

**Р.М. Алексахин**

## **РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЯДЕРНОЙ АВАРИИ НА АЭС «ФУКУСИМА-1»**

**R.M. Alexakhin**

## **Radioecological Aspects of the Nuclear Accident at the “Fukushima-1” NPP**

### РЕФЕРАТ

Оценка действия на биоту ионизирующих излучений, источником которых являются поступившие в окружающую среду радионуклиды, является одной из центральных радиоэкологических задач в зоне аварии на АЭС «Фукусима-1» 11 марта 2011 г.

В регионе аварии на «Фукусима-1» выполнены две группы оценок возможного действия радиоактивного загрязнения на различные виды наземной биоты в первые два года после радиоактивных выпадений: 1) прямое экспериментальное исследование возможных эффектов облучения в натуральных условиях, 2) изучение действия ионизирующих излучений на основе использования моделей транспорта радионуклидов в окружающей среде и их накопления в растениях и животных, а также применения расчетной оценки мощностей поглощенных доз облучения с последующим сравнением с пороговыми (предельными) величинами этих параметров. Сделан вывод, что экологических сдвигов на уровне изменения наземных экосистем и нарушений внутренних популяционных взаимосвязей в них статистически достоверно и однозначно не выявлено даже при наиболее высоких плотностях загрязнения. У отдельных видов наземной биоты отмечались лишь незначительные изменения (в основном цитогенетического характера), элиминируемые на последующих этапах пострadiационного периода.

**Ключевые слова:** радиационные аварии, атомная электростанция, Фукусима-1, окружающая наземная среда, радиоактивное загрязнение, биота, облучение, моделирование

### ABSTRACT

The estimation of the effects on biota of ionizing radiation caused by environmental radionuclides is one of the key radioecological problems in the area of the “Fukushima-1” NPP accident on 11 March 2011.

In the “Fukushima-1” NPP accident area two groups of assessments of potential effects of radioactive contamination on different species of terrestrial biota in the first two years following radioactive fallout have been performed: 1) direct experimental study of possible radiation effects in natural conditions, 2) determination of ionizing radiation effects based on the use of models of radionuclide transport in the environment and their accumulation in plants and animals, as well as, the application of the absorbed dose rates estimations with their subsequent comparison to the threshold values for these parameters. The conclusion has been reached that no ecological shifts at the level of terrestrial ecosystem alterations and disturbances of interrelationships between populations have been statistically significantly and unambiguously revealed even at the highest densities of contamination. Some species of terrestrial biota showed only insignificant variations (mainly of a cytogenetic nature) eliminable at later stages of the post accidental period.

**Key words:** radiation accidents, nuclear power plant, Fukushima-1, terrestrial environment, radioactive contamination, biota, irradiation, modeling

### **Введение**

Научный комитет ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) является одной из международных организаций, которая наряду с МАГАТЭ, ВОЗ и МКРЗ проводит работу по анализу и обобщению итогов исследований по оценке последствий аварии и их ликвидации на АЭС «Фукусима-1» в Японии 11 марта 2011 г. (в основном радиоэкологические, медицинские и экологические аспекты). НКДАР ООН выпустил отчет [1], посвященный оценке уровней выпадений радионуклидов и доз облучения профессионалов, населения и биоты, связанных с этой аварией. В ряде разделов этого документа описываются радиоэкологические аспекты аварии.

Результаты натуральных исследований по действию на окружающую среду ионизирующих излучений, источником которых является находящиеся в зоне аварийного загрязнения радионуклиды, служат уникальной базой для изучения и понимания ответных

реакций живых организмов (биоты) на облучение в среде их обитания (на всех уровнях организации биологических явлений, включая высший – экосистемный). Целью настоящей статьи является описание итогов ряда радиоэкологических исследований, выполненных в регионе аварии на АЭС «Фукусима-1» и представленных в указанном отчете. Частично это сделано в сравнительном плане с крупнейшими радиационными авариями, приведшими к загрязнению окружающей среды, – Кыштымской (1957 г.) и на Чернобыльской АЭС (1986 г.) [2]. Такое сопоставление является обоснованным с учетом того, что аварии на ЧАЭС и АЭС «Фукусима-1» отнесены по классификации ядерных событий МАГАТЭ INES к 7-ой (наивысшей) категории опасности, а Кыштымская авария – к 6-ой категории.

