____ ИЗ РАБОЧЕЙ ТЕТРАДИ __ ИССЛЕДОВАТЕЛЯ __

ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ НА БИОТУ

© 2020 г. А. Н. Переволоцкий^{а,*}, Т. В. Переволоцкая^{а,**}

^аВсероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия *E-mail: aleks perevolotsky@mail.ru

**E-mail: forest rad@mail.ru

Поступила в редакцию 03.02.2020 г. После доработки 20.02.2020 г. Принята к публикации 25.03.2020 г.

В статье рассмотрены концептуальные положения, касающиеся оценки и прогнозирования радиационного воздействия на биоту. Выделены взаимосвязанные составляющие радиоэкологических оценок, учитывающие перераспределение радионуклидов в компонентах окружающей среды и связанные с ним уровни облучения живых организмов. Предложен авторский подход к решению проблемных вопросов в области разработки миграционных и дозиметрических моделей оценки воздействия радиоактивных выбросов на биоту.

Ключевые слова: радиоактивные выбросы, радионуклиды, плотность загрязнения, биогеоценозы, модели миграции, дозы облучения, референтные организмы.

DOI: 10.31857/S0869587320060109

Прошло уже более века с момента открытия радиоактивности и более 60 лет — с начала использования ядерных технологий человечеством. При всех их преимуществах обратной стороной медали оказывается поступление в окружающую среду ряда радиоактивных изотопов. Эти радионуклиды практически отсутствуют в природе,



ПЕРЕВОЛОЦКИЙ Александр Николаевич — доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории математического моделирования радиоэкологических процессов ВНИИРАЭ. ПЕРЕВОЛОЦКАЯ Татьяна Витальевна кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории математического моделирования радиоэкологических процессов ВНИИРАЭ.

имеют относительно небольшой период полураспада и определяют дополнительное, сверхфоновое облучение человека и биоты [1, 2]. Например, объёмная активность ⁸⁵Kr в атмосфере в результате испытаний ядерного оружия и выбросов предприятий ядерного топливного цикла возросла на 6 математических порядков, достигнув единиц Бк/м³, в природной среде появились долгоживущие радиоизотопы плутония ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs и других радионуклидов [3–5].

Крупные радиационные аварии на НПО "Маяк" в 1957 г. [6], Чернобыльской АЭС в 1986 г. [7], Фукусиме-1 в 2011 г. [8] обусловили столь значительный уровень радиоактивного загрязнения на локальных участках, а также дозы ионизирующего излучения, что потребовалось применение специальных мер радиационной защиты населения. При достаточной проработанности этих мер [9] несколько в стороне оказалась биота. Это было связано с преобладавшей антропоцентричной парадигмой в защите окружающей среды от ионизирующего излучения: "защищён человек – защищена биота" [10]. Радиационные эффекты, наблюдаемые при крупных радиационных инцидентах [11, 12], потребовали перехода к "экологоцентричному" подходу в обеспечении безопасности природной среды – с оценкой доз облучения

биоты и рисков её обитания в условиях радиоактивного загрязнения [10]. В ряде работ [13, 14] сформулированы требования к набору представительных (референтных) живых организмов, основные положения и допущения для прогнозирования доз их облучения. Однако существующие методические подходы охватывают только ситуацию квазиравновесного распределения радионуклидов в биогеоценозах и требуют для расчётов доз готовых исходных данных. Следует констатировать отсутствие комплексного подхода и соответствующего набора программных средств, которые позволили бы объединить все прогнозные расчёты в целом: от прогнозирования распространения радионуклидов выброса в атмосфере с последующей оценкой их содержания в основных компонентах биогеоценозов до расчёта динамики дозовых показателей облучения биоты с оценкой риска обитания.

