

УДК 504.55

DOI: 10.55959/MSU0137-0944-17-2023-78-4-44-54



## РАДИОЭКОЛОГИЯ: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ

**А. И. Щеглов, О. Б. Цветнова\*, Г. И. Агапкина, Д. Н. Липатов, Д. В. Манахов,  
С. В. Мамихин, Т. А. Парамонова, В. В. Столбова, Е. В. Цветнов**

МГУ имени М.В. Ломоносова, факультет почвоведения, 119991, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 12

\* E-mail: tsvetnova@mail.ru

В статье рассматриваются вопросы, посвященные развитию радиоэкологии как самостоятельной научной дисциплины. Анализируются достижения прошлых лет, исследования, которые проводятся в настоящее время, а также перспективные направления развития в данной области. Предложена скорректированная периодизация этапов развития радиоэкологии с учетом накопленного к настоящему времени опыта в области этой дисциплины. На начальном этапе (1895–1929 гг.) осуществлялся сбор эмпирического материала; на первом этапе (1930–1960 гг.) был заложен теоретический фундамент и радиоэкология сформировалась как самостоятельная дисциплина; на втором этапе (1961–1990 гг.) отмечалось интенсивное, а на третьем (1991–2010 гг.) — поступательное развитие радиоэкологии; четвертый, современный этап развития радиоэкологии приходится на начало XXI в. (2011 г. — настоящее время). Для каждого этапа рассматриваются основные научные достижения и эволюция идей в области радиоэкологии. Постулируется, что в настоящее время развитие этой дисциплины связано с дальнейшим совершенствованием мировых ядерных технологий, ликвидацией последствий ряда радиационных инцидентов (авария на АЭС Фукусима, 2011 г.), пересмотром концепции радиационной защиты окружающей среды и рядом других положений. Особое внимание уделяется лесной радиоэкологии — одному из важнейших направлений этой науки.

*Ключевые слова:* открытие радиоактивности, ионизирующие излучения, природные и техногенные радионуклиды, аэральные выпадения, радиационные аварии, радиоактивное загрязнение, радиационная экология, история развития.

### Введение

Современное естествознание характеризует стремительным развитием наук экологического характера. Это в равной мере относится к одному из достаточно молодых направлений экологии — радиоэкологии. Следует подчеркнуть, что исследования в этом русле начались вместе с открытием радиоактивности (1895), однако только осознание важности воздействия радиационного фактора на живые объекты привело к появлению радиационной биогеоценологии — родоначальницы радиоэкологии.

Развитие радиоэкологии тесным образом связано с непрерывной чередой исследования явлений, вызванных поступлением естественных и техногенных радионуклидов в окружающую среду. Наиболее значимыми источниками загрязнения природными радионуклидами являются извлечение на поверхность урановой руды при добыче урана, производство и применение содержащих радионуклиды удобрений, эксплуатация ТЭС, работающих на угле, добыча нефти и газа; техногенными — испытание и

применение ядерных зарядов в военных и мирных целях, технологические и аварийные выбросы на объектах ядерно-топливного цикла и ядерных установках военно-морского и гражданского флотов, захоронение радиоактивных отходов при производстве и переработке отходов оружейных ядерных материалов, ядерных реакторов и установок и др. Развитие радиоэкологии можно охарактеризовать рядом этапов, в течение которых формировались основные положения, показывающие достижения и эволюцию идей в области данной науки в соответствующий период. Выделение этих этапов связано со специфическими источниками радиоактивного загрязнения окружающей среды К концу XX в., по мнению ряда авторов, в истории радиоэкологии выделялось от трех до пяти таких этапов [Алексахин, 2006; Алексахин, Пристер, 2008; Kirchmann, 1997]. Накопленный к настоящему времени большой научный материал, связанный в том числе с анализом результатов исследований крупнейшей радиационной аварии XXI в. на АЭС Фукусима-1 (Япония, 2011 г.), позволяет внести определенную корректировку в периодизацию выделенных ранее этапов.

## Основные этапы в развитии радиоэкологии

**Начальный этап в становлении радиоэкологии относится к 1895–1929 гг.** Сразу после открытия В.К. Рентгеном X-лучей, названных впоследствии рентгеновскими, появились первые научные труды, в которых были отмечены биологические эффекты воздействия этих лучей на живые организмы, в том числе и человека, описывались острые эффекты ионизирующего излучения на живые объекты [Тарханов, 1903; Гаевская, 1914 и др.]. В целом можно отметить, что на этом этапе осуществлялся сбор первичных данных, связанных с воздействием ионизирующего излучения на биоту, проводился их научный анализ и делались первые обобщающие выводы.

**I этап — 1930–1960 гг. Заложение теоретического фундамента и формирование радиоэкологии как самостоятельной дисциплины.** В этот период начали издаваться первые серьезные научные труды, в частности В.И. Вернадского (1929) по действию радия на растения. Им была развита концепция биосферы и впервые сформулированы положения о роли радиоактивности в ее эволюции, а также начаты исследования по изучению биохимии и геохимии тяжелых естественных радионуклидов. Первую радиоэкологическую генерализацию эффектов ионизирующего излучения на популяционных уровнях сделали чешские исследователи Stoklasa и Pentkava (1932). Однако именно В.И. Вернадский соединил в своих трудах вместе два понятия — «радиоактивность» и «биосфера» [Вернадский, 1929; Алексахин и др., 2014].

Исследованиями, проводившимися в этот период, был заложен теоретический фундамент самостоятельного научного направления — радиоэкологии. Научные гипотезы, подтвержденные в это время, касались вопросов изучения природного радиационного фона, исследования содержания в растениях и миграции естественных радионуклидов в природных экосистемах. Основные выводы, которые были сделаны: 1) естественный радиационный фон создает сильные биологические эффекты при малых концентрациях естественных радионуклидов в природных средах; 2) изменение природного радиационного фона Земли — одна из причин эволюции флоры и фауны [Вернадский, 1929].

