, можно только приветствовать. Авторы представляют свою точку зрения на общую проблематику, связанную с радиоактивностью биосферы и ее компонентов. Приводится много разнообразного фактологического материала, причем ряд затрагиваемых вопросов очень важен при создании радиоэкологических моделей. В частности, рассматриваются факторы, влияющие на ассимиляцию радионуклидов организмами, обсуждается вопрос о применимости представлений о статичности коэффициентов накопления радионуклидов живыми организмами.

Далее они рассматривают методологию экологического моделирования и ее адаптацию к радиоэкологическим задачам, останавливаются на аспектах миграции радионуклидов в экосистемах. Представлены примеры использования математического моделирования для реконструкции и прогноза реальных радиоэкологических ситуаций, а именно:

– Моделирование аварийного радиоактивного загрязнения экосистемы водоема-охладителя Чернобыльской АЭС.

– Моделирование размерного эффекта в накоплении радионуклидов в популяциях рыб.

– Оценка динамики накопления ^{137}Cs в гидробионтах оз. Кожановское (Брянская область).

– Моделирование аккумуляции ^{90}Sr гидробионтами и применение модели для оценки динамики радионуклида в оз. Урускуль, ВУРС.

– Моделирование накопления и биологического переноса ^{32}P , ^{137}Cs и ^{65}Zn в оседлых и мигрирующих видах рыб р. Енисей.

– Оценка динамики загрязнения морской биоты в районе расположения аварийной АЭС

“Фукусима” (Япония) в послеварийный период 2011 г.

Вторая часть монографии посвящена рассмотрению расчетных методов оценки доз внешнего и внутреннего облучения биоты, включая специализированное программное обеспечение ERICA Tool и авторские методы экспресс-расчета поглощенных фракций энергии инкорпорированных β - и γ -излучателей в мягких биологических объектах. Описывается оценка дозовых нагрузок на биоту в реальных радиоэкологических ситуациях, а именно:

– Реконструкция доз облучения гидробионтов водоема-охладителя Чернобыльской АЭС.

– Реконструкция доз облучения гидробионтов озер на территории ВУРС после Кыштымской радиационной аварии 1957 г.

– Облучение биоты в районе хранилища РАО (водоем Карачай, ПО “Маяк”).

– Оценка дозы и радиационного риска для щуки (*Esox lucius*) в речной системе Теча–Исеть–Тобол–Иртыш.

– Реконструкция динамики доз облучения гидробионтов р. Енисей.

– Оценки доз облучения биоты в районе расположения Приаргунского производственного горно-химического объединения.

– Оценка радиационного воздействия на биоту Северной Атлантики.

– Дозы облучения биоты в районе расположения аварийной АЭС “Фукусима” (Япония) в ранний период после аварии (март–май 2011 г.).

Отдельные главы посвящены формированию методологии радиационной безопасности окружающей среды, определению безопасных уровней облучения для обоснования радиационной защиты природной биоты, расчетам контрольных уровней содержания радионуклидов в окружающей среде, обеспечивающих радиационную защиту природных объектов, влиянию экологических взаимодействий на проявления радиационных эффектов в природных экосистемах.

Особый интерес, с нашей точки зрения, представляет глава 14, которая посвящена математическому моделированию радиационных эффек-

тов в популяциях и экосистемах. Рассматриваются следующие вопросы:

- Радиационные эффекты в популяции с лимитирующим ресурсом, модель PLIMEN.
- Международный тестовый сценарий “Реагирование популяций на хроническое облучение”.
- Расчеты тестового сценария с использованием модели PLIMEN.
- Радиационные эффекты в модели PSR.
- Моделирование эффектов облучения в системе “хозяин–паразит”.
- Моделирование эффектов острого и хронического облучения.
- Проявление эффектов ионизирующей радиации в холодном климате.
- Моделирование радиационных эффектов в модели PSR-ECO.
- Построение теоретической шкалы популяционной чувствительности животных к хроническому воздействию ионизирующей радиации.

В завершающей главе обсуждается методология оценки экологического риска от радиоактивного загрязнения окружающей среды, а именно методология анализа, критерии и показатели оценки радиационного экологического риска, необходимость учета сочетанного действия ионизирующей радиации и нерадиационных факторов, вопросы экологического нормирования.

Завершает книгу обширный список литературы, который, как нам кажется, будет полезен многим радиоэкологам и в первую очередь тем, кто так или иначе причастен к созданию радиоэкологических математических моделей.

Авторы монографии уделяют основное внимание моделированию поведения радионуклидов и расчетам дозообразования в водных экосистемах. По вопросу применения математического моделирования в радиоэкологии наземных экосистем можно посоветовать обратиться к работам отечественных и зарубежных авторов, например, А.А. Булгакова, А.В. Коноплёва, Ю.А. Кутлахмедова, В.Г. Линника, С.В. Мамихина, А.Н. Переволоцкого, С.И. Спиридонова, С.В. Фесенко, J.P. Absalom, R. Avila, F. Goor, T.B. Kirchner, H. Muller, G. Prohl, Y. Thiry, W.F. Whicker и многих других.

В целом данная монография представляет собой весьма интересный и информативный научный труд, который, по нашему мнению, будет востребован как специалистами в области радиоэкологического моделирования, так и радиоэкологами более широкого профиля. Сами авторы позиционируют книгу для научных работников и специалистов в области мониторинга и охраны окружающей среды, аварийного реагирования и прогнозирования радиационной обстановки, радиоэкологии, экологической безопасности ядерной энергетики. Следует отметить доступность изложения и наглядное представление предлагаемого в монографии материала, что позволит, как нам кажется, с успехом использовать книгу также в образовательном процессе профильных учебных заведений.

Монография в цифровом виде с согласия авторов размещена на сайте кафедры Радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова по адресу <http://soil.msu.ru/kaf-radioecologia/ecoradmod>.