Таким образом, в развитие существующих подходов представляется актуальной разработка основных положений и допущений радиоэкологической оценки состояния природной среды в условиях радиоактивного загрязнения с выделением основных её компонентов и описанием схемы связей между ними. Оценка должна базироваться на методах математического моделирования с учётом следующих составляющих:

информационной, предполагающей количественное и качественное описание исследуемой территории, в частности, типичных биогеоценозов, растительного и животного мира;

• миграционной, содержащей модели осаждения радионуклидов из атмосферы, прогнозирования их активности в компонентах исследуемых биогеоценозов;

• дозиметрической, включающей модели формирования радиационной обстановки и облучения живых организмов;

• оценок радиационного воздействия на биоту с учётом спрогнозированных доз облучения в окружающей среде и непосредственно живых организмов.

Информационная составляющая — это обеспечение данными для прогнозных расчётов миграции радионуклидов в основных компонентах биогеоценозов и связанных с ними доз облучения живых организмов. Её основу должны составлять, во-первых, исходная информация по интенсивности выброса радионуклидов, скоростям их осаждения и вымывания из атмосферы, вовторых, сведения о метеорологических условиях на территории, прилегающей к источнику выбросов. Наиболее точная оценка численных прогнозов метеорологических условий базируется на данных, поступающих в виде сеток различного пространственного разрешения из специализированных прогностических центров по Глобальной сети телесвязи Всемирной метеорологической организации. Такие данные предпочтительны для прогнозирования объёмной активности радионуклидов в атмосфере и плотности их осаждения на земную поверхность в реальном масштабе времени. Для менее точной оценки метеоусловий могут использоваться простые наборы данных по оценённым на момент разового выброса категории устойчивости атмосферы и скорости ветра или по среднемноголетней частоте повторяемости категорий устойчивости атмосферы.

Важный компонент информационной составляющей – геоинформационная система, отражающая пространственные данные объекта (например, участков агробиогеоценозов, выдела лесных кварталов, болот по типам, земель населённых пунктов), а также атрибутивные данные, к которым могут быть отнесены основные характеристики почвенного покрова (тип и подтип почвы, агрохимические показатели и режим увлажнения), видовой состав и биомасса типичных представителей фауны. В атрибутивных данных целесообразно выделять положение реперных точек, находяшихся в типичных для исследуемой территории биогеоценозах, предполагая репрезентативность расчётных данных (содержания радионуклидов выпадений в основных компонентах природной среды, связанные с ними дозовые показатели внешнего и внутреннего облучения живых организмов), полученных в этих точках, для моделируемого биогеоценоза в целом.

Не менее важный компонент – база знаний по закономерностям распределения радионуклидов в системе "поверхность надземной фитомассы – поверхностный слой почвы", по переходу радионуклидов в системе "корнеобитаемый слой почвы - надземная фитомасса растений", параметрам миграции радионуклидов в вертикальном профиле почвы и их перехода в типичных пищевых цепочках зооценоза в зависимости от почвенно-экологических условий, прежде всего от агрохимических показателей почвы и режима её увлажнения. Вполне очевидным представляется проведение специальных радиоэкологических исследований для уточнения параметров накопления и миграции радионуклидов в различных средах в специфических природно-климатических условиях территории распространения радиоактивного выброса.

Миграционная составляющая включает в себя модели распространения радиоактивных выпадений в атмосфере, осаждения радионуклидов на земную поверхность, их миграции в вертикальном профиле почвы, накопления растениями и животными. Полученные прогнозные данные позволят рассчитать дозы облучения биологических объектов.

Модель распространения радионуклидов в атмосфере должна дать информацию об их объёмной активности в воздухе (мгновенной, осреднённой относительно времени выброса или интегральной) и плотности осаждения на земную поверхность в реперных точках. При этом наиболее точная оценка данных параметров в реальном масштабе времени может быть получена с применением моделей, основанных на описании атмосферной турбулентности с использованием лагранжева подхода (например, программные комплексы Recass NT, Нострадамус) [15, 16]. Приемлемую точность оценок среднемноголетней объёмной активности и плотности осаждения радионуклидов при непрерывных радиоактивных выпадениях могут обеспечить модели, реализующие решение полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии [17]. Вместе с тем они не отражают распределение радиационных показателей в пространстве на момент выброса с характерными для него метеоусловиями. По этой причине исследуемые показатели могут быть несколько занижены по сравнению с прогнозными расчётами, выполняемыми на основе моделей, использующих лагранжев подход. В случаях разовых выбросов радиоактивных веществ модели, основанные на решении полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии, позволяют получить приемлемую оценку показателей активности только при условии постоянства метеорологических условий во время выброса.