**II этап — 1961–1990 гг. Интенсивное развитие радиоэкологии.** В 1945 г. ядерные бомбардировки авиацией США японских городов Хиросима и Нагасаки представили миру ужасающие картины медицинских, экологических и социальных последствий атомных взрывов. В последующем в 1950–60 гг. массовые испытания ядерного оружия привели к глобальным выпадениям на поверхность земли таких долгоживущих искусственных радионуклидов, как  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и изотопы плутония, что представляло опасность для биосферы в целом. Ра-

стущее во всем мире беспокойство по поводу экологических последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды стало толчком для активных радиоэкологических исследований. Так, в США начались локальные обследования вокруг заводов по производству ядерного топлива, особенно по течению реки Колумбия, была организована первая полевая радиоэкологическая группа из числа сотрудников Калифорнийского университета. Научные интересы группы лежали в области обследования радиационного фона, млекопитающих, птиц, рептилий, насекомых, а также растений и почв. Практически одновременно в СССР также начались активные научные разработки в этой области. С 1947 г. Н.В. Тимофеевым-Ресовским, создателем радиационной биогеоценологии, проводились исследования по воздействию радиации на биологические объекты [Тимофеев-Ресовский, 2009]. Были проведены многочисленные эксперименты, в которых, с одной стороны, ионизирующая радиация рассматривалась как фактор воздействия на организмы и их сообщества, а с другой — радионуклиды использовались как «меченые» атомы для определения судьбы химических элементов в биогеоценозах. Следует подчеркнуть, что эти подходы являются действенными и в настоящее время. Проводимые наблюдения, опыты и эксперименты позволили Н.В. Тимофееву-Ресовскому смоделировать возможные процессы миграции радионуклидов в естественных биогеоценозах, что создало предпосылки для дальнейшего развития радиоэкологического мониторинга и радиоэкологии в целом. Как последователь учения В.И. Вернадского о биосфере Тимофеев-Ресовский также рассматривал ее как особую оболочку планеты, в которой определяющая роль в геохимических процессах принадлежит живому веществу. Также в работах Н.В. Тимофеева-Ресовского было выдвинуто положение о влиянии химической природы радионуклидов на их миграцию в окружающей среде [Тимофеев-Ресовский и др., 1966].

Вместе с тем в эти годы изучение поведения радионуклидов проводилось, как правило, на примере простых систем: «вода–грунт», «почва–растение», «вода–гидробионты» и т. д. Натурные исследования загрязненных радионуклидами объектов природной среды, удаленных от мест испытаний, не проводились. К важным работам в области радиоэкологии того времени можно отнести исследования миграции радиоактивных элементов в почвах, влияния почвенных свойств и выявление факторов, обуславливающих их подвижность [Прохоров, 1981], изучение миграции радионуклидов по звеньям трофической цепи, что позволило дать сравнительную оценку вклада отдельных радионуклидов в суммарную дозу внутреннего облучения человека. Было показано, что наиболее важным путем поступления радионуклидов в организм человека является звено пищевой цепи, включа-

ющее молоко, что представляет особую опасность для детей [Сельскохозяйственная радиоэкология, 1992].

Следует подчеркнуть, что в этот период (1956 г.) одновременно американским экологом Ю. Одумом (1956) и известными советскими учеными А.М. Кузиным и А.А. Передельским [Алексахин и др., 2014] в научный лексикон был введен термин «радиоэкология». В рассматриваемое время наряду с глобальным загрязнением биосферы радиоактивными продуктами ядерных взрывов были отмечены и крупные радиационные аварии на предприятиях по переработке урана и получению плутония. В СССР крупномасштабное радиоактивное загрязнение на Южном Урале, получившее название Восточно-Уральского радиоактивного следа, было связано с деятельностью радиохимического предприятия — ПО «Маяк» (Челябинская обл.). Загрязнение в данном регионе стало последствием нескольких аварийных ситуаций, включая Кыштымскую аварию (1957 г.), причиной которых было значительное накопление радиоактивных отходов и несовершенство технологии их хранения [Молчанова и др., 2006].

Вместе с тем Кыштымская авария дала мощный импульс развитию работ в области радиоэкологии. На территории Южного Урала сотрудниками специально созданной опытной научно-производственной станции под руководством В.М. Клечковского начали проводиться многолетние натурные наблюдения за миграцией радиоактивных веществ в окружающей среде и радиационными эффектами в природе [Алексахин, 1990]. Им впервые были разработаны принципы нормирования содержания долгоживущих радионуклидов, в основу которых был положен учет их миграции по звеньям пищевой цепи к человеку. В.М. Клечковский сформулировал основное положение сельскохозяйственной радиоэкологии о важнейшем способе снижения накопления радионуклидов растениями, заключающемся в увеличении плодородия почв, создании оптимального режима питания растений и рациональном использовании удобрений.

Это, по мнению большинства ученых, окончательно завершило процесс становления в СССР радиоэкологии как научной дисциплины [Крупные радиационные аварии..., 2001]. В этот период впервые решался целый комплекс проблем, связанных с радиоактивным загрязнением, таких как: медико-биологические, радиоэкологические, социальные. Параллельно с фундаментальными исследованиями развернулась разработка системы контрмер, направленных на снижение интенсивности миграции радионуклидов по трофическим цепям к человеку и восстановлению хозяйственной деятельности на загрязненных территориях. В данный период окончательно оформилось одно из основополагающих научных положений радиоэкологии о том, что ре-

шение проблемы ведения агропромышленного производства на загрязненных угодьях входит в число центральных звеньев реабилитации территорий, подвергшихся воздействию аварии, так как внутреннее облучение населения относится к ведущим (или доминирующим) источникам облучения. Также принципиально важным стало запрещение производства сельскохозяйственной продукции с превышением временно допустимых уровней (ВДУ) для стабилизации инфраструктуры села и сектора аграрной экономики, а также снятия явления радиофобии у населения. Поэтому впоследствии к моменту аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. отечественная радиоэкология уже могла предоставить концептуальные схемы ликвидации последствий аварии в агропромышленном комплексе.

Важную роль в решении радиоэкологических проблем в этот период сыграло и создание в 1957 г. Международного агентства по атомной энергии. С началом испытаний ядерного оружия остро встала проблема загрязнения природных сред техногенными радионуклидами, исследование этих вопросов позволило: 1) получить большой объем данных по содержанию техногенных радионуклидов в объектах окружающей среды; 2) описать закономерности миграции радионуклидов по трофическим цепям в биосфере; 3) рассчитать дозы облучения от глобальных выпадений; 4) описать радиационные риски от глобальных выпадений.

**III этап — 1991–2010 гг. Поступательное развитие радиоэкологии.** Интенсивное развитие ядерной энергетики и использование радиационных технологий в различных областях хозяйственной деятельности в этот период способствовали росту поступления радионуклидов в окружающую среду в результате их высвобождения на всех этапах функционирования объектов ядерно-топливного цикла, начиная с добычи уранового сырья, его обогащения, использования, переработки отработанного топлива и до захоронения радиоактивных отходов [Алексахин, 2013]. Развитие радиоэкологии в этот период шло параллельно в США и СССР, большой вклад в исследования в данной области внесли также ученые Финляндии, Франции, Италии, Японии, Великобритании.