С. В. Мамихин

**ЮБИЛЕЙНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
“АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАДИАЦИОННОЙ БИОЛОГИИ.
К 60-ЛЕТИЮ СОЗДАНИЯ НАУЧНОГО СОВЕТА РАН
ПО РАДИОБИОЛОГИИ”
(25–27 октября 2022 г., Дубна, ОИЯИ)**

DOI: 10.31857/S0869803123020054, EDN: EOXJJS

25–27 октября 2022 г. в Дубна, ОИЯИ, Отделение физиологических наук РАН, Радиобиологическое общество РАН и Объединенный институт ядерных исследований провели Юбилейную конференцию, посвященную 60-летию создания Научного совета РАН по радиобиологии. Организаторами конференции были Научный совет по радиобиологии и Лаборатория радиационной биологии ОИЯИ. Оргкомитет конференции возглавляли председатель Научного совета по радиобиологии чл.-корр. РАН Е.А. Красавин, Президент Радиобиологического общества РАН академик РАН И.Б. Ушаков и директор ЛРБ ОИЯИ д-р физ.-мат. наук А.Н. Бугай. В заседаниях, проведенных в смешанном формате (очное и онлайн-участие), приняли участие около 100 ученых из научно-исследовательских институтов, научных центров, лабораторий Российской академии наук, ОИЯИ, Федерального медико-биологического агентства России, Минздрава РФ, Минобороны РФ, университетов и других учебных учреждений, научно-производственных объединений из Москвы, Дубны, Обнинска, Пущино, Сарова, Северска, на связи онлайн были ученые из Санкт-Петербурга, Челябинска, Томска и других городов. Важно особо отметить присутствие на заседаниях большого числа молодых участников.

В первый день мероприятия, 25 октября 2022 г., прошел юбилейный Пленум Научного совета РАН по радиобиологии. Участников пленума приветствовал директор ОИЯИ академик РАН Г.В. Трубников, который отметил, что ОИЯИ сотрудничает с Научным советом РАН по радиобиологии с начала 1960-х годов. Ученые ОИЯИ входят в состав Совета, научный руководитель ЛРБ ОИЯИ Е.А. Красавин возглавляет Совет. Г.В. Трубников подчеркнул, что Научный совет РАН по радиобиологии принимает активное участие в реализации научных программ ОИЯИ по ряду направлений медицины, биологии, физиологии и в других областях. К юбилею Совета были получены приветствия от Отделения физиологических наук РАН, Радиобиологического общества РАН, руководства ФМБЦ им. А.И. Бурназяна. Далее на

мемориальном заседании были заслушаны выступления, посвященные созданию, истории, основным этапам деятельности Научного совета, роли Совета в развитии науки.

Научный совет при АН СССР по комплексной проблеме “Радиобиология” (в настоящее время — Научный совет РАН по радиобиологии) был сформирован по решению Президиума АН СССР в 1961–1962 гг. Его деятельность началась с первого заседания Совета.

21 февраля 1962 г. Первым председателем Научного совета (с 1962 по 1965 г.) был известный советский биофизик и физиолог, действительный член АН СССР Андрей Владимирович Лебединский. В состав Совета вошли видные специалисты-радиобиологи научных учреждений Академии наук СССР, Академий наук союзных республик, Академий медицинских наук СССР, ВАСХНИЛ, Министерства здравоохранения СССР, Министерства высшего и среднего специального образования СССР. В Бюро Совета входили такие известные ученые, как академик АМН СССР П.Д. Горизонтов, чл.-корр. АН СССР А.М. Кузин, чл.-корр. АН СССР Н.П. Дубинин, академик ВАСХНИЛ В.И. Ключковский и многие другие. С 1965 по 1987 г. Научный совет возглавлял крупный советский и российский радиобиолог, признанный лидер научной школы по радиационной биологии и организатор радиобиологических исследований в СССР, общественный деятель, чл.-корр. РАН Александр Михайлович Кузин; с 1987 по 2016 г. — известный советский и российский биолог и радиобиолог, д-р биол. наук Елена Борисовна Бурлакова. С 2017 г. председателем Совета является признанный специалист в области теоретической, медицинской и космической радиобиологии, чл.-корр. РАН, научный руководитель ЛРБ ОИЯИ Евгений Александрович Красавин.

Е.А. Красавин во вступительном слове охарактеризовал основные этапы работы Научного совета, его задачи. В обязанности Совета после его создания входили: подготовка координационных

планов научно-исследовательских работ в области радиобиологии и радиоэкологии в институтах АН СССР, включая учреждения Академий наук союзных республик; подготовка ежегодных отчетов о результатах выполнения планов научных исследований для руководства Отделений АН СССР и Президиума АН СССР; подготовка аналитических обзоров результатов мировых и отечественных исследований, прогноз развития научных исследований, определение наиболее актуальных направлений в области радиобиологии; организация и координация исследований в области радиобиологии и радиоэкологии в учреждениях Академии наук и других ведомств, решение вопросов финансирования. Е.А. Красавин отметил, что Научный совет всегда успешно выполнял и выполняет возложенные на него обязанности, демонстрируя важную роль радиационной биологии и радиоэкологии как для развития фундаментальной науки, так и для решения важнейших задач экономики, медицины, обеспечения безопасности страны.

В аудитории был показан видеофильм о жизни, научной и общественной деятельности председателя Научного совета А.М. Кузина. Вкладу Научного совета и его председателя Е.Б. Бурлаковой в деятельность Совета и развитие радиобиологии был посвящен доклад ученого секретаря Совета *В.И. Найдич*. В докладах *А.Н. Гребенюка* “Вклад военных медиков в работу Научного совета РАН по радиобиологии”; *И.А. Замулаевой* “Краткий очерк научной деятельности профессора А.С. Саенко”; *А.В. Рубановича* “О развитии радиационной генетики. Вклад В.А. Шевченко”; *С.В. Фесенко* “Вклад Р.М. Алексахина в развитие лесной радиоэкологии”; *О.А. Григорьева* “Вклад Ю.Г. Григорьева в деятельность Научного совета” было рассказано о жизни, научной и общественной деятельности известных ученых — членов Совета и о развитии основных направлений радиобиологии и радиоэкологии, входящих в сферу Совета.

К началу конференции был опубликован буклет “К 60-летию Научного совета РАН по радиобиологии” (Дубна, ОИЯИ, 2022, 39с., ISSN 978-5-9530-0584-5). В буклете представлены сведения о создании, составе и структуре Научного совета по радиобиологии, о его деятельности в период после крупнейшей радиационной катастрофы на Чернобыльской АЭС в 1986 г., изменившей условия жизни миллионов людей, а также направления научных исследований ученых — радиобиологов, радиологов, радиоэкологов.

Члены Научного совета принимали участие в подготовке необходимых законов и документов, связанных с защитой здоровья населения, подвергнувшегося действию радиации в результате аварии на ЧАЭС. Научный совет способствовал при-

нятию научно обоснованных решений о действии низкоинтенсивного хронического облучения на население и окружающую среду, об опасности недооценки воздействия радиации в малых дозах на здоровье людей.