Другой важный аспект прогнозирования содержания радионуклидов в атмосфере — расчёт концентраций радиоактивных изотопов инертных газов, поскольку такие радионуклиды не осаждаются на земную поверхность и могут вызвать только внешнее облучение биоты. Однако их активность в составе хронического выброса АЭС на 4 математических порядка выше по сравнению с таковым показателем для радиоизотопов йода и на 5 — по сравнению с аэрозольными выбросами [18, 19].

В модели распределения радионуклидов из состава выпадений в системе "поверхность надземной фитомассы растений – поверхностный слой почвы" в качестве исходных данных применяется величина плотности осаждения радионуклидов на земную поверхность [20]. При хронических радиоактивных выпадениях она должна работать для каждого вегетационного сезона во всех исследованных типах биогеоценозов, при аварийных – только для сезона, в котором произошли выпадения. При прогнозировании динамики активности радионуклидов в указанной системе следует учитывать изменение биометрических показателей растений в течение вегетационного сезона и соответствующие им изменения степени задерживания частиц выпадений самой фитомассой [20]. Вид моделируемого биогеоценоза (хвойные и лиственные леса, луга, агрофитоценозы с различными культурами) должен учитываться в параметрах и константах переноса между основными компонентами исследуемой системы. Так, в первые недели вегетационного периода биомасса луговых и сельскохозяйственных растений относительно мала и практически все радионуклиды поступают на поверхность почвы, однако с течением времени и по мере увеличения биомассы более половины выпавших на её поверхность радионуклидов способны ею задерживаться. В хвойных лесах задерживающая способность практически постоянна на протяжении года, а в лиственных – достигает максимума в летний период [11].

В поверхностном слое почвы активность радионуклидов, поступивших из атмосферы и непосредственно с поверхности растений на протяжении вегетационного периода, определяется их задерживанием в пределах тонкого (<0.5 см) слоя [13]. При этом миграцией в глубь почвы в течение этого промежутка времени можно пренебречь (коэффициент диффузии составляет 10^{-9} — 10^{-6} см²/с для большинства радионуклидов), что связано с эффективной сорбцией их ультрамикроколичеств [21]. Отметим, что выходными данными модели должна быть динамика активности радионуклидов в надземной фитомассе растений и в поверхностном слое почвы в реперных точках типичных биогеоценозов.

Модель корневого поступления радионуклидов в системе "корнеобитаемый слой почвы надземная фитомасса растений" базируется на данных, касающихся активности радионуклидов выпадений в корнеобитаемом слое почвы. В почвах агробиогеоценозов с регулярной агротехнической обработкой они равномерно распределяются по глубине пахотного слоя, для почв лесов и лугов характерен экспоненциальный характер распределения, параметры которого зависят от гранулометрического состава и режима увлажнения [21].

Наиболее простым способом прогнозирования содержания радионуклидов в надземной фитомассе растений оказывается оценка параметров накопления радионуклидов (коэффициентов накопления или перехода) относительно содержания в корнеобитаемом слое почвы. Величины параметров могут быть получены в ходе проведения экспериментальных исследований для наиболее типичных видов растений на данной территории либо исходя из литературных данных [22]. Более сложный способ – использование динамических моделей миграции радионуклидов, основанных, например, на системе линейных дифференциальных уравнений переноса радионуклидов между компонентами моделируемой системы [23]. Сложность их применения обусловлена необходимостью специальных радиоэкологических исследований для выяснения параметров переноса радионуклидов в моделируемой системе с учётом специфических условий региона и верификации прогнозов на отдельной группе опытных участков. Результатом моделирования станет динамика активности радионуклидов в надземной фитомассе растений биогеоценозов, расположенных в реперных точках.