Радиационная авария на АЭС «Фукусима-1», сопровождавшаяся выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду, привела к выпадению радиону-

клюдов на больших территориях. Двумя основными первичными депозитариями радиоактивных веществ стали атмосфера и океаническая среда. Ведущими дозобразующими радионуклидами для человека и биоты признаны  $^{131}\text{I}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , выброшенные количества этих радионуклидов равны соответственно 100–500 ПБк и 6–20 ПБк, что составляет 10 и 20 % соответственно от выбросов при аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. В ранние сроки после выпадений важную роль играл  $^{134}\text{Cs}$ .

Связанные с радиоактивным загрязнением природной среды радиоэкологические проблемы могут быть разделены на три группы: 1) миграция радионуклидов в различных компонентах окружающей среды и их накопление в живых организмах; 2) действие находящихся в среде обитания радиоактивных веществ на живые организмы и экосистемы (одновременно оцениваются дозы облучения биоты) и 3) прикладные аспекты реабилитации загрязненных угодий (проведение контрмер по ослаблению последствий облучения).

Экологическими исследованиями по оценке действия важнейших радионуклидов были охвачены площадь суши 7 тыс. км<sup>2</sup> и водная среда на удалении 30 км от АЭС «Фукусима-1».

В течении процессов, которые приводят или могут привести к изменениям у представителей биоты в зоне аварии на АЭС «Фукусима-1», было выделено два периода, которые определялись динамикой мощности дозы облучения и скоростями протекания восстановительных метаболических процессов у растений и животных. Первая фаза (названная промежуточной, intermediate) продолжалась 1–2 мес (в отечественной литературе эту фазу принято называть ранней). Вторая фаза определена как отдаленная (late) и охватывала период от нескольких месяцев до нескольких лет. В хронологии развития радиационных событий в окружающей среде в регионах Кыштымской и Чернобыльской аварий выделяют 3 периода – ранний (первые 1–2 года), промежуточный (до 8–10 лет) и отдаленный (более 10 лет). По-видимому, в зоне аварии на АЭС «Фукусима-1» еще предстоит выделить позднюю (действительно отдаленную) фазу.

### **Прямые наблюдения за действием облучения на биоту**

Выводы о действии радионуклидов, поступивших в окружающую среду при аварии на АЭС «Фукусима-1», на биоту, сформулированные в рецензируемом отчете, базируются на двух видах информации: 1) результаты непосредственных наблюдений за состоянием биоты в природных условиях и 2) расчеты мощностей поглощенных доз облучения биоты с по-

следующим сравнением этих данных с реперными (пороговыми, предельными) мощностями доз у растений и животных, установленными международными организациями (МКРЗ, МАГАТЭ, НКДАР ООН).

Экспериментально были оценены возможные изменения в популяциях диких растений и животных в наземной среде в 100-километровой зоне вокруг АЭС «Фукусима-1». Меллер и др. [3] в 2012 г. отметили снижение общего количества птиц различных видов в прямой зависимости от мощности AMBIENT-ного эквивалента дозы. Эти же авторы [4] изучили распределение численности ряда видов почвенных беспозвоночных и птиц в более чем 1 тыс. мест вблизи Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1». При этом хорошо выраженные эффекты облучения в зависимости от мощности AMBIENT-ного эквивалента дозы в регионе Чернобыльской аварии касались всех таксономических групп животных, а в области воздействия аварии на АЭС «Фукусима-1» заметное воздействие облучения выявлено только у 3 таксонов из 7 изученных.