Стало очевидно, что главным фактором, воздействующим на природные среды в результате функционирования предприятий ядерно-топливного цикла, является радиационный. Высвобождение радионуклидов в окружающую среду неизбежно приводит к их включению в пищевые цепочки. Так как сельскохозяйственная продукция составляет основу продуктов питания большинства населения, то поведение радионуклидов в агроэкосистемах становится определяющим для оценки риска от употребления этой продукции [Сельскохозяйственная радиоэкология, 1992]. В этот период остро встала задача защиты окружающей среды и в первую



очередь человека от радиоактивного загрязнения. Таким образом, проблемы радиоэкологии в последние десятилетия XX в. становятся ключевыми в развитии ядерных технологий.

К концу этого периода произошло оформление радиоэкологии как самостоятельной научной дисциплины, в которой с учетом специфики объектов природной среды, загрязненной радионуклидами, выделилось два крупных раздела — радиоэкология водных и радиоэкология наземных экосистем. У нас в стране развитие радиоэкологии наземных экосистем, к которой относится лесная радиоэкология, неразрывно связано с научными исследованиями сотрудников лаборатории радиоэкологии факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, принимавшими участие в работах по ликвидации экологических последствий Кыштымской, а позже Чернобыльской радиационных аварий.

Заведующий лабораторией, профессор Ф.А. Тихомиров по праву считается одним из основателей современной радиоэкологии леса. Им были выполнены уникальные комплексные радиоэкологические исследования по оценке воздействия ионизирующих излучений на лесные экосистемы и миграции радионуклидов в лесных биогеоценозах. Особое внимание он уделял вопросам радиобиологии и радиоэкологии хвойных древесных растений, радиочувствительность которых близка к радиочувствительности млекопитающих. Результаты этих исследований позволили сформулировать важнейшие положения по радиоэкологии наземных экосистем. Данные о высокой радиочувствительности некоторых представителей биоты способствовали смене идеи антропоцентрического подхода к вопросу радиационной защиты (приоритет в охране здоровья человека) к идее экоантропоцентрического подхода, требующего защиты как человека, так и биоты. Ф.А. Тихомировым впервые в мире была рассчитана летальная доза облучения для взрослых деревьев сосны. Результаты этих исследований были обобщены в целом ряде монографий [Тихомиров, 1972; Кривоуцкий и др., 1988; Behavior of radionuclides..., 1996 и др.]. Ф.А. Тихомиров создал школу отечественных радиоэкологов леса, которая успешно развивается на факультете почвоведения МГУ в рамках созданной в 2005 году кафедры радиоэкологии и экотоксикологии.

Интенсификация радиоэкологических исследований в этот период связана с крупнейшим радиационным инцидентом XX в. — аварией на Чернобыльской АЭС (Украина, 1986 г.). Итогом работ по ликвидации экологических последствий этой аварии явился ряд новых научных положений в области лесной, сельскохозяйственной, водной радиоэкологии [Радиоэкологические последствия..., 2018]. Можно отметить, что бурный рост исследований в период после аварии на Чернобыльской АЭС привел к формированию более узких направлений

в рамках радиоэкологии, к числу которых можно отнести лесную радиоэкологию [Орлов и др., 2002; Переволоцкий, Переволоцкая, 2012].

Разработанная в радиоэкологии в предшествующий период концептуальная модель ведения хозяйства на радиоактивно загрязненной территории после аварии на ЧАЭС получила дальнейшее развитие с учетом ее особенностей, включающих значительные масштабы территории, присутствие в смеси аварийного выброса большого числа радионуклидов, свойства которых были еще недостаточно изучены и часть из которых находилась не в растворимой форме, а в виде «топливных» частиц (остатки разрушенных ТВЭЛов реактора) и др. При этом поступление на почвенный покров с продуктами выбросов долгоживущих радионуклидов (главным образом  $^{137}\text{Cs}$ , а также  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{239}\text{Pu}$ ) создало особую опасность их миграции по трофической цепи и накопления в продукции сельского и лесного хозяйства. В области почвенной химии  $^{137}\text{Cs}$  была разработана модель вертикального транспорта радионуклида в профиле почв разных типов и установлена корреляционная зависимость между содержанием отдельных форм нуклида и их доступностью для корневого усвоения. Также были отработаны принципы радиационного мониторинга на больших территориях с использованием воздушной и наземной съемок, радиационного контроля больших объемов кормов и сельскохозяйственной продукции, усовершенствована радиометрическая и дозиметрическая аппаратура.

На основании обобщения обширного экспериментального материала по накоплению  $^{137}\text{Cs}$  в сельскохозяйственной продукции и действию ионизирующих излучений на объекты производства в новых условиях были рассчитаны экологические полупериоды уменьшения концентрации радионуклида в важнейших продуктах и конкретизированы научные положения в области сельскохозяйственной радиоэкологии, предложенные В.М. Ключевским, а также сформулированы новые [Радиоэкологические последствия аварии..., 2018]. К их числу относятся выводы о необходимости в агроэкосистемах внесения повышенных количеств калийных удобрений (в 2–3 раза выше общепринятых) для подавления перехода  $^{137}\text{Cs}$  из почвы в растения, о положительной роли фосфорных удобрений в снижении поглощения  $^{137}\text{Cs}$  растениями и отрицательной роли повышенных количеств азотных удобрений; об использовании в практике видов и сортов растений, характеризующихся минимальной концентрацией  $^{137}\text{Cs}$ ; о роли дернины как важнейшего компонента лугового биогеоценоза в долгосрочном существовании депо радионуклидов с повышенной доступностью для растений; о более длительных полупериодах снижения концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в растительности лугов, чем на пахотных почвах; о применении системы рационального

кормления животных (перевод на «чистые» корма перед забоем) и цезий-связывающих препаратов (ферроцианидсодержащие соединения) для исключения производства мяса с превышением ВДУ и др. Данные положения стали научным обеспечением для внедрения в практику рекомендаций по ведению агропромышленного производства на радиоактивно загрязненных территориях как в ранний период после аварии, так и в долговременном режиме, направленном на устойчивое снижение содержания радионуклидов в пищевых продуктах. Это позволило добиться существенного снижения доз облучения населения и привело к значимому оздоровлению окружающей среды.