Радионуклиды могут поступать в растения из двух источников: путём непосредственного осаждения из атмосферы и через корни из почвы [23]. Вполне очевидно, что вклад каждого из источников будет различаться в зависимости от времени года, типа биогеоценоза, вида и времени радиоактивных выпадений. Так, если аварийные выпадения происходят во время вегетации растений, часть активности радионуклидов остаётся на поверхности надземной фитомассы, формируя пространственный источник облучения [23, 24]. В агробиогеоценозах такой источник определяется степенью развития налземной фитомассы И эффективно работает только в вегетационный период при максимальном её развитии [24], в хвойных лесах – постоянно, в лиственных – пропорционально развитию биомассы ассимилирующих органов, как наиболее задерживающей радиоактивные выпадения [11]. При этом роль корневого поступления радионуклидов в течение вегетационного периода аварийных выпадений незначительна, однако в последующие вегетационные сезоны именно этот источник становится основным при отсутствии хронических выпадений [23]. Если существует только хронический источник поступления радионуклидов, то необходимо учитывать радиоактивное загрязнение надземной фитомассы из атмосферы и по корневому пути на протяжении всех вегетационных периодов.

Оценку накопления радионуклидов типичными представителями фауны исследуемых биогеоценозов представляется целесообразным проводить только для массово встречающихся и наибоживотных. радиочувствительных видов лее Подобную концепцию в оценке облучения фауны предлагает Международная комиссия по радиационной защите (МКРЗ) [13]. К таким референтным организмам следует отнести: дождевого червя – для почвы, лягушку – для болот, оленя, мелких млекопитающих, пчелу – для природнорастительных комплексов большей части умеренных широт. Удельную активность радионуклидов выпадений в референтных организмах удобнее всего рассчитывать с помощью коэффициентов накопления или перехода относительно содержания их в почве [22]. При этом если это отдельно не оговаривается, удельная активность рассчитывается на весь организм без учёта типа распределения. Ограничением применения такого метода служит условие квазиравновесного распределения радионуклидов в окружающей среде. Однако в случае аварийных радиоактивных выпадений с преобладанием осаждаемых частиц на поверхности растений в организм животных, особенно растительноядных, такие частицы могут поступать в очень большом количестве [11]. К сожалению, для диких животных модели распределения радионуклидов по органам и тканям, как для сельскохозяйственных, до настоящего времени не разработаны [23, 25].

Дозиметрическая составляющая предназначена для оценки динамики доз внешнего облучения в исследуемых биогеоценозах и доз облучения референтных организмов. Оценку в реперных точках биогеоценозов следует проводить на различных высотах над поверхностью почвы от следующих источников [26].

• Облако радиоактивных газов и аэрозолей. Это постоянно существующий источник излучения при хронических радиоактивных выбросах, а в случае разового время его существования лимитируется продолжительностью выброса. Геометрия излучения такого источника может быть рассмотрена как полубесконечное пространство с равномерно распределённой объёмной активностью.

• Надземная фитомасса растений. Источник излучения образуют радионуклиды выпадений, непосредственно осаждённые из атмосферы или поступившие по корневому пути. Геометрию излучения можно представить как бесконечный слой конечной толщины, равный высоте растений с равномерно распределённой активностью. При этом следует отметить динамичный характер изменения биометрических показателей растений (особенно однолетних) в течение вегетационного сезона и связанного с ним изменения активности в надземной фитомассе при задерживачастиц радиоактивных выпадений из нии атмосферы. Значение этого источника исключительно важно в формировании радиационной обстановки. В случае аварийных выпадений загрязнённая поверхность надземной фитомассы может создать мощный источник облучения, воздействуя прежде всего на точки роста, апикальные меристемы и репродуктивные органы, что приведёт к формированию широкого спектра радиационно-индуцируемых повреждений, вплоть до летальных [11, 12].

• Поверхностный слой почвы. Наличие данного источника излучения связано с осаждением радионуклидов на поверхность почвы, вследствие чего формируется облучение такой геометрии, которую можно представить в виде бесконечно протяжённого тонкого (0.5 см) слоя почвы, содержащего радионуклиды выпадений.