Хияма и соавт. [5] оценили морфологические и генетические параметры травяной бабочки *Zizeeria maha*. В первый год после аварии (май 2011 г.) были обнаружены небольшие ранние аномалии, а более серьезные изменения найдены у самок в поколении F<sub>1</sub>, причем эти изменения были переданы по наследству в поколение F<sub>2</sub>; у более взрослых фаз бабочек нарушение проявилось более рельефно. Сделаны выводы о причинно-коррелятивной зависимости этих изменений от дозы облучения, а наблюдавшиеся нарушения при пролонгированном воздействии могли привести к аномалиям на популяционном уровне.

В отношении результатов вышеизложенных радиоэкологических исследований по изучению радиационных эффектов у указанных живых организмов НКДАР ООН указал на неопределенность выводов, принимая во внимание трудности в дозиметрии и возможное влияние сопутствующих факторов в природных условиях (в том числе, разрушающая роль цунами). Это исключает возможность прийти к надежному заключению. Более того, как показано в [5], для достижения того же уровня радиационного поражения у живых организмов в лабораторных условиях требуется воздействие в существенно больших дозах облучения, чем в тех дозах, которые оценены для полевых условий.

Более того, собранная в настоящее время информация о радиационных эффектах у дикой флоры и фауны [6] не дает основания для оценки выводов как корректных в описанных экспериментах.

## Расчетные методы оценки последствий облучения биоты

Как уже указано выше, вторую группу оценок действия радиоактивных выпадений на окружающую среду (биоту) составило изучение эффектов облучения у растений и животных по расчету мощности доз облучения с использованием реперных (пороговых, предельных) мощностей доз, установленных международными организациями – МКРЗ, МАГАТЭ, НКДАР ООН. В условиях ограниченного объема данных по непосредственной оценке последствий облучения биоты в природных условиях, эта компонента информации приобретает особое значение. Следует отметить, что использование идей моделирования транспорта радионуклидов по трофическим цепочкам и оценок доз облучения биоты стали разрабатываться лишь в последние 10–15 лет и не могли быть применены при оценке последствий воздействия ионизирующих излучений на биоту в Кыштымской и Чернобыльской авариях.

Значительное внимание в рецензируемом отчете уделено изложению методологических аспектов оценки доз облучения биоты. Применение математических статических (равновесных) и динамических моделей транспорта радионуклидов по трофическим цепочкам, описанных в документах МАГАТЭ, МКРЗ и НКДАР ООН [7–9], позволило существенно уточнить понимание процессов миграции радионуклидов в загрязненной природной среде в зоне аварии на АЭС «Фукусима-1» и выполнить уточненные прогнозы действия облучения на биоту. Особое значение имело использование банков данных и методологий, описанных в международных проектах ERICA и PROTECT. В качестве основных параметров радиационных изменений у биоты традиционно использовались смертность, заболеваемость, ослабление воспроизводства и уменьшение плодовитости, а также количество хромосомных aberrаций у представителей биоты. Основными элементами в программе расчета мощностей доз облучения были: 1) выбор ключевых дозообразующих радионуклидов, 2) измерение их концентраций в биоте (желательно в динамике), 3) применение равновесных моделей транспорта радионуклидов, 4) использование динамических моделей миграции радионуклидов и 5) проведение расчетов мощностей доз облучения с применением дозовых коэффициентов преобразования (Бк/Гр (Зв)). В качестве референсных видов использовались традиционно принятые в НКДАР ООН и МКРЗ представители биоты [7, 9]. Расчеты доз внутреннего облучения сделаны для  $^{131}\text{I}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

По оценкам НКДАР ООН, приведенным в отчетах 1996 и 2008 г. [8, 9], хроническое облучение с мощностью дозы менее 100 мкГр/ч даже при воз-

действии на наиболее радиочувствительные виды в широком наборе экосистем не должно приводить к видимым изменениям на биогеоценотическом уровне с нарушением популяционных взаимосвязей в наземной среде. Для сравнения можно отметить, что применительно к гидробионтам, минимальные мощности дозы, ведущие к ранним радиационным изменениям, составляли более 400 мкГр/ч.