Свой вклад в развитие важных положений лесной радиоэкологии внесли работы сотрудников лаборатории радиоэкологии факультета почвоведения МГУ, которые под руководством Ф.А. Тихомирова, а позднее А.И. Щеглова проводились в лесных экосистемах наиболее загрязненных регионов РФ, Украины и Белоруссии, характеризующихся различным составом выпадений и соответственно радиоэкологических условий. К числу важнейших положений лесной радиоэкологии постчернобыльского периода можно отнести вывод об особой роли лесных экосистем в первичном и вторичном перераспределении техногенных радионуклидов и о барьерной функции леса в условиях аэрального загрязнения на пути биогеохимической миграции радионуклидов в окружающей среде. Для лесных экосистем различных почвенно-климатических зон были установлены пространственно-временные закономерности распределения и биологической доступности техногенных радионуклидов в зависимости от форм радиоактивных выпадений и ландшафтных условий. Были выявлены количественные показатели и закономерности накопления радионуклидов компонентами лесных экосистем и найдены биологические индикаторы радиоактивного загрязнения. Показано влияние компонентов лесного биогеоценоза (древесного и травяно-кустарничкового ярусов, мохового покрова, грибного комплекса, лесной подстилки, почвы) и биогенной миграции в целом на перераспределение радионуклидов в ландшафтах. Установлено, что одним из главных факторов, определяющих роль лесной подстилки как биогеохимического барьера на пути вертикальной миграции  $^{137}\text{Cs}$  в лесных экосистемах, является микобиота. Данные результаты можно рассматривать как подтверждение и развитие идей В.И. Вернадского и Н.В. Тимофеева-Ресовского об особой роли живого вещества в накоплении и миграции радионуклидов. На основании результатов многолетних исследований в нативных условиях впервые была разработана концептуальная модель биогеохимического круговорота техногенных радионуклидов в лесных ландшафтах, дана качественная и количественная оценка основных потоков и

показана их роль в перераспределении радионуклидов в биосфере.

Также были разработаны математические радиоэкологические модели с шагом по времени от суток до одного года, которые позволили провести численные эксперименты по изучению поведения радионуклидов чернобыльского происхождения в почвах и растительном покрове загрязненных территорий и дать прогноз дальнейшего развития ситуации. Результатом этих работ явилось издание обобщающих монографий на русском [Щеглов, 1999; Мамихин, 2003] и английском [Shcheglov et al., 2001] языках. С помощью разработанной в лаборатории методики исследования органических форм соединений радионуклидов в почвенных растворах было установлено, что долгоживущие радионуклиды в жидкой фазе почв природных биогеоценозов в зависимости от их природы и ряда других экологических факторов преимущественно ассоциированы с органическими веществами с молекулярной массой от 350 до 11000 [Agapkina et al., 1998]. Доля радионуклидов в почвенных растворах составляла от тысячных до нескольких процентов от активности в почве и с течением времени после аварии снижалась, что позволило сделать вывод о приближении распределения радиоизотопов между твердой и жидкой фазами почв к состоянию равновесия.

В последующем усилия исследователей, в том числе и школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, были направлены к новой сфере деятельности — разработке контрмер по минимизации последствий широко-масштабного радиоактивного загрязнения.

**IV, современный этап развития радиоэкологии (2011 — настоящее время).** В настоящее время развитие радиоэкологии связано с дальнейшим совершенствованием мировых ядерных технологий, ликвидацией последствий ряда радиационных инцидентов (авария на АЭС Фукусима, 2011 г.), пересмотром концепции радиационной защиты окружающей среды. Если ранее (40–80 гг. прошлого века) на первое место выдвигалась защита человека, то сейчас говорится о защите биосферы в целом, то есть и биоты, и человека как ее компонентов [Алексахин и др., 1970; Алексахин, Нарышкин, 1977; Основные принципы..., 2004]. Это можно рассматривать как развитие идей В.И. Вернадского об ответственности общества перед природой и переходе от антропоцентрического подхода к решению радиоэкологических проблем к экоантропоцентрическому.

Разрабатываются новые теоретические концепции, связанные с понятием радиоемкости экосистемы. В ее основе лежит тезис о предельном загрязнении радионуклидами, при котором не наблюдается серьезных изменений в функционировании компонентов биоты и экосистемы в целом [Кутлахметов,

2014; Жураковская, Петин, 2017, и др.]. Не теряют своей актуальности такие вопросы, как поведение радионуклидов в природных средах. В зонах влияния объектов ядерно-топливного цикла (в первую очередь АЭС) оценивается воздействие технологических выбросов этих предприятий на различные компоненты окружающей среды, изучаются особенности накопления и распределения техногенных радионуклидов в почвах, донных отложениях водоемов, поверхностных водах и растениях различных экологических групп, контролируется динамика этих показателей для прогноза изменения радиоэкологической обстановки.

Пространственно-временные изменения поведения радионуклидов и факторы, определяющие процессы их перераспределения в ландшафтах, являются ключевыми в оценке потоков элементов-загрязнителей в экосистемах. Акцент в данных исследованиях смещается в область оценки изменения изучаемых параметров при сочетанном загрязнении почв радионуклидами и экотоксикантами органической (нефтепродуктами, ПАУ и др.) и неорганической (тяжелыми металлами) природы [Липатов и др., 2022]. Поэтому в настоящее время в связи с интенсификацией добычи и переработки нефти активно ведутся почвенно-экологические и радиационные исследования на нефтедобывающих территориях РФ. Эти исследования позволяют оценить уровни сочетанного нефтяного (разливы нефти) и радиоактивного загрязнения почв и водных объектов вследствие поступления на дневную поверхность слабоминерализованных и слаборадиоактивных пластовых вод при добыче нефти на месторождениях и вблизи предприятий по добыче и переработке нефти и дать прогноз изменения структуры полей загрязнения в долгосрочной перспективе.

На фоне глобального загрязнения ландшафтов техногенными радионуклидами не менее важным аспектом данных работ является изучение подвижности в почвах и доступности компонентам биоты тяжелых естественных радионуклидов (изотопов урана, тория, радия, свинца и других) [Манахов и др., 2022]. Естественные радионуклиды являются основным источником формирования природного радиационного фона на незагрязненных территориях. Дополнительные их количества могут поступать в окружающую среду в результате деятельности промышленных предприятий (как связанных с атомной энергетикой, так и «не ядерных» отраслей хозяйства, таких как нефтедобыча, сжигание природного газа и угля, производство и использование минеральных удобрений). Одним из важных звеньев в радиоэкологических исследованиях и в будущем является оценка форм соединений радионуклидов в природных средах и, в первую очередь, в почве [Манахов и др., 2019; Щеглов и др., 2021; Агапкина и др., 2023]. Эта информация служит основой

для оценки их подвижности в почвенном профиле в зависимости от экологических условий, а также при миграции в сопредельные среды, в том числе в воды источников водоснабжения, что позволяет оценить доступность радионуклидов растениям. Это особенно важно для почв, используемых в сельскохозяйственной деятельности. Следует подчеркнуть, что основные положения, установленные в данных исследованиях, касаются определяющей роли водорастворимых и обменных форм радионуклидов в почвах в биохимических процессах в окружающей среде и влияния природы радионуклида, экологических и временных факторов на образование и динамику форм.