• Корнеобитаемый слой почвы. Данный источник ионизирующего излучения формируется

или по мере накопления радионуклидов в почве биогеоценозов по причине радиоактивных выбросов предыдущих лет и связан с их миграцией в вертикальном профиле почвы, или при перемешивании корнеобитаемого слоя вследствие агротехнических мероприятий. Геометрия источника излучения — бесконечно протяжённый слой почвы конечной толщины.

• Референтные животные. В качестве источника излучения животные обычно рассматриваются при оценке доз их собственного внутреннего облучения от накопленных радионуклидов [13]. Как правило, тело животных представляют в виде геометрических фигур с равномерно распределённой активностью.

Основные подходы к оценке доз в окружающей среде и референтных организмах. Расчёт мощности доз, полученных от различных источников ионизирующего излучения, может проводиться с применением инженерных методов путём интегрирования дозовой функции точечного источника или с применением компьютерных программ, реализующих теорию переноса излучений на основе метода Монте-Карло для заданных геометрий источника и приёмника излучения. Первая группа методов отличается меньшей трудоёмкостью, позволяет проводить расчёты в условиях динамически изменяющихся параметров детектора и источника излучения. Хотя точность результатов невысока, применение инженерных методов расчёта вполне оправданно при экспресс-оценках формирования радиационной обстановки в биогеоценозах и доз облучения биоты [24]. Дозовые оценки на основе метода Монте-Карло адекватно отражают процессы переноса излучения, позволяют учесть широкий спектр материалов и геометрий окружающей среды и источника излучения, получить достаточно точные величины мощности доз, но их отличают высокая трудоёмкость и большая длительность проведения расчётов, а также необходимость подробного описания каждой из геометрий источника и приёмника излучения.

Особенности формирования доз облучения в растительных и животных организмах. Наиболее простой подход к оценке доз облучения референтных организмов — их представление в виде геометрических фигур с равномерно распределённой активностью [13], при этом величина поглощённой дозы рассчитывается путём интегрирования по объёму фигуры. Однако для каждого референтного организма как приёмника излучения характерны свои особенности формирования доз.

Облучение растительных сообществ может происходить практически из всех вышеперечисленных источников, начиная с облака радиоактивных газов и аэрозолей. Исследуя формирование дозы облучения растений, можно пренебречь α-излучением, поскольку при внешнем облучении тяжёлые ядра гелия эффективно задерживаются поверхностными покровами надземной фитомассы растений, а вклад внутреннего облучения относительно мал в связи с низкими значениями параметров накопления α-излучающих радионуклидов [13]. При оценке полученных растением доз β- и γ-излучения особое внимание следует обратить на высоты расположения точек роста и репродуктивных органов. Отметим, что роль β-излучения в формировании дозы исключительно высока, особенно при поверхностном радиоактивном загрязнении надземной фитомассы вследствие аварийных выпадений [11, 12, 23]. Это связано с тем, что ряд радионуклидов в составе выпадений и образуемые из них дочерние радионуклиды, например ⁹⁰Sr+⁹⁰Y, ¹⁰⁶Ru+¹⁰⁶Rh, 132 Te $+^{132}$ I. 144 Ce $+^{144}$ Pr, характеризуются большой максимальной энергией В-излучения с величиной пробега, исчисляемой полутора десятком метров в воздухе и сантиметрами – в биологической ткани. Но внутри поверхностно загрязнённой надземной фитомассы растений будут формироваться поля не только β-, но и γ-излучения. Учёт их обоих крайне важен для оценок облучения репродуктивных органов растений, однако в существующей дозиметрической модели, в частности для сосны обыкновенной, они во внимание не принимаются [13]. Желательно, кроме того, введение поправочных коэффициентов на экранирование излучения поверхностными органами и тканями. Исследования, имитирующие ослабление излучения при его прохождении через поверхностные покровы точек роста или репродуктивных органов, свидетельствуют, что при этом мощность дозы β-излучения может понижаться от 2 до 5 раз [23, 24].