Научный совет содействовал международным связям и контактам советских и российских ученых, организации их совместных исследований. В 2001 г., по решению IV Съезда по радиационным исследованиям, была разработана Международная программа Академий наук стран СНГ “Современные проблемы радиобиологии: Наука и практика” под эгидой Международной ассоциации академий наук СНГ (МААН). Программу возглавил академик РАН А.И. Григорьев. Целью программы были стимулирование и поддержка фундаментальных исследований в области радиобиологии, проводимых научными организациями академий наук стран СНГ, на основе последних достижений генетики, молекулярной биологии, геномики, протеомики и других разделов биологической науки. В 2009 г. по инициативе Научного совета на базе ИБХФ РАН и ИРБ НАН Беларуси была организована международная Российско-белорусская лаборатория электромагнитных и ионизирующих излучений.

Одним из направлений деятельности Научного совета АН СССР, а затем и РАН, по радиобиологии всегда являлись организация и проведение научных конференций, семинаров, школ по всем направлениям радиационной биологии и радиоэкологии — ежегодно проводились 2–3 мероприятия. Научный совет и Международный совет Международной программы академий наук стран СНГ оказывали активную поддержку проведению ежегодной Международной молодежной научной школы “Современные проблемы радиобиологии”, которую, начиная с 2001 г., проводят ученые МРНЦ им. А.Ф. Цыба и которая в настоящее время носит имя А.С. Саенко.

Значимым результатом деятельности Научного совета являлись проведение регулярных Съездов по радиационным исследованиям и создание Радиобиологического общества. Первый Всесоюзный радиобиологический съезд состоялся в Москве 21–27 августа 1989 г. В съезде приняли участие 1200 ученых из 180 учреждений 52 городов 14 союзных республик. На I Всесоюзном радиобиологическом съезде было принято решение о создании Радиобиологического общества РАН. В дальнейшем, с 1993 по 2021 г., состоялись еще семь съездов по радиационным исследованиям — крупных форумов радиобиологов, радиоэкологов и специалистов по близким направлениям науки.

Материалы, представленные и обсужденные на юбилейном пленуме Научного совета РАН по радиобиологии, показали, что Научный совет в настоящее время продолжает свою деятельность,

способствуя развитию фундаментальных научных исследований в области радиобиологии и радиоэкологии и их практических применений. В решении VIII Съезда по радиационным исследованиям (Москва, 12–15 октября 2021 г.) отмечено: “Считать актуальным и необходимым... развитие фундаментальных исследований в области радиационной биологии и радиоэкологии как основы радиационной безопасности населения, а также решения таких важнейших задач, как повышение эффективности применения радиации в медицине и сельском хозяйстве, обеспечения радиационной безопасности пилотируемых полетов в дальний космос”.

На пленуме был также обсужден ряд организационных вопросов: утверждение новых членов Научного совета, изменение структуры Научного совета и утверждение кураторов секций Совета, а также план мероприятий 2023–2024 гг.

В результате обсуждения в состав Научного совета были введены семь новых членов: С.А. Абдуллаев (ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России); А.А. Аклеев (Южно-Уральский государственный медицинский университет Минздрава РФ); А.В. Борейко (ЛРБ ОИЯИ); С.А. Васильев (НИИ медицинской генетики Томского НИМЦ); В.И. Попов, чл.-корр. РАН (Воронежский государственный медицинский университет им. Н.Н. Бурденко Минздрава РФ); М.В. Филимонова (МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ “НМИЦ радиологии” Минздрава РФ); С.В. Фесенко (ВНИИ радиологии и агроэкологии).

При обсуждении структуры Научного совета было решено объединить секции 9 и 10 в единую секцию 9 “Теоретическая радиобиология, микродозиметрия и дозиметрия”; была образована новая секция 10 по направлению “Радиационная безопасность и гигиеническое нормирование”. Принятая на заседании структура Совета приведена в таблице.

Изменения состава и структуры Научного совета по радиобиологии были утверждены Бюро ОФ РАН 22 ноября 2022 г. (Постановление № 64).

При обсуждении плана было принято решение в 2023 г. (согласно постановлению VIII съезда по радиационным исследованиям) начать работу по написанию учебника по радиобиологии: создать редакционный совет, состоящий из кураторов секций Научного совета, во главе с акад. И.Б. Ушаковым, разработать план учебника и правила написания глав учебника.

В план мероприятий 2023 г. было решено включить следующие мероприятия:

– VII Международная научно-практическая конференция “Медицинские и экологические эффекты ионизирующего излучения” (MEEIR-2023), 21–22 марта 2023г., г. Томск;

– Международная молодежная научная школа “Современные проблемы радиобиологии” имени А.С. Саенко, 22–26 мая 2023 г., г. Обнинск;

– конференция “Актуальные проблемы радиационной биологии. Молекулярно-генетические исследования в радиобиологии – к 70-летию открытия структуры ДНК”, 19–20 октября 2023 г., г. Дубна, ОИЯИ.

В рамках юбилейной конференции было отмечено также 30-летие со дня организации Радиобиологического общества РАН, созданного по решению I Всесоюзного радиобиологического съезда: “Создать Всесоюзное радиобиологическое общество, призванное содействовать общению ученых, обмену информацией, повышению координации научных исследований и их эффективности”. Общество было образовано 24 февраля 1992 г. на Учредительном собрании российских радиобиологов в г. Пушкино. 26 марта 1992 г. Радиобиологическое общество РАН было зарегистрировано при Отделении биологических наук РАН. Оно сохранило все традиции Радиобиологического общества СССР. Президентами общества были А.И. Газиев (1992–1998 и 2003–2021 гг.), В.А. Шевченко (1998–2003), с 2021 – акад. РАН И.Б. Ушаков, который выступил с информацией о работе и планах дальнейшей деятельности общества.

26 и 27 октября 2022 г. прошла научная часть юбилейной конференции, на которой прозвучали выступления ведущих радиобиологов и радиоэкологов страны по наиболее важным и актуальным направлениям радиобиологических исследований. Одним из таких направлений являются космическая радиобиология, изучение действия космической радиации на человека, поиск путей защиты, обеспечение радиационной безопасности межпланетных полетов. Заседание открыл И.Б. Ушаков (ФМБЦ им. А.И. Бурназяна), в докладе которого “Космическая радиация: 60 лет в эпицентре исследований Научного совета по радиобиологии” были охарактеризованы радиационные условия в ближнем и дальнем космосе, особенности дозиметрии космической радиации, последствия действия космических излучений для человека, проблема “малые дозы и мозг”, комбинированные воздействия, нормирование космической радиации, средства повышения резистентности и медико-биологической защиты от излучений, перспективные направления космической радиобиологии. Автор отметил, что “дальнейшее проникновение человека в космос связано с преодолением радиационного барьера нового для человека спектра. Для его последовательного преодоления остро необходима всеобъемлющая концепция радиационной безопасности человека во внеорбитальных полетах”. И.Б. Ушаков подчеркнул необходимость созда-

ния медико-дозиметрического регистра космонавтов с подробными паспортами здоровья.