Важным направлением исследований в радиоэкологии являются разработка и использование математических моделей как эффективного инструмента изучения поведения радионуклидов в биосфере. К настоящему времени построены разнообразные имитационные модели динамики радионуклидов в основных типах почв, наземных экосистем и гидробиоценозов, подвергшихся радиоактивному загрязнению [Переволоцкий и др., 2016; Сазыкина, Крышев, 2022]. Модели используются для исследования и прогнозирования процессов миграции радиоактивных веществ в почвах, воде и донных отложениях, их перераспределения по компонентам растительного покрова и гидробионтам и поведения в звеньях пищевой цепи в различных радиологических ситуациях. Это позволяет также оценивать внешнюю и внутреннюю дозовую нагрузку на живые организмы, обитающие на загрязненных территориях.

### **Перспективные исследования в области радиоэкологии**

Актуальным направлением исследований в области радиоэкологии является оценка показателей биологического круговорота и биогеохимических циклов радионуклидов. Если для стабильных изотопов и химических аналогов радиоактивных элементов характерны устоявшиеся показатели биологического круговорота, выработанные эволюционным путем, то для искусственных радионуклидов данное равновесное состояние не выражено. Следует подчеркнуть, что особенности биологического круговорота техногенных радионуклидов на первых этапах после чернобыльских выпадений нашли отражение в целом ряде работ [Щеглов и др., 1996; Щеглов, 1999; Щеглов, Цветнова, 2000; Shcheglov et al., 2001], однако в отдаленный период после выпадений таких исследований проводилось крайне мало. В рамках данной проблемы большое значение приобретают положения, связанные не только с количественной оценкой потоков радионуклидов и макроэлементов в системе «почва — растение» и соотношением данных потоков, но и с оценкой изменения этого соотношения во времени. По мнению ряда специали-



стов [Санжарова и др., 1994; Переволоцкий, 2006, и др. ], в отдаленные периоды после выпадений, когда состояние радионуклидов достигает динамического квазиравновесия в системах «техногенные радионуклиды — стабильные изотопы — химические аналоги» и «почва — растение», различия в показателях биологического круговорота техногенных радионуклидов и их химических аналогов сглаживаются. Однако на сегодняшний день эта гипотеза остается дискуссионной, в связи с чем возникает необходимость проведения сравнительной оценки показателей биологического круговорота данных элементов в различных биогеоценозах и зонах радиоактивных выпадений в отдаленные периоды после их поступления [Комиссарова и др., 2022].

Данные исследования лежат в основе анализа биогеохимических циклов радионуклидов, на основании показателей которых возможно проведение биогеохимического картирования загрязненных территорий. Необходимость такого картирования декларируется достаточно давно, однако до настоящего времени оно не было осуществлено в связи с недостаточной разработанностью рассматриваемых вопросов, трудоемкостью и сложностью работ по его проведению.

$^{137}\text{Cs}$  является основным техногенным радионуклидом, который поступил в наземные экосистемы европейской части России вследствие выброса ЧАЭС (1986), и по оценкам специалистов будет определять радиационную обстановку вплоть до конца XXII в. [Радиоэкологические последствия..., 2018]. В этих условиях сохраняется высокая актуальность исследования механизмов миграции  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239+240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  в системе «почва — растение», особенно в агроценозах, конечным потребителем продукции которых является человек. С этой целью на территории агроценозов, подвергшихся значимому загрязнению в результате чернобыльской аварии, необходимо изучение пространственно-временных особенностей геохимических полей загрязнения почв, параметров перехода радионуклидов и тяжелых металлов в различные культуры, их распределение в органах растений, накопление в используемой части растений в многолетнем ряду. Важной является верификация выявленных закономерностей в опытах на вегетационных сосудах и в условиях гидропоники, что позволяет оценить острые и хронические эффекты радиотоксического действия радионуклида на различные культуры и выявить механизмы адаптации растений к абиотическому стрессу [Pарамонова et al., 2021].

Одной из важнейших проблем является биоконтроль радиоактивного загрязнения. Методы биоиндикации не решают проблемы оценки экологических рисков отдаленных последствий радиационного воздействия. Они могут быть решены на основе методов биотестирования. Положения биотестирования для условий радиоактивного за-

грязнения разработаны в недостаточной степени. В первом приближении к разработанным тест-системам можно отнести видовой состав почвенных микроорганизмов, включающий и микобиоту [Щеглов и др., 2013]. Нашими исследованиями ранее было установлено, что в условиях радиоактивного загрязнения отмечается изменение структуры микробного сообщества за счет уменьшения численности некоторых представителей бактерий родов *Aeromonas*, *Pseudomonas*, *Rhodococci* и роста численности микобактерий, а также грибов (особенно темноокрашенных форм) [Степанов и др., 2009]. Эти положения требуют более детальной разработки с точки зрения оценки рисков от сочетанного действия экотоксикантов различной природы.

Весьма перспективны исследования, направленные на контроль загрязнения окружающей среды генотоксикантами, то есть факторами, нарушающими генетические процессы. Для этого необходимы чувствительные и информативные биотесты, одним из которых является экспресс-тест, основанный на цитогенетическом анализе нарушений процесса деления клеток в апикальной меристеме корешков лука репчатого *Allium cepa* L. На кафедре радиоэкологии и экотоксикологии разработаны и совершенствуются модификации *Allium*-теста, которые позволяют оценивать направленность и силу генотоксического воздействия поллютантов различной природы: электромагнитных излучений, в том числе ионизирующих, тяжелых металлов и органических соединений, пластиков и пищевых добавок [Столбова и др., 2018]. В связи с этим вышеуказанное биотестирование применимо в случаях радиоактивного, нефтяного и химического загрязнения почв, для оценки воздействия полей СВЧ-диапазона от мобильных телефонов и бытовых приборов. Используется система визуализации цитогенетических данных и пополняется база цифровых микроизображений патологий клеточного деления, отражающих различные механизмы токсического воздействия загрязнителей. Стоит задача разработать машинный алгоритм прочтения цифровых микроизображений картин патологий митоза и хромосомных aberrаций [Столбова и др., 2016].