При использовании равновесных моделей миграции радионуклидов в окружающей среде и данных по концентрации радионуклидов в животных в июне 2011 г. в 100-километровой зоне АЭС «Фукусима-1» было показано, что взвешенные мощности поглощенной дозы (в основном от  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ ) для стада диких кабанов колебались в пределах 0,8–1,1 мкГр/ч (табл. 1). Отмечена относительно большая вариабельность расчетных среднеарифметических данных по концентрации  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в различных представителях биоты, причем рассчитанные мощности дозы оказались примерно в 10 раз больше, чем от природных радионуклидов [10]. Сравнение расчетных мощностей доз с аналогичными реперными показателями (отношение равно 0,28–0,55) показывает, что последствия облучения для этих видов биоты незначительны.

Таблица 1  
**Расчетные взвешенные мощности поглощенной дозы облучения в июне 2011 г. для разных наземных позвоночных в 100-километровой зоне АЭС «Фукусима-1»**

Референсный организм	95 %-ный перцентиль мощности дозы, мкГр/ч	Отношение к реперной мощности дозы
Дикий кабан	1,1 (стадо) 2,2 (г. Корияма)	0,28 0,55
Олень	1,3 (г. Корияма)	0,33
Азиатский черный медведь	1,2 (г. Корияма)	0,30
Птицы	1,5 (г. Корияма)	0,38

В отдаленную фазу аварии (июнь 2011 г.) мощность дозы облучения наземных млекопитающих и птиц на территориях в широком интервале плотностей загрязнения  $^{137}\text{Cs}$  варьировала от 1,2 до 2,2 мкГр/ч. У роющих представителей почвенной мезофауны в районах с максимальными плотностями загрязнения мощности дозы облучения достигали 300 мкГр/ч в раннюю фазу аварии. В небольшие периоды времени в эту фазу аварии (часы–дни) присутствие короткоживущих радионуклидов (таких как  $^{132}\text{Te}$  и  $^{132}\text{I}$ ) обусловило формирование воздействия с мощностью дозы до 1 мГр/ч для некоторых представителей живой природы.

При приведенных выше мощностях дозы облучения у диких растений и животных едва ли могут быть выявлены наблюдаемые эффекты на популяционном

уровне или последствия облучения у биоты будут проходящими, так как значимое радиационное повреждение у живых организмов проявляется при превышении реперной величины 100 мкГр/ч [9].

В целом потенциальный риск на уровне отдельных организмов, особенно у млекопитающих, на территории с максимальным уровнем радиоактивных выпадений не исключен, но видимое радиационное поражение наземной флоры и фауны едва ли возможно. Тем не менее, некоторые незначительные изменения реперных видов биоты полностью исключить нельзя, однако лишь в позднюю фазу аварии и при максимальной плотности радиоактивного загрязнения. Статистически надежной отрицательной корреляции между мощностью дозы и радиационными эффектами у представителей биоты не было выявлено.

Для одного из районов с очень высокими плотностями выпадений – вблизи города Окума – были рассчитаны мощности поглощенных доз реперными (по классификации МКРЗ) представителями биоты (табл. 2). Максимальные взвешенные мощности доз были отмечены у травоядных (олений) – до 71 мкГр/ч (несмотря на недостаток данных по накоплению радионуклидов у этих организмов и дозиметрии). Меньшие мощности дозы характеризовали растительность – 17–26 мкГр/ч. Для крупных животных мощность дозы колебалась от 13 до 26 мкГр/ч, при этом основной вклад в дозу вносили  $^{134}\text{Cs}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Как видно из сравнения этих расчетных мощностей доз с пороговыми (предельными) значениями, предложенными в программе ERICA и документах НКДАР ООН и МКРЗ, нельзя исключить небольших радиационных эффектов (цитогенетика, воспроизводство) у некоторых представителей биоты (олень, крыса, сосна). Если реконструировать описанные мощности дозы на первые дни аварии (15 марта 2011 г. – период максимальных выпадений), наибольшие мощности дозы у роющих почвенных животных достигали 290 мкГр/ч (дождевые черви) и 33 мкГр/ч (крысы-землеройки). У оленей и травоядных млекопитающих мощность дозы достигала 240 мкГр/ч, причем внутреннее об-