Об изучении комбинированных модифицирующих эффектов других факторов космоса, и прежде всего невесомости, рассказал в своем докладе “Итоги и перспективы исследования нейробиологических эффектов комбинированного действия гипогравитации и ионизирующих излучений на экспериментальных животных” *А.С. Штемберг* (ИМБП РАН). Автор подчеркнул, что “... особенностью межпланетных полетов, отличающей их от орбитальных, является повышенный риск функциональных нарушений в центральной нервной системе, обусловленных воздействием космической радиации” и изучение этих проблем является первоочередной задачей ученых. С докладом “Опыт общей и космической радиобиологии в отношении опасности космических излучений, оценки риска в процессе межпланетных полетов и уточнение суммарного радиационного риска в течение жизни космонавтов” выступил *А.В. Шафиркин* (ИМБП РАН).

Ю.С. Северюхин (ЛРБ ОИЯИ) представил стендовое сообщение “Сравнительный анализ поведенческих реакций в головном мозге крыс после воздействия ионизирующих излучений с различными физическими характеристиками”. *И.Б. Корзенева* (РФЯЦ – ВНИИ экспериментальной физики”, г. Саров) представила стендовый доклад “Комплексная оценка влияния человеческого фактора на адаптацию космонавтов к стрессовым факторам космического полета и безопасности полета”. Гость конференции Герой Российской Федерации летчик-космонавт, канд. физ.-мат. наук *С.В. Авдеев* подчеркнул высокую значимость исследований ученых для решения проблем радиационной безопасности межпланетных космических полетов: “В России будет строиться новая орбитальная станция, и решения об условиях пребывания космонавтов на ней будут базироваться на полученных здесь результатах”.

Важнейшим направлением радиобиологических исследований является радиационная генетика. *А.В. Рубанович* (ИОГЕН РАН) выступил с докладом “Эпигенетическая революция и ее уроки для радиобиологов”. Проводимый в ИОГЕН РАН многолетний мониторинг генетического статуса представителей облученных локальных популяций: участников ликвидации радиационных катастроф, лиц, подвергшихся радиационному воздействию в результате профессиональной деятельности, свидетельствует о повышенном уровне у них соматического мутагенеза в ближайшие и отдаленные сроки после облучения. Аналогичные эффекты выявляются и у детей – потомков облученных родителей. Обнаружено, что эпигенетические эффекты представляют собой

новый аспект последствий радиационного воздействия на организм человека. “Для оценки эффектов действия облучения крайне важной представляется разработка системы отдаленных маркеров перенесенного облучения, сопряженных с развитием различных заболеваний. Исходя из последних достижений эпигенетики, локус-специфические изменения метилирования могут иметь очевидную прогностическую ценность в отношении здоровья облученного индивида, а именно в оценке его биологического возраста и риска развития той или иной радиационно-индуцированной патологии, что будет предшествовать регистрации морфофункциональных изменений органов и систем организма”.

И.Б. Корзенева (РФЯЦ – ВНИИ экспериментальной физики”, г. Саров) представила доклад “Экспрессия ключевых белков сигнальных путей распознавания повреждений ДНК, репарации и апоптоза дифференциально влияет на иммунитет и заболеваемость при длительном низкодозовом альфа- и гамма-облучении *in vivo*. Иммуно-генетические часы”. Были изучены молекулярные механизмы возникновения и развития хронических и острых заболеваний в когортах лиц, подвергающихся действию малых доз плотно ионизирующего корпускулярного альфа- и низкоионизирующего фотонного гамма-излучения. Был выявлен ряд молекулярных маркеров, информативных в разных условиях облучения; разработаны “иммуно-генетические часы”, специфичные для персонала, контактирующего с альфа- и гамма-ионизирующим излучением; установлены различия в механизмах формирования большинства заболеваний в этих группах персонала. *С.А. Абдуллаев* (ИТЭБ РАН, ФМБЦ им. А.И. Бурназяна) выступил с докладом “Функциональная активность митохондрий и их генетического аппарата при действии ионизирующих излучений. Пути стабилизации и защиты”. Авторами были изучены структурно-функциональные характеристики митохондрий и их генетического аппарата в клетках разных структур центральной нервной системы экспериментальных млекопитающих, подвергнутых действию редко- и плотноионизирующих излучений. Было обнаружено, что активность репарации яДНК, синтез мтДНК и уровень ее мутантных копий, модуляция экспрессии генов, поддерживающих митохондрии, различаются в гиппокампе, коре и мозжечке облученных крыс и зависят от типа излучения. При поиске митохондриально-направленных антиоксидантов, способствующих предотвращению развития отдаленных последствий радиационного повреждения высокую эффективность показал мелатонин (N-ацетил-5-метокситриптамин), снижающий эффекты воздействия ионизирующих излучений *in vitro* и *in vivo*. Доклад *В.Н. Чаусова* (ЛРБ ОИЯИ) был посвящен индукции и репарации двунитевых разрывов

ДНК при действии ионизирующего излучения разного качества.

В докладе *Л.Н. Шишкиной* (ИБХФ РАН) “Регуляция окислительных процессов в липидах тканей млекопитающих — основа формирования последствий воздействия ионизирующих излучений” приведены экспериментальные данные о существенной роли исходного состояния процессов перекисного окисления липидов (ПОЛ) в формировании биологических последствий действия радиации в малых дозах на организм в лабораторных экспериментах и в тканях природных популяций грызунов, а также об участии системы регуляции ПОЛ в адаптации мышевидных грызунов к длительному обитанию в условиях повышенного радиационного фона. Автор предлагает использовать параметры системы ПОЛ как тест для подбора радиозащитных препаратов и выбора оптимальных условий для их введения, а также для определения индивидуальной радиочувствительности.