Одной из важнейших задач является разработка инструментария, который позволяет рассматривать три ключевые проблемы современности: усиление продовольственной безопасности, поддержание обеспечения экосистемных услуг и снижение деградиционной нагрузки на почвенно-земельные ресурсы.

В свете этих проблем в рамках радиоэкологии основные научные интересы определяются поиском и выделением экосистемных услуг почв, связанных с радиоактивным загрязнением, эколого-экономической оценкой радиоактивно загрязненных земель, а также вопросами взаимного со-

пряжения деградации земель и продовольственной безопасности. Так, одной из экосистемных услуг, которая является чрезвычайно важной при оценке дозовых нагрузок на биоту от внешнего облучения, является экранирующая способность почвы [Мамихин и др., 2017].

Радиоактивное загрязнение оказывает существенное влияние на стоимость земель различного назначения, что требует разработки специфического инструментария по его учету [Цветнов и др., 2009]. Для решения задач сопряжения деградации земель и продовольственной безопасности активно используется методология «нейтрального баланса деградации земель» [Цветнов, Марахова, 2023], где радиоактивное загрязнение может стать одним из региональных индикаторов деградации.

Комплексная оценка радиационной и эколого-геохимической обстановки в городах, своевременное выявление очагов загрязнения и анализ временных трендов показателей крайне важны. В городах сосредоточено множество источников загрязнения окружающей среды и осуществляются процессы техногенной миграции, не имеющие аналогов в природе, в связи с этим необходима интенсификация исследований в урбандиапазонах различных регионов России. Это позволяет оценить долгосрочные риски для различных групп населения, подвергшихся воздействию поллютантов различной природы. В то же время комплексные исследования химического и радиоактивного загрязнения почв и компонентов природной среды в функциональных зонах города дают информацию о механизмах поступления, миграции и аккумуляции этих поллютантов ( $^{137}\text{Cs}$  и других техногенных радионуклидов, тяжелых металлов, нефтепродуктов, ПАУ, фталатов, диоксинов, хлорорганических пестицидов и др.) в городской среде.

Современным средством исследования и прогнозирования является компьютерное моделирование. В рамках этого направления перспективными в радиоэкологии являются разработка и применение имитационных моделей для воспроизведения поведения радионуклидов в пищевых цепях различных экосистем и оценки воздействия ионизирующего излучения. Данные модели могут использоваться также для прогнозирования и реконструкции экологических последствий радиационных аварий, изучения перераспределения радиоактивных выпадений в экосистемах и расчета дозовых нагрузок на биоту и человека. Все более актуальным становится применение компьютерного моделирования для воспроизведения, изучения и прогнозирования последствий сочетанного воздействия ионизирующего излучения и хемотоксикантов на живые организмы.

### Заключение

Неоценимый вклад в создание современной школы радиоэкологии внесли наши великие со-

отечественники В.И. Вернадский, Р.М. Алексахин, Д.И. Гусев, А.И. Ильенко, А.Е. Катков, В.М. Ключковский, Д.А. Криволицкий, Н.В. Куликов, В.И. Маслов, И.В. Молчанова, Ф.И. Павлоцкая, И.Н. Рябов, А.И. Таскаев, Н.В. Тимофеев-Ресовский, Ф.А. Тихомиров, В.А. Шевченко, И.А. Шеханова и многие другие исследователи. Труды этих выдающихся ученых во многом стали фундаментальной основой теории и практики радиационной защиты как человека, так и окружающей среды.

Развитие радиоэкологии прошло через ряд этапов, что позволяет охарактеризовать основные положения, которые показывают достижения и эволюцию идей в области данной науки [Алексахин, 2006; Алексахин, Пристер, 2008]. Эти положения отражают два аспекта задач: изучение поведения естественных и техногенных радионуклидов в биосфере и характеристику эффектов их воздействия на человека и биоту. При этом движущими силами развития радиоэкологии, отраженными в этапах ее развития, являются факторы, связанные как с хронологией политических событий и техногенных катастроф, так и с научными достижениями смежных дисциплин, накоплением и осмыслением фактического материала самой радиоэкологии.

Среди основных научных положений радиоэкологии, сформулированных к настоящему времени, можно выделить: 1) положения о составе аэральных выпадений и долговременной динамике форм нахождения техногенных радионуклидов в почвах; 2) положения о биоиндикационном значении и санитарной функции леса в ландшафтах при радиоактивном загрязнении; 3) концепция радиационной защиты человека и окружающей среды; 4) роль биологического круговорота в геохимической миграции радионуклидов в природных и агроэкосистемах в условиях радиоактивного загрязнения; 5) биогеохимические потоки техногенных и природных радионуклидов в биогеохимических циклах; 6) подходы к оценке и методы инструментального и биологического контроля радиологической ситуации при различных сценариях радиоактивного и комплексного загрязнения окружающей среды; 7) положение об экранирующей способности почвы как экосистемной услуге для снижения дозовых нагрузок на биоту и ряд других положений; 8) контрмеры, направленные на снижение миграции радионуклидов по звеньям трофической цепи и снижающие дозовые нагрузки внутреннего облучения человека.

В настоящее время остро стоят задачи защиты окружающей среды от радиоактивного загрязнения, управления радиоактивными отходами; создания безопасной в экологическом отношении ядерной энергетики — замкнутого ядерного топливного цикла; предотвращения опасности радиационных аварий и другие. Таким образом, проблемы радио-



экологии становятся ключевыми в развитии ядерных технологий.

За период своего развития в радиоэкологии, как это отмечается в любой науке, произошла эволюция основных идей, среди которых можно отметить: 1) переход от оценки воздействия ионизирующего излучения на отдельные биообъекты, затем в простых системах «вода–грунт», «почва–раствор», «вода–гидробионт» и т. п. к оценке дозовых нагрузок на уровне экосистемы, ландшафта, популяции; 2) переход от оценки доз облучения человека на радиоактивно загрязненных территориях к оценке радиационных рисков для населения и оценки доз облучения фауны и флоры (экодозиметрия); 3) переход от расчетов периодов полувыведения техногенных радионуклидов из корнеобитаемых слоев почвы на основе периода их полураспада к оценке экологического периода полувыведения с учетом периода полураспада радионуклида, а также скорости заглубления и миграции радионуклидов в почве; 4) переход от количественной оценки допустимых доз и уровней загрязнения (ПДК, для радиоактивных веществ УВ — уровень вмешательства) на концепцию экологических рисков от радиоактивного облучения, радиоэкологическую и радиационную безопасность биоты и человека; 5) переход от оценки загрязнения почв отдельными группами загрязнителей к исследованиям сочетанного загрязнения почв техногенными радионуклидами, тяжелыми металлами и другими экотоксикантами (эквидозиметрия).