Облучение почвенной биоты возможно как от внешнего источника (облако выброса, пахотный и поверхностный слои почвы, надземная фитомасса растений), так и от внутреннего. В поверхностных слоях почвы могут формироваться значительные дозы облучения почвенной микро- и мезофауны от внешнего β-излучения, а по мере заглубления определяющая роль в поражении почвенных животных будет принадлежать внешнему у-излучению. Оценка внутреннего облучения должна проводиться по уровню α- и β-излучения, при этом содержание радионуклидов в животном организме можно принять равному удельной активности почвенных слоёв его обитания, а величину мощности дозы оценить исходя из предположений и допущений, рассмотренных выше.

Внешнее облучение наземных животных, в первую очередь млекопитающих, которые отличаются наибольшей радиочувствительностью,

целесообразно рассматривать как результат у-излучения радионуклидов атмосферного воздуха, поверхности надземной фитомассы растений, поверхностного и корнеобитаемого слоёв почвы. Расчёт мощности дозы желательно проводить в два этапа [24], определив на первом дозовый показатель в точке, где будет находиться животное, на втором — мощность среднепоглошённой дозы в его теле. Такая схема позволит избежать одновременного интегрирования по объёму источника и объёму тела животного. Внешнее облучение от β-излучающих радионуклидов в данном случае не повлияет значимо на суммарную дозу, за исключением случаев оценки воздействия на базальный слой кожи, поскольку подавляющая доля В-частиц будет задерживаться поверхностными покровами тела. Гораздо большую актуальность и определённую методологическую трудность представляют расчёты доз внутреннего облучения от α - и β -излучающих радионуклидов, что связано с несколькими причинами.

Во-первых, рекомендованные к использованию для оценок доз облучения референтных животных коэффициенты пересчёта основаны на квазиравновесном распределении радионуклидов в биогеоценозе и системе "корм-животное" [22], однако это распределение при аварийных радиоактивных выпадениях существенно отличается от квазиравновесного. Во-вторых, практически все коэффициенты дозового преобразования, рекомендуемые для оценки доз облучения животных, рассчитаны из условия равномерного распределения радионуклидов выпадений в организме, что не всегда соответствует действительности. При алиментарном пути поступления радионуклидов все они проходят через желудочно-кишечный тракт, однако далеко не все всасываются в кровь и распределяются в организме. Например, всасывание радиоактивных изотопов редкоземельных и трансурановых элементов не превышает долей процента от содержания в рационе [23], тем не менее при прохождении желудочнокишечного тракта они облучают его слизистую оболочку. К сожалению, работы по этим проблемам немногочисленны [25], хотя расчёт доз облучения желудочно-кишечного тракта животных исключительно важен для оценки последствий, особенно у растительноядных в первые недели и месяцы после аварийных выпадений. В-третьих, даже при квазиравновесном распределении радионуклидов в экосистеме и постоянной активности в рационе концентрация остеотропных радионуклидов (например, ⁹⁰Sr, ²²⁶Ra, Pu) продолжает возрастать в костной ткани на протяжении всего срока жизни животного. В-четвёртых, остаётся открытым вопрос о составе референтных животных при радиоэкологических исследованиях радиационного воздействия. Так, в биогеоценозах умеренных широт пресмыкающиеся, хотя они и

не обладают высокой радиочувствительностью, отличаются самыми высокими коэффициентами накопления радионуклидов. Относительно высоки они и у всеядных животных, например у некоторых видов мелких грызунов, дикой свиньи [27], при этом по уровню радиочувствительности они близки к человеку. Для хищных животных (ласка, хорёк, куница, рысь, волк), потребляющих мышечные ткани растительноядных, характерно возрастание накопления в организме равномерно распределённых радионуклидов (¹³⁷Cs). По этому показателю они могут опередить свои жертвы, причём при сопоставимых дозах внешнего облучения.