Теоретическая радиобиология позволяет устанавливать закономерности и прогнозирование протекания процессов, которые пока невозможно изучить экспериментально. *А.Н. Бугай* (ЛРБ ОИЯИ) посвятил доклад развитию математических моделей в радиобиологии. Рассмотрев историю теоретического подхода, автор приходит к выводу, что теоретическая радиобиология достигла высокого уровня описания экспериментов *in vitro*, что в основном обусловлено успехами в разработке методов Монте-Карло моделирования начальных процессов передачи энергии излучения веществу на молекулярном уровне. Полноценное описание радиационно-индуцированных эффектов в живых системах носит иерархический характер, когда в разных временных и пространственных масштабах необходимо создавать специализированные и согласованные друг с другом модели на основе различных математических и вычислительных подходов. Таким образом, дальнейшее развитие теоретической биологии по мере накопления наших знаний и будет состоять в пополнении и выстраивании элементов такой иерархии.

В докладе *С.Г. Андреева* (ИБХФ РАН) “Перспективы предсказания структуры и отклика генома на повреждения ДНК” рассмотрена важность учета структурного фактора для прогнозирования радиационных повреждений ДНК и оценки радиобиологических эффектов, обсуждены возможности развития и применения указанного подхода для решения ряда проблем: предсказания зависимости относительной биологической эффективности от линейной передачи энергии излучения, оценки вклада крупномасштабной структуры хромосом в образование радиационно-индуцированных аберраций хромосом,

разработки новых компьютерных технологий предсказания структурной организации хромосом.

Одним из важных и актуальных направлений исследований в области радиобиологии являются поиск и разработка противолучевых средств, необходимых как в случае экстремальных ситуаций, так и в практике химиолучевой терапии онкозаболеваний. *Л.М. Рождественский* (ФМБЦ им. А.И. Бурназяна) в докладе “Разработка противолучевых средств как аспект развития фундаментальной радиобиологии и как фактор поддержания радиационной безопасности” для выхода из кризиса в этой области считает необходимым: отказ от концепции “идеального радиопротектора” и разработку противолучевых рецептур на базе имеющихся препаратов; внедрение противолучевых средств в широкую медицинскую практику в качестве не только противолучевых, но и фармакологических агентов; организацию крупных исследовательских проектов по созданию новых рецептур и подходов на основе новых технологий (например, гибернотерапия); разработку новых методических указаний для доклинических исследований противолучевых средств с акцентом на индикационный подход и разработку маркеров повышенной радиорезистентности и ускоренного пострадиационного восстановления.

Доклад *М.В. Филимоновой* (МРНЦ им. А.Ф. Цыба) и четыре стендовых доклада сотрудников МРНЦ им. А.Ф. Цыба были посвящены медицинским аспектам применения ингибиторов синтеза эндогенного оксида азота (ингибиторов NOS) в лучевой терапии и космической радиобиологии.

В лаборатории радиационной фармакологии МРНЦ разработана группа гипоксических радиопротекторов с NOS-ингибирующим механизмом действия, способных к эффективной профилактике острой лучевой болезни при действии γ -излучения (ФИД — 1.6–1.9), а также к селективной профилактике осложнений лучевой терапии опухолей. Было обнаружено, что соединения изучаемого ряда обладают высокой противолучевой активностью в отношении действия протонов. Это свидетельствует о целесообразности дальнейшего экспериментального изучения способностей этих соединений к профилактике осложнений протонной терапии опухолей, а также их радиозащитных возможностей при действии нейтронов и тяжелых заряженных частиц.

Еще одним актуальным направлением радиобиологии представляется использование излучений для терапии злокачественных новообразований — лучевая терапия опухолей. Этой проблеме был посвящен доклад *Е.В. Хмелевского* (МНИОИ им. П.А. Герцена) “Современная лучевая терапия. Предикторы радиочувствительности в клинической практике”. В докладе показано, что поиск предикторов индивидуальной радиочувстви-

тельности в настоящее время остается одной из самых насущных проблем радиационной онкологии. Реализуется ряд масштабных многоцентровых проспективных клинических исследований (REQUIRE), в рамках которых для поиска критериев индивидуальной эффективности и токсичности, наряду с традиционными физико-дозиметрическими и клинико-морфологическими факторами прогноза используются и клеточные (RILA) технологии, формируются биобанки данных для параллельных и последующих генетических исследований. Можно надеяться, что интеграция полученных данных позволит максимально индивидуализировать программы лучевой терапии.

И.А. Замулаева (МРНЦ им. А.Ф. Цыба) представила доклад “Радиорезистентность популяции стволовых клеток: механизмы, способы преодоления и клиническое значение”. В докладе охарактеризованы свойства опухолевых стволовых клеток — их более высокая резистентность к действию редкоионизирующего излучения, отмечается, что разработка новых противоопухолевых средств и способов должна производиться с учетом этого фактора. Показано, что эффективность пучков протонов, нейтронов, ионов ^{12}C и фотодинамического воздействия в отношении опухолевых стволовых и не стволовых клеток *in vitro* одинакова. В последние годы наметился прорыв в разработке средств направленного воздействия на популяцию опухолевых стволовых клеток, в том числе средств, повышающих радиочувствительность этих клеток и блокирующих радиационно-индуцированный эпителиально-мезенхимальный переход.

А.А. Осипов (ИХФ РАН) и соавт. представили стендовое сообщение “Количественные изменения фокусов белков репарации ДНК в мезенхимальных стромальных клетках человека при воздействии 3Н-тимидина и тритированной воды”.

Исследованиям в области радиобиологии для развития радиационных технологий в сельском хозяйстве и пищевой промышленности посвящен доклад *Н.И. Санжаровой* (ВНИИРАЭ). “В сельском хозяйстве радиационные технологии используются для повышения урожайности и улучшения качества продукции, ускорения развития культур, увеличения сроков хранения и снижения потерь при хранении, уничтожения патогенной микрофлоры и насекомых-вредителей, селекции новых сортов. В пищевой промышленности применение радиационных технологий позволяет сократить потери при транспортировке и хранении плодов и овощей; удлинить сроки хранения рыбы, мяса и продуктов их переработки; увеличить срок годности и реализации продуктов питания. Научные основы применения радиационных технологий включают широкий

спектр радиобиологических исследований. Сельскохозяйственная радиология изучает радиочувствительность сельскохозяйственных растений и животных, насекомых-вредителей, микроорганизмов и возбудителей болезней; влияние ионизирующих излучений на физико-химические, биохимические, генетические, физиологические процессы; влияние на пищевую ценность, органолептические и функциональные свойства, структурную целостность, показатели безопасности продукции”. В докладе приводятся обширная информация об использовании радиационных технологий в сельском хозяйстве, многочисленные примеры применения их в пищевой промышленности. Доклад наглядно демонстрирует, что “широкий спектр возможностей по повышению качества и безопасности сельскохозяйственной и пищевой продукции определяет перспективность применения радиационных технологий при решении задач продовольственной безопасности России”.