Одно из современных направлений эволюции радиоэкологии состоит в том, что она, как очень специфическая отрасль экологии, сближается с другими дисциплинами, изучающими техногенное загрязнение биосферы. При этом радиоэкология привносит свою методологию, в частности эквидозиметрический подход. Развитие радиоэкологии в настоящее время происходит в первую очередь в соответствии с развитием инструментальных методов исследования и информационно-вычислительных технологий, которые позволяют наиболее адекватно воспроизводить в цифровом виде количественные и качественные изменения структуры радиоактивного загрязнения и динамику дозовых нагрузок на человека и биоту.

### Информация о финансировании работы

Исследования проводилось в рамках НИОКТР № АААА-А21-121012290189-8, выполняемой по государственному заданию и при поддержке Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды».

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапкина Г. И., Манахов Д.В., Щеглов А.И. и др. Теория и практика применения методов исследования форм соединений радионуклидов в почвах // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2023. № 1. <https://doi.org/10.55959/MSU137-0944-17-2023-78-1-68-80>
2. Алексахин Р.М. Научная деятельность В.М. Ключковского и проблема радиоактивного загрязнения почвенно-растительного покрова // Почвоведение. 1990. № 10.
3. Алексахин Р.М. Актуальные экологические проблемы ядерной энергетики // Атомная энергия. 2013. Т. 114, вып. 5.
4. Алексахин Р.М. Проблемы радиоэкологии: эволюция идей. Итоги. М., 2006.
5. Алексахин Р.М., Нарышкин М.А. Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах. М., 1977.
6. Алексахин Р.М., Пристер Б.С. Радиоэкология как отрасль естествознания: некоторые размышления об интересном прошлом, сложном и важном настоящем и перспективах на будущее // Радиационная биология. Радиоэкология. 2008. Т. 48, № 6.
7. Алексахин Р.М., Тихомиров Ф.А., Куликов Н.В. Состояние и задачи лесной радиоэкологии // Экология. 1970. № 1.
8. Алексахин Р.М., Удалова А.А., Гераськин С.А. Учение о биосфере В.И. Вернадского и современные проблемы радиоэкологии // Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. Т. 54, № 4. <https://doi.org/10.7868/S0869803114040031>
9. Вернадский В.И. О концентрации радия в живых организмах. Докл. АН СССР. 1929. Сер. А. № 2.
10. Гаевская Н.В. Изменчивость у *Artemia salina* // Изв. Императ. Академии наук. VI серия. 1914. Т. 8, № 16.
11. Жураковская Г.Н., Петин В.Г. Подходы к решению проблем теоретической радиоэкологии. Обзор // Радиация и риск. 2017. Т. 26, № 1. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2017-26-1-35-43>
12. Кривоуцкий Д.А., Тихомиров Ф.А., Федоров Е.А. Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз. М., 1988.
13. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Под общ. ред. Л.А. Ильина и В.А. Губанова. М., 2001.
14. Кутлахметов Ю.А. Дорога к теоретической радиоэкологии. Киев, 2015.
15. Липатов Д.Н., Вараченков В.А., Манахов Д.В. и др. Пространственное варьирование удельной активности <sup>137</sup>Cs, содержания тяжелых металлов и нефтепродуктов в загрязненных почвах г. Электросталь // Почвоведение. 2022. № 6. <https://doi.org/10.31857/S0032180X22060077>
16. Мамихин С.В. Динамика углерода органического вещества и радионуклидов в наземных экосистемах (имитационное моделирование и применение информационных технологий). М., 2003.
17. Мамихин С.В., Манахов Д.В., Щеглов А.И. и др. Некоторые аспекты оценки роли почв как среды, экранирующей ионизирующее излучение // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2017. № 2.
18. Манахов Д.В., Емельянов А.М., Карпучин М.М. и др. Методы изучения форм нахождения радионуклидов в почвах // Радиационная биология. Радиоэкология. 2019. Т. 59, № 4. <https://doi.org/10.1134/S0869803119040088>