лучение ( $^{131}\text{I}$ ) играло ведущую роль; у остальной биоты основное значение имело внешнее облучение: у сосны мощность дозы составляла 110 мкГр/ч, а у травянистой растительности – 130 мкГр/ч. Если учесть действие короткоживущих радионуклидов (например,  $^{132}\text{Te}$ ,  $^{132}\text{I}$ ), то расчетные мощности дозы в самые первые дни у роющих почвенных животных могли равняться 1000 мкГр/ч (в основном, внешнее облучение).

Присутствие в выпадениях  $^{131}\text{I}$ , ответственного за 95 % дозы, привело к мощностям доз облучения в первое время выпадений у травянистых растений 5,6 мГр/ч (рисунок), у оленей и травоядных млекопитающих – 370 мкГр/ч, у деревьев (сосна) – мощности доз изначально были существенно ниже, но уменьшались медленнее.

Как видно, по ряду биомаркеров, эффекты, которые могут возникать под влиянием облучения и касаться потери функций, затрагивающих популяционную стабильность, вряд ли могут быть исключены, особенно у млекопитающих [11]. Однако при более осторожных предположениях выясняется, что нужно в условиях аварии на АЭС «Фукусима-1» хроническое облучение со средней мощностью дозы около 1 мГр/ч продолжительностью 375 и 40 дней (соответственно для почвенных беспозвоночных и землероющих млекопитающих), чтобы проявились эффекты острого облучения (данные по результатам чернобыльских исследований [9]). По пороговым параметрам из программы ERICA для достижения критической дозы 1,8 Гр нужно облучение длительностью около 75 дней [9]. Эти выводы свидетельствуют о том, что острые эффекты у биоты в течение первых двух недель после аварии едва ли могли проявиться, даже если взвешенные средние мощности дозы 1 мГр/ч имели место в течение очень короткого времени (несколько часов – несколько дней). Эти выводы подтверждались отсутствием полевых данных, которые бы свидетельствовали о наличии изменений лучевой этиологии у представителей биоты. Тем не менее, хотя сведения о прямом действии облучения на биоту и не получены,

Таблица 2

**Расчетные взвешенные мощности поглощенной дозы облучения у референсных организмов в зоне с относительно высокими плотностями загрязнения (г. Окума)**

Референсный организм	Расчетная мощность дозы, мкГр/ч	Реперная (допустимая пороговая) мощность дозы, мкГр/ч	Отношение расчетной к реперной величинам
Пчела	18	400	0,04
Олень	71	4	17,8
Утка	21	4	5,3
Дождевой червь	46	400	0,11
Лягушка	18	40	0,45
Сосна	17	4	4,3
Крыса	46	4	11,5
Дикие травянистые растения	26	40	0,65

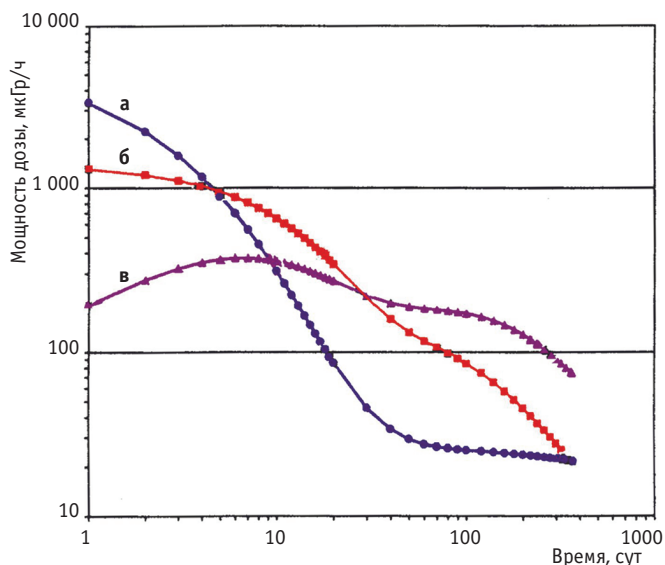


Рис. Расчетные взвешенные мощности поглощенной дозы как функция от времени (а — травянистая или кустарниковая растительность, б — деревья, в — олени) при условии, что основное выпадение радионуклидов произошло 15 марта 2011 г.