Результаты исследований в области сельскохозяйственной радиологии были представлены в докладе *Е.В. Бондаренко* (ВНИИРАЭ) “Молекулярные и физиологические особенности растений, произрастающих в условиях хронического воздействия ионизирующего излучения”. Автором и коллегами проведена многолетняя работа по анализу радиобиологических реакций на хроническое облучение радиочувствительных видов растений: сосна обыкновенная, сосна красная, и радиорезистентных: резуховидка Таля, пастушья сумка обыкновенная, на участках, загрязненных радионуклидами в результате аварии на ЧАЭС и на АЭС Фукусима в Японии. Результаты исследования показали наличие существенных отличий изученных генетических, эпигенетических и физиологических параметров у растений, подвергавшихся облучению, от растений на контрольных участках. Получены данные о молекулярных процессах, опосредующих адаптивные реакции растений в ответ на хроническое облучение, имеющие прикладное значение и могущие быть использованы в биотехнологии растений для получения стрессоустойчивых сортов сельскохозяйственных культур.

Радиоэкологический мониторинг территорий страны, загрязненных радионуклидами в результате техногенных аварий, входит в задачи специалистов-радиоэкологов. После аварии на Чернобыльской АЭС радиобиологами и радиоэкологами были проведены многочисленные исследования последствий аварии и результатов многолетнего хронического воздействия ионизирующего излучения на человека и окружающую среду. В докладе *С.В. Фесенко* (ВНИИРАЭ) излагаются результаты сравнительного анализа последствий аварий на Чернобыльской АЭС (1986 г.) и на АЭС Фукусима (2011 г.). Анализ ситуации показал, что по-

Таблица 1. Структура Научного совета по радиобиологии при ОФ РАН

№ секции	Название секции	Кураторы
1	Молекулярная радиобиология	А.В. Рубанович
	Радиационная генетика	А.В. Борейко
2	Молекулярно-клеточные механизмы действия радиации, механизмы и прогноз отдаленных последствий действия радиации	И.А. Замулаева, Р.М. Тахауов
3	Медико-биологические последствия действия радиации	А.Ю. Бушманов, В.К. Иванов
4	Радиобиологические основы лучевой терапии	Е.В. Хмелевский
5	Радиационная физиология	И.Б. Ушаков, А.С. Штемберг
6	Радиационная иммунология и гематология	А.В. Аксеев
7	Противолучевые средства	Л.М. Рождественский, М.В. Филимонова
8	Радиобиология тяжелых ионов	Е.А. Красавин
	Космическая радиобиология	
9	Теоретическая радиобиология, микродозиметрия и дозиметрия	С.Г. Андреев, А.Н. Бугай
10	Радиационная безопасность и гигиеническое нормирование	И.К. Романович
11	Радиобиология неионизирующих излучений	О.А. Григорьев, Л.П. Жавронков
12	Экологические проблемы радиобиологии	Н.И. Санжарова
13	Радиобиологическое образование	А.Н. Гребенюк, И.А. Замулаева

тенциальные радиологические последствия аварии на АЭС “Фукусима-1” для населения и площадь пострадавших территорий были намного ниже, чем после аварии на ЧАЭС, последствия аварии на ЧАЭС были существенно тяжелее последствий аварии на АЭС “Фукусима-1”, но масштабы защитных и реабилитационных мероприятий были вполне сопоставимы. Критерии безопасности, принятые после радиационных аварий на ЧАЭС и АЭС Фукусима, а также подходы к реабилитации загрязненных территорий повлияли на оценку реальных последствий этих аварий. Представленные в докладе данные позволяют сделать вывод, что при оценке последствий радиационных аварий необходимо учитывать все многообразие факторов, влияющих на их проявление, включая факторы, определяющие формирование зоны загрязнения, экологические особенности загрязненных территорий, меры по обеспечению безопасности пострадавшего населения, а также радиологические, социальные и экономические критерии, используемые для оценки этих последствий.

В заключение прошла краткая дискуссия, участники подчеркнули несомненную пользу проведения конференций с такой разнообразной, комплексной программой. Говоря о значимости научной программы конференции, *Н.И. Санжарова*, чл.-корр. РАН, научный руководитель ВНИИРАЭ, отметила: “Только когда конференцию собирает Научный совет, мы получаем возможность услышать доклады наших коллег, которые работают в других областях. Это дает возможность узнать о достижениях, проблемах и обсудить радиобиологию как комплексную междисциплинарную науку”.

К началу конференции был опубликован сборник тезисов докладов “Актуальные проблемы радиационной биологии: Материалы конференции” (Дубна, 25–27 октября 2022 г.). Дубна: ОИЯИ, 2022, 91 с. Сборник размещен на сайте Научного совета <http://radbio.jinr.ru>.

В.И. Найдич,
ученый секретарь Научного совета
по радиобиологии ОФ РАН

Академику РАН Ильину Леониду Андреевичу – 95 лет

DOI: 10.31857/S0869803123020145, EDN: FGWNHD



15 марта 2023 г. исполнилось 95 лет академику РАН Ильину Леониду Андреевичу, Герою Социалистического Труда, лауреату Государственных премий СССР и РФ, дважды лауреату премии Правительства РФ, д-ру мед. наук, профессору, почетному президенту ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

Л.А. Ильин в 1953 г. с отличием окончил Первый Ленинградский медицинский институт им. И.П. Павлова, а также его Военно-морской факультет. В 1955 г. в период службы на Черноморском флоте в должности начальника медицинской службы боевого корабля организовал первую на ЧФ радиологическую лабораторию. После демобилизации (с 1958 по 1961 г.) работал старшим научным сотрудником в радиобиологическом отделе одного из НИИ Военно-морского флота (г. Ленинград).

Принимал участие в испытаниях ядерного оружия на Новой Земле и Семипалатинском полигоне.

С 1961 по 1968 г. был руководителем лаборатории радиационной защиты и заместителем директора по научной работе Ленинградского НИИ радиационной гигиены.