Из приведённых примеров следует вывод: в дозиметрии живых организмов остаётся ёще много невыясненных и неоднозначно трактуемых вопросов, которые требуют выработки единых подходов, научного обоснования и разработки модеформирования доз. В свою очередь, лей дозиметрические модели радиационной обстановки, внешнего и внутреннего облучения референтных организмов должны стать основой дозиметрической составляющей радиоэкологических оценок состояния окружающей среды. Исходными данными при дозиметрических оценках станут показатели динамики активности радионуклидов выпадений в основных средах, выходными показатели динамики мощности дозы облучения в реперных точках типичных биогеоценозов.

Оценка радиационного воздействия на природную среду аккумулирует в себе основные предшествующие результаты. Итоговая информация в геоинформационной системе должна быть представлена в виде электронных карт-схем по динамике:

• объёмной активности в атмосфере и плотности осаждений на земную поверхность каждого радионуклида выброса;

• активности радионуклидов в различных компонентах типичных биогеоценозов — на поверхности растений и почвы, в корнеобитаемом слое почвы, при корневом поступлении в надземную фитомассу, в органах и тканях референтных организмов;

 мощности дозы внешнего β- и γ-излучения от различных источников (атмосферный воздух, поверхностный слой надземной фитомассы и почвы, корнеобитаемый слой почвы);

• мощности дозы от внешнего и внутреннего излучения референтных организмов типичных биогеоценозов;

• вероятности возникновения радиационноиндуцируемых эффектов в референтных организмах, а также вероятности сукцессионных изменений в типичных биогеоценозах. * * *

Прогнозирование последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды – комплексная мультидисциплинарная научная проблема. Решение её требует привлечения специалистов из разных областей знания. Описание территории в компетенции географов, почвоведов, геоботаников, зоологов, лесоводов. Совместно с радиоэкологами они могут полготовить перечень типичных биогеоценозов с характерным для них составом флоры и фауны для прогнозных оценок накопления радионуклидов и связанных с ними доз облучения. Для уточнения параметров миграции радионуклидов в вертикальном профиле почвы и накопления в системе "корнеобитаемый слой почвы – надземная фитомасса растений" представляется целесообразным закладка сети пунктов постоянного наблюдения в типичных биогеоценозах на территории распространения радиоактивных выпадений. Объединённые усилия специалистов в области физиологии растений и животных, радиоэкологии и дозиметрии будут способствовать обоснованию и разработке дозиметрических моделей облучения растений и животных как в начальный период после аварийных выпадений, так и при хроническом поступлении радиоактивных веществ, пониманию закономерностей формирования полей излучения в биогеоценозах.

Нами рассмотрены подходы к оценке состояния только сухопутных биогеоценозов и пока не затронуты вопросы радиационного воздействия на водную биоту. Не менее важными представляются и разработка и обоснование основных положений и допущений вероятностного подхода при проведении оценок радиационного воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. *Алексахин Р.М.* Ядерная энергия и биосфера // М.: Энергоиздат, 1982.
- 2. *Aleksakhin R.M.* Radioecology of the 21st Century. Herald of the RAS. 2010. V. 2. Р. 165–172; *Алексахин Р.М.* Радиоэкология XXI века // Вестник РАН. 2010. № 4. С. 321–328.
- 3. Sources and effects of ionizing radiation: Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly with scientific annexes. V. 1. Sources. New York: United Nations, 2008.
- Тишков В.П., Степанов А.В., Гаврилов В.М. Содержание радионуклидов ⁸⁵Кг и Хе в атмосферном воздухе Северо-Западного региона России в 2006– 2008 гг. // Труды Радиевого института им. В.Г. Хлопина. 2011. Т. XV. С. 141–167.
- 5. Корсаков А.Т., Тертышник Э.Г. Криптон-85 в атмосфере // АНРИ. 2013. № 4(75). С. 19–27.
- Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территорий продуктами

деления урана / Под ред. А.И. Бурназяна. М.: Энергоатомиздат, 1990.

- Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры / Под общ. ред. Л.А. Ильина и В.А. Губанова. М.: ИздАТ, 2001.
- Sources and effects of ionizing radiation: Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation to the General Assembly. V. 1. Scientific Annex A: Levels and effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 great east-Japan earthquake and tsunami. New York: United Nations, 2014.
- 9. Панов А.В., Санжарова Н.И., Переволоцкий А.Н. и др. Анализ национальной системы нормативного и правового обеспечения радиационной безопасности населения и охраны окружающей среды вблизи объектов и территорий, загрязнённых техногенными и природными радионуклидами в результате прошлой деятельности // Радиация и риск. 2017. № 2. С. 107–121.
- Основные принципы оценки воздействия ионизирующего излучения на живые организмы за исключением человека. Публикация МКРЗ 91 / Пер. с англ. М.: Комтехпринт, 2004.
- Криволуцкий Д.А., Тихомиров Ф.А., Фёдоров Е.А. и др. Действие ионизирующей радиации на биогеоценоз. М.: Наука, 1988.
- 12. Козубов Г.М., Таскаев А.И. Радиобиологические исследования хвойных в районе Чернобыльской катастрофы (1986–2001 гг.). М.: ИПЦ "Дизайн. Информация. Картография", 2002.
- Защита окружающей среды: концепция и использование референтных животных и растений. Публикация МКРЗ 108 / Пер. с англ. М.: Академ-Принт, 2013.
- 14. Р 52.18.820-2015. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки // Обнинск: Росгидромет, НПО "Тайфун", 2015.
- 15. Shershakov V.M., Borodin R.V., Kosykh V.S. Radioecological analysis support system (Recass) // Radiation Protection Dosimetry. 1993. № 2–4. P. 181–184.
- 16. Арутюнян Р.В., Беликов В.В., Беликова Г.В. и др. Компьютерная система Нострадамус для поддержки принятия решений при аварийных выбросах на радиационно опасных объектах // Изв. РАН. Энергетика. 1995. № 4. С. 19–30.
- Методы расчёта распределения радиоактивных веществ в атмосфере и доз облучения населения. М.: НТД МХО, 1992.
- Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2018 г. Ежегодник. Обнинск: Росгидромет, НПО "Тайфун", 2019.
- 19. Переволоцкая Т.В., Переволоцкий А.Н., Спиридонов С.И. Кластерный анализ для оценки радиационного воздействия штатных выбросов АЭС на биоту // Радиация и риск. 2018. № 1. С. 43–52.
- 20. Переволоцкая Т.В., Переволоцкий А.Н. Математическая модель распределения радионуклидов в системе "надземная фитомасса растений — поверхность почвы" при хронических радиоактивных

ВЕСТНИК РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК том 90 № 6 2020

выпадениях в лесном биогеоценозе // Радиац. биология. Радиоэкология. 2020. № 2. С. 209–216.

- 21. Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В. Прогнозирование вертикального распределения ¹³⁷Сs и ⁹⁰Sr в лесных почвах Республики Беларусь // Радиац. биология. Радиоэкология. 2012. № 6. С. 625–635.
- 22. Environmental Protection: Transfer Parameters for Reference Animals and Plants. ICRP Publication 114, Ann. ICRP 39(6). 2009.
- Алексахин Р.М., Васильев А.В., Дикарёв В.Г. и др. Сельскохозяйственная радиоэкология / Под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнеева. М.: Экология, 1992.
- 24. Спирин Е.В. Метод расчёта доз облучения животных для оценки последствий загрязнения окружа-

ющей среды // Радиац. биология. Радиоэкология. 2009. № 5. С. 608–616.

- 25. Козьмин Г.В., Епимахов В.Г., Снегирёв А.С. Транспорт радиоактивных частиц в желудочно-кишечном тракте овец // Радиац. биология. Радиоэкология. 2018. № 3. С. 305–316.
- 26. Переволоцкий А.Н., Переволоцкая Т.В., Спиридонов С.И. Концептуальные положения дозиметрической модели облучения растений биогеоценозов при хронических радиоактивных выпадениях // Радиац. биология. Радиоэкология. 2019. № 1. С. 94–102.
- 27. Ильенко А.И., Крапивко Т.И. Экология животных в радиационном биогеоценозе. М.: Наука, 1989.