это еще не может быть основанием для однозначного утверждения об отсутствии эффектов у растений и животных.

У растений кумулятивные дозы облучения за 30-дневный период после аварии на АЭС «Фукусима-1» рассчитаны равными приблизительно 0,5 Гр, что составляет лишь 10 % от максимальной дозы, которая еще не приводила к радиационному поражению растений в Чернобыльской зоне [9]. У млекопитающих эта доза была равна 0,2 Гр — это примерно половина максимальной дозы, которая еще не вела к радиационному повреждению при аварии на ЧАЭС.

Гарнье-Леплейс и др. [12, 13] рассчитали мощности доз облучения в течение первых трех недель после аварийного выброса радионуклидов (ранний период) для ряда выбранных живых организмов. Суммарная мощность дозы (внешнее и внутреннее облучение) колебалась для наземных растений и животных от 2 мГр/сут (птицы) до 6 мГр/сут (мелкие млекопитающие) для группы избранных радионуклидов. При этих параметрах радиационного поля весьма вероятно появление цитогенетических эффектов, однако функции воспроизводства у хвойных (древесных) растений и беспозвоночных почвенных животных едва ли могли измениться, учитывая высокую природную вариабельность этих представителей биоты. Радиэкологическая ситуация в морской среде вблизи места аварии и аварийного сброса радионуклидов была более напряженной, чем в наземной среде (для гидробионтов максимальные мощности доз состав-

ляли 210–4600 мГр/сут). При указанных уровнях облучения прогнозируются не только выраженные повреждения в генеративных функциях гидробионтов, но и не исключалась гибель наиболее радиочувствительных видов.

### Заключение

Результаты изучаемого возможного влияния повышенного содержания аварийных радионуклидов в окружающей среде на растения и животных в регионах, подверженных влиянию аварии на АЭС «Фукусима-1», на фоне воздействия большого числа природных и техногенных (в том числе цунами) экологических факторов и с учетом трудностей в оценке мощностей доз облучения не дают возможности в настоящее время сделать статистически надежные выводы о наличии признаков изменений у растений и животных радиационной этиологии. Более того, есть некоторые основания для утверждения об отсутствии связанных с облучением видимых изменений в наземных экосистемах и благоприятного в экологическом плане течения процессов в зоне воздействия аварии.

На основании комплекса радиэкологических исследований в регионе аварии на АЭС «Фукусима-1» в качестве общих выводов констатировалось, что дозы облучения наземной биоты были слишком малы, чтобы могли проявляться значимые эффекты острого облучения. При этом, однако, нельзя полностью исключить крайние случаи, когда действие ионизирующих излучений могло привести к проявлению видимых признаков радиационных изменений, что могло быть следствием комбинированного действия ионизирующего излучения и других природных и техногенных факторов.

При продолжительном облучении у некоторых наземных организмов, особенно у млекопитающих, как наиболее чувствительных среди различных таксономических групп животных к действию ионизирующих излучений, могут быть отмечены некоторые изменения, при этом их значимость для возможных популяционных сдвигов остается неясной. Если и можно ожидать каких-либо радиационных изменений у представителей живой природы, то они могут быть приурочены только к областям с максимальным уровнем загрязнения; вне этих зон значение этих эффектов несущественно.

Одновременно подчеркивается необходимость проведения дальнейших исследований в области изучения действия радиоактивного загрязнения на биоту в регионе аварии на АЭС «Фукусима-1».

## Выводы

Как отмечается с достаточной степенью надежности, в целом в зоне радиационного воздействия аварийного выброса на АЭС «Фукусима-1» у наземной биоты по результатам натуральных наблюдений не регистрировались, а на основе модельных построений (расчетов) не прогнозировались радиационные поражения на экосистемном уровне с нарушением популяционных связей внутри подверженных воздействию аварии биогеоценозах в течение первых двух лет после аварии.