В 1968 г. профессор Л.А. Ильин в 40-летнем возрасте возглавил крупнейший в мире научный центр в области радиобиологии, радиационной медицины и радиационной безопасности – Институт биофизики МЗ СССР, которым он руководил в течение 40 лет. За заслуги перед государством в 1977 г. Институт биофизики был награжден орденом Ленина.

В настоящее время академик Л.А. Ильин – почетный президент Федерального государственного бюджетного учреждения “Государственный научный центр Российской Федерации – Феде-

ральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна” (объединенного ГНЦ РФ Института биофизики ФМБА России и клинической больницы № 6 ФМБА России).

Из многочисленных научных интересов и видов менеджментской деятельности Л.А. Ильина для читателей журнала основной интерес, конечно, будут представлять разработка лекарственных препаратов и медико-биологических систем защиты от γ - и γ -нейтронного излучений, руководство научно-исследовательскими проектами по созданию полной системы лечебно-профилактических и санитарно-гигиенических мероприятий в условиях радиационных поражений военного, террористического и аварийно-производственного характера различных контингентов населения.

В ряду этих достижений особое место занимает разработка отечественного радиопротектора индралина. Этот препарат первоначально возник в разработке представителей ВНИХФИ и Института авиационной и космической медицины Н.Н. Суворова и М.В. Васина. Но только после того как проект возглавил по просьбе начальных разработчиков Л.А. Ильин, он приобрел необходимую масштабность. Подключение к исследованиям руководимого Л.А. Ильиным Института биофизики МЗ СССР привело к принципиальному ускорению разработки лекарственной формы препарата для человека, и что особенно важно, в виде таблеток. В результате индралин стал табельным препаратом для возможной реализации неотложной радиационной безопасности в атомной промышленности, атомном подводном флоте и в ракетных войсках стратегического назначения. Л.А. Ильин передал надежный фундамент своим преемникам для дальнейшей оптимизации медикаментозной защиты от радиационных поражений человека.

Ряд из разработок был апробирован в условиях Семипалатинского полигона, где Л.А. Ильин был научным руководителем соответствующих радиобиологических опытов.

Академик Л.А. Ильин вместе с сотрудниками ФМБЦ им. А.И. Бурназяна впервые в мире в 1970 г., т.е. за 16 лет до аварии на ЧАЭС, создал “Методические указания для разработки мероприятий по защите населения в случае аварии ядерных реакторов” и обосновал аварийные нормативы облучения людей в этих ситуациях. Особое значение имела разработка системы йодной профилактики, так как выпадение радиоактивного йода при Чернобыльской аварии стало основным поражающим фактором для значительных контингентов населения (особенно детского возраста).

С первых дней чернобыльской аварии Л.А. Ильин находился в районе катастрофы, где, будучи научным руководителем работ по защите ликвидато-

ров и населения, принимал ответственные решения. По поручению председателя Правительства Н.И. Рыжкова он осуществлял координацию медико-биологических и радиационно-гигиенических задач, включая проблемы эвакуации населения.

Надо сказать, что в связи с Чернобыльской аварией напряженная ситуация сложилась и среди радиобиологов. Часть из них придавала очень большое значение тем относительно малым дозам, которые были получены мирным населением в результате рассеяния выбросов из поврежденного реактора, и требовала радикальных мер по отселению гражданского населения из районов даже незначительного загрязнения. В связи с разногласиями между учеными особенно острая ситуация сложилась вокруг Киева в связи с выходом значительного числа людей на первомайскую демонстрацию в условиях незначительного повышения уровня радиации. 7 мая 1986 г. академик Л.А. Ильин и академик Ю.А. Израэль были приглашены на заседание Политбюро ЦК компартии Украины, где стоял вопрос об эвакуации трехмиллионного населения г. Киева. Л.А. Ильиным и Ю.А. Израэлем на основании дозиметрических данных были сделаны научные прогнозы возможного риска и выводы о несостоятельности и опасности принятия подобного решения.

Как известно, прогноз Л.А. Ильина и Ю.А. Израэля и их категорическое возражение против эвакуации г. Киева полностью подтвердились и оправдали себя. Интересная деталь этого, без сомнения, судьбоносного события. Ночью 7 мая 1986 г. Л.А. Ильин и Ю.А. Израэль свою позицию изложили и подписали в единственном экземпляре документ, который первый секретарь ЦК компартии Украины В.В. Щербицкий назвал документом исторической и особой важности и при всех членах ПБ ЦК Украины и его авторах положил в свой сейф.

Академик Л.А. Ильин в течение более 30 лет представлял СССР и Российскую Федерацию в Научном Комитете ООН по действию атомной радиации. Дважды избирался членом Главного комитета Международной комиссии по радиационной защите, которая определяет всю научно-техническую политику в мире в области радиационных проблем и нормирования ионизирующих излучений.

В 1980 г. в Женеве три отечественных ученых (Е.И. Чазов, Л.А. Ильин, М.И. Кузин) и три американских ученых (Б. Лаун, Э. Чевинан, Г. Миллер) создали международное движение “Врачи против ядерной войны”. В 1985 г. это движение из ста номинантов было удостоено Нобелевской премии Мира. В 1982 и 1984 г. двумя изданиями на пяти языках вышла книга Е.И. Чазова, Л.А. Ильина, А.К. Гуськовой “Опасность ядерной войны:

точка зрения советских ученых-медиков”, в которой, в частности, были опубликованы расчетные оценки Л.А. Ильина, впервые доложенные на I конгрессе этого движения в 1981 г. о возможных медицинских последствиях термоядерной войны на Европейском континенте — от Атлантического океана до Уральских гор. Эти впервые в мире представленные научные данные доказали невозможность достижения победы в такой войне. Общеизвестно, что они сыграли большую позитивную роль в руководящих кругах ядерных государств.

Л.А. Ильин — автор и соавтор 20 книг, в том числе таких, как фундаментальные монографии: “Основы защиты организма от воздействия радиоактивных веществ”, “Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры” (после ее публикации в 2001 г. уже в 2002 г. она была издана в Японии на родном языке, переведена и издана на английском языке). Монография “Реалии и мифы Чернобыля” вышла двумя изданиями и опубликована на японском и английском языках, а монография “Радиоактивный йод в проблеме радиационной безопасности” (изданной также в США) оказалась настольной книгой ученых и специалистов в области изучения и ликвидации последствий Чернобыльской аварии.