19. Манахов Д.В., Тамразова А.Р., Магомедова К.М. и др. Содержание и особенности поведения тяжелых естественных радионуклидов в серой и агросерой почвах Тульских зазек // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2022. № 4.
20. Молчанова И.В., Караваева Е.Н., Михайловская Л.Н. Радиоэкологические исследования почвенно-растительного покрова. Екатеринбург, 2006.
21. Орлов А.А., Краснов В.П., Прищепина А.Л. Радиоактивно загрязненные леса как критические ландшафты: радиоактивность пищевых продуктов и влияние на формирование дозы внутреннего облучения населения (аналитический обзор). Житомир, 2002.
22. Основные принципы оценки воздействия ионизирующих излучений на живые организмы, за исключением человека. Публикация 91 МКРЗ: Пер. с англ. М., 2004.
23. Переволоцкий А.Н. Распределение  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в лесных биогеоценозах. Гомель, 2006.
24. Переволоцкий А.Н., Гончаров Е.А., Переволоцкая Т.В. К вопросу о моделировании распределения радионуклидов в лесных биогеоценозах // Радиационная биология. Радиоэкология. 2016. Т. 56, № 6.
25. Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В. Обоснование ведения системы радиоэкологического мониторинга в лесных биогеоценозах на различных этапах после аварийных радиоактивных выпадений // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т. 52, № 3.
26. Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС: биологические эффекты, миграция, реабилитация загрязненных территорий / Под ред. Н.И. Санжаровой, С.В. Фесенко. М., 2018.
27. Сазыкина Т.Г., Крышев А.И. Разработка и тестирование модели поглощения энергии в биообъектах от инкорпорированных излучателей фотонов // Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра). 2022. Т. 31, № 2.
28. Санжарова Н.И., Фесенко С.В., Алексахин Р.М. Динамика биологической доступности  $^{137}\text{Cs}$  в системе почва-растение после аварии на Чернобыльской АЭС // Доклады Академии наук. 1994. Т. 338, № 4.
29. Сельскохозяйственная радиоэкология / Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М., 1992.
30. Комиссарова О.Л., Парамонова Т.А., Кузьменкова Н.В. Сравнительный анализ биологической миграции цезия-137 и стабильного калия в агроценозах черноземной зоны // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2022. № 4.
31. Степанов А.Л., Цветнова О.Б., Паников С.Н. Оценка микробной трансформации азота и углерода в условиях нефтяного и радиоактивного загрязнения // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2009. № 4.
32. Столбова В.В., Агапкина Г.И., Котельникова А.Д. и др. Краткосрочный метод оценки генотоксичности почвы как твердофазного тела на базе Allium-теста // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2018. № 5.
33. Столбова В.В., Манахов Д.В., Щеглов А.И. Регистрация результатов Allium-теста с помощью комплекса визуализации на основе микроскопа Микмед-6 для оценки генотоксичности почв // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2016. № 2.
34. Тарханов И.Р. О роли радиоактивных лучей в биологии и в лечении болезней // В кн.: Тархнишвили И.Р. Избранные сочинения. Тбилиси, 1961.
35. Тимофеев-Ресовский Н.В. Избранные труды. М., 2009.
36. Тимофеев-Ресовский Н.В., Титлянова А.А., Тимофеева Н.А. и др. Поведение радиоактивных изотопов в системе почва-раствор // Радиоактивность почв и методы ее определения. М., 1966.
37. Тихомиров Ф.А. Действие ионизирующих излучений на экологические системы. М., 1972.
38. Цветнов Е.В., Марахова Н.А. Применение базовой и модифицированной методик оценки нейтрального баланса деградации земель в контексте изучения связи деградации и агропроизводства // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2023. № 2.
39. Цветнов Е.В., Щеглов А.И., Цветнова О.Б. Эколого-экономический функциональный подход к оценке стоимости сельскохозяйственных земель в условиях химического и радиоактивного загрязнения // Почвоведение. 2009. № 3.
40. Щеглов А.И. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах. По материалам 10-летних исследований в зоне влияния аварии на ЧАЭС. М., 1999.
41. Щеглов А.И., Тихомиров Ф.А., Цветнова О.Б. и др. Биогеохимия радионуклидов чернобыльского выброса в лесных экосистемах Европейской части СНГ // Радиационная биология. Радиоэкология. 1996. Т. 36, вып. 4.
42. Щеглов А.И., Цветнова О.Б. Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах: достижения и задачи // Радиоактивность при ядерных взрывах и авариях. Т. 2. СПб., 2000.
43. Щеглов А.И., Цветнова О.Б., Манахов Д.В. и др. Формы соединений  $^{137}\text{Cs}$  в почвах лесных экосистем загрязненных территорий Брянского Полесья в отдаленный период после чернобыльских выпадений // Проблемы агрохимии и экологии. 2021. № 3–4.
44. Щеглов А.И., Цветнова О.Б., Столбова В.В. Биодиагностика радиоактивного загрязнения природных экосистем // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 17. Почвоведение. 2013. № 4.
45. Agapkina G.I., Shcheglov A.I., Tikhomirov F.A. et al. Dynamics of Chernobyl-fallout radionuclides in soil solutions of forest ecosystems // Chemosphere. 1998. Vol. 36, № 4–5.
46. Behavior of radionuclides in natural and semi-natural environments (Editors M. Belli, F. Tikhomirov). Luxembourg, 1996.
47. Paramonova T., Kuzmenkova N., Godyaeva M., Slominskaya E. Biometric traits of onion (*Allium cepa* L.) exposed to  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{243}\text{Am}$  under hydroponic cultivation // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2021. Vol. 207, № 1.
48. Kirchmann R. The historical overview of Radioecology in the world // Influence of Climatic Characteristics upon Behavior of Radioactive Elements. Japan, 1997.
49. Odum E.P. Consideration of the total environment in power reactor waste disposal // Proc. Int. Conf. Peaceful Uses Atomic Energy. Geneva, 1956.
50. Shcheglov A.I., Tsvetnova O.B., KliashTORIN A.L. Biogeochemical migration of technogenic radionuclides in forest ecosystems. М., 2001.
51. Stoklasa J., Penkava J. Biologie des Radiums und der Radioaktiven Elemente. Berlin, 1932.

Поступила в редакцию 20.06.2023

После доработки 24.07.2023

Принята к публикации 01.09.2023

## RADIOECOLOGY: PAST, PRESENT, FUTURE

**A. I. Shcheglov, O. B. Tsvetnova, G. I. Agapkina, D. N. Lipatov, D. V. Manakhov,  
S. V. Mamikhin, T. A. Paramonova, V. V. Stolbova, E. V. Tsvetnov**

The article deals with issues related to the development of radioecology as an independent scientific discipline. The achievements of the past years, the studies that are currently being carried out, as well as promising areas of development in this area are analyzed. A corrected periodization of the stages of development of radioecology is proposed, taking into account the experience accumulated to date in the field of this discipline. At the initial stage (1895–1929:), empirical material was collected; at the first stage (1930–1960), the theoretical foundation was laid and radioecology was formed as an independent discipline; at the second stage (1961–1990), intensive development of radioecology was noted, and at the third stage (1991–2010) — progressive development of radioecology; the fourth modern stage of radioecology development falls at the beginning of the twentieth century (2011 — present). For each stage the main scientific achievements and evolution of ideas in the field of radioecology are considered. It is postulated that at present the development of this discipline is associated with the further improvement of world nuclear technologies, the elimination of the consequences of a number of radiation incidents (the accident at the Fukushima nuclear power plant, 2011), the revision of the concept of radiation protection of the environment and a number of other provisions. Particular attention is paid to forest radioecology, one of the most important main directions of this science.

*Keywords:* discovery of radioactivity, ionizing radiation, natural and technogenic radionuclides, aerial fallout, radiation accidents, contamination, radiation ecology, history of development.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Щеглов Алексей Иванович**, докт. биол. наук, профессор, зав. кафедрой радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: shchehl@mail.ru

**Цветнова Ольга Борисовна**, канд. биол. наук, вед. науч. сотр. кафедры радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: tsvetnova@mail.ru

**Агапкина Галина Ивановна**, канд. хим. наук, ст. науч. сотр. кафедры радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: Galina\_agapkina@mail.ru

**Липатов Денис Николаевич**, канд. биол. наук, ст. преп. кафедры радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: denis\_lipatov@mail.ru

**Манахов Дмитрий Валентинович**, канд. биол. наук, ст. преп. кафедры радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: demian2@yandex.ru

**Мамихин Сергей Витальевич**, докт. биол. наук, вед. науч. сотр. кафедры радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: svmamikhin@mail.ru

**Парамонова Татьяна Александровна**, канд. биол. наук, ст. преп. кафедры радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: tapara@mail.ru

**Столбова Валерия Владимировна**, канд. биол. наук, ст. преп. кафедры радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: vstol@bk.ru

**Цветнов Евгений Владимирович**, канд. биол. наук, вед. науч. сотр. кафедры радиоэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения МГУ имени М.В. Ломоносова, e-mail: ecobox@mail.ru