Под его научной редакцией и в соавторстве издано 4-томное “Руководство по радиационной медицине” объемом в 100 печатных листов, а в 2017 г. — учебник “Радиационная гигиена” в соавторстве с профессорами И.П. Коренковым и Б.Я. Наркевичем, который по заключению специалистов должен стать настольной книгой не только для медиков, но и для всех ученых и практиков в области радиационной защиты и безопасности.

В 1978 г. Л.А. Ильин был избран действительным членом Академии медицинских наук СССР, с 1980 по 1984 г. состоял членом Президиума, а с 1984 по 1990 г. был вице-президентом АМН СССР.

За научные исследования и практические разработки в области защиты персонала, населения, а также личного состава вооруженных сил от воздействия радиации академик Л.А. Ильин удостоен Ленинской премии, Государственных премий СССР и Российской Федерации и дважды премии Правительства Российской Федерации.

В 1988 г. за заслуги в области науки о действии радиации на организм человека и радиационной защиты Л.А. Ильин был удостоен звания Героя Социалистического Труда с вручением ему ордена Ленина и Золотой Звезды.

Л.А. Ильину объявлены в 1998, 2003 и 2014 г. благодарности Президентов РФ за большой вклад в развитие отечественной науки в области радиационной защиты и за заслуги в развитии здравоохранения, медицинской науки и многолетнюю плодотворную трудовую деятельность.

В 2021 г. Леонид Андреевич Ильин награжден Почетной грамотой Президента РФ за заслуги в области здравоохранения и многолетнюю добросовестную работу.

В 2022 г. Президент РФ В.В. Путин вручил Леониду Андреевичу орден Александра Невского.

Имеет ведомственные награды Министра здравоохранения, нагрудные знаки Росатома “И.В. Курчатов” I степени, “Е.П. Славский”.

Будучи членом интеллектуально-делового клуба Н.И. Рыжкова, награжден орденами Петра Великого I степени и Дмитрия Донского. В 2013 г. стал лауреатом международной премии Андрея Первозванного “Вера и Верность” за выдающийся вклад в развитие отечественной науки, спасение человеческих жизней, многолетний труд в деле укрепления мира.

Академик Л.А. Ильин — признанный мировой авторитет в области радиобиологии и радиационной медицины. Характерной чертой Л.А. Ильина как ученого является его бескомпромиссность в вопросах отстаивания ценностей истинной науки от невежества и сиюминутной конъюнктуры. Проницательность, смелость и принципиальность в принятии решений в сложных экстремальных условиях, умение отстаивать свою научную и гражданскую позицию снискали Л.А. Ильину высокий авторитет в международных научных кругах и глубокое уважение его соратников и коллег.

Дорогой Леонид Андреевич, примите наши поздравления по случаю Вашего Юбилея и сердечные пожелания крепкого здоровья и активной творческой деятельности!

Руководство и коллектив ФГБУ ГНЦ ФМБЦ
им. А.И. Бурназяна ФМБА России
Редколлегия журнала
“Радиационная биология. Радиоэкология”

Юрий Евгеньевич Дубровá
(13 апреля 1955–26 января 2023)

DOI: 10.31857/S0869803123020078, EDN: EOZDZK



Утром 26 января 2023 г. после тяжелой продолжительной болезни ушел из жизни выдающийся российский и британский генетик, профессор Университета г. Лестер (Великобритания), доктор биологических наук Юрий Евгеньевич Дуброва.

Юрий Дуброва родился в Киеве, где в 1978 г. закончил Киевский государственный университет. Многие годы работал в Институте общей генетики им. Н.И. Вавилова РАН в лаборатории популяционной генетики под руководством академика Ю.П. Алтухова. В 1981 г. защитил кандидатскую диссертацию “Роль стабилизирующего отбора в поддержании биохимического полиморфизма популяций”. Продолжая изучать полиморфизм белков в природных популяциях, в 1992 г. успешно защитил докторскую диссертацию “Адаптивное значение полиморфизма белков в популяциях человека”.

В 1994 г. Е.Ю. Дуброва резко изменяет направление своей научной деятельности, переезжает в Англию и поступает на работу в знаменитую лабораторию Алека Джеффриса Университета г. Лестер. В этой лаборатории незадолго до этого были разработаны пионерские методы изучения мини- и микросателлитной изменчивости ДНК, в основном в целях генетической идентификации человека. Работая в лаборатории Джеффриса, Е.Ю. Дуброва совершает сенсационный прорыв в области радиационной генетики. В 1996 г. в жур-

нале “Nature” выходит его статья, в которой сообщается о статистически значимом увеличении частоты минисателлитных (мусорных) мутаций ДНК у детей родителей, получивших высокую дозу радиации в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Эти данные резко противоречили господствующей тогда концепции Джеймса Нила (1915–2000), который был центральной фигурой в исследованиях последствий ядерных бомбардировок в Японии. Последующая многолетняя дискуссия сделала имя Ю.Е. Дубровы широко известным в мировом научном сообществе. Продолжая эти исследования, Ю.Е. Дубров неоднократно подтвердил свои данные для семей облученных людей из Белоруссии и Украины (последствия аварии на ЧАЭС), Казахстана (Семипалатинский полигон) и России (аварийные сбросы в реку Теча). Эти данные были опубликованы в ведущих мировых журналах (Nature, Science) и получили широкую огласку в СМИ. Тем самым было признано, что Ю.Е. Дуброва впервые получил однозначные экспериментальные доказательства радиационной индукции мутаций в зародышевой линии человека. Не будет преувеличением сказать, что его имя в начале XXI века стало легендарным.

Свою дальнейшую научную деятельность Ю.Е. Дуброва посвятил всестороннему изучению полногеномных спектров мутаций, индуциро-

ванных в зародышевой линии мышей при воздействии различных генотоксикантов, включая ионизирующее излучение, алкилирующие агенты и противораковые препараты. Эти работы также получили всестороннюю известность и признание.

Следует отдельно отметить обширную преподавательскую и просветительскую деятельность профессора Ю.Е. Дуброва. Десятки учеников, сотни докладов и лекций на крупнейших международных форумах и школах, он был желанным гостем во многих странах. Работая в Англии, Ю.Е. Дуброва никогда не терял связей с отече-

ственными учеными, охотно вступая в коллаборацию и принимая участие в совместных проектах.

Яркий, харизматичный и всесторонне эрудированный, он любил жизнь, науку, литературу и историю. Таким он навсегда останется в нашей памяти.

Редакция журнала “Радиационная биология. Радиоэкология” скорбит вместе со всем научным сообществом в связи с безвременной кончиной Юрия Евгеньевича и выражает соболезнования его родным и близким.