Этим последствия радиационной аварии на АЭС «Фукусима-1» существенным образом отличаются от Кыштымской аварии (1957 г.) и аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.), где в ближней зоне (до 30 км) были обнаружены у наземной биоты выраженные эффекты лучевой этиологии вплоть до полного разрушения отдельных экосистем (например, хвойные леса) и гибели наиболее радиочувствительных таксонов живых организмов (например, млекопитающих).

В регионе аварии на АЭС «Фукусима-1» изменения у представителей наземной биоты в течение раннего периода (1–2 года) после радиоактивных выпадений ограничиваются незначительными нарушениями на уровне отдельных организмов (прежде всего цитогенетические аномалии). Следует указать на трудности в оценке радиационных эффектов у биоты в среде ее естественного обитания из-за влияния на живые организмы большого числа факторов и их вариабельности. Тем не менее, несмотря на эти трудности, отсутствие видимых признаков лучевых изменений у наземной биоты в раннюю фазу аварии дает основание для благоприятного прогноза по течению процессов, определяющих радиоэкологические параметры наземной среды в будущем. Результаты многолетних натуральных радиоэкологических исследований (около 60 лет в регионе Кыштымской аварии и примерно 30 лет в зоне аварии на Чернобыльской АЭС) свидетельствуют об интенсивных репарационных процессах в районах даже с высокими плотностями загрязнения и значительном восстановительном потенциале природных экосистем, в том числе с генетической точки зрения. Отмечается необходимость выполнения дальнейших радиоэкологических исследований в зоне аварии на АЭС «Фукусима-1».

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. UNSCEAR. Report. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. UNSCEAR Report 2013. Volume 1. Report to the General Assembly. Scientific Annex A: Levels and Effects of Radiation Exposure due to the Nuclear Accident after 2011 Great East–Japan Earthquake and Tsunami. United Nations, New York, 2014.
2. *Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А. и соавт.* Радиационные аварии: последствия и защитные меры. Под ред. *Л.А. Ильина и В.А. Губанова.* – М.: ИздАТ, 2001, 752 с.
3. *Möller A.P., Hagiwara A., Matsui S. et al.* Abundance of birds in Fukushima judged from Chernobyl. // *Environ. Pollution*, 2012, **164**, P. 36–39.
4. *Möller A.P., Nishimi I., Suzuki H. et al.* Differences in effects of radiation on abundance of animals in Fukushima and Chernobyl. // *Ecol. Indicators*, 2013, **24**, P. 75–81.
5. *Hiyama A., Nohara C., Kinjo S. et al.* The biological impacts of the Fukushima nuclear accident on the pale grass blue butterfly. // *Sci. Rep.*, 2012, **2**, P. 570.
6. *Andersson P., Garnier-Laplace J., Beresford N.A. et al.* Protection of the environment from ionizing radiation in a regulatory context (PROTECT): proposed numerical benchmark values. // *J. Environ. Radioact.*, 2009, **100**, No. 12, P. 1100–1108.
7. ICRP. Environmental protection. The concept and use of reference animals and plants. ICRP Publication 108. // *Annals ICRP*, **38**, 2008.
8. UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. UNSCEAR 1996 Report. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 1996 Report to the General Assembly, with Scientific annex, United Nations, New York, 1996.
9. UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Volume II: Effects. Scientific Annexes C, D and E. UNSCEAR 2008 Report. United Nations, New York, 2011.
10. *Beresford N.A., Barnett C.I., Jones D.G. et al.* Background exposure rates of terrestrial wildlife in England and Wales. // *J. Environ. Radioact.*, 2008, **99**, No. 9, P. 1430–1439.
11. *Geras'kin S.A., Fesenko S.V., Alexakhin R.M.* Effects of non-human species irradiation after the Chernobyl NPP accident. // *Environ. Int.*, 2008, **34**, No. 6, P. 880–897.
12. *Garnier-Laplace J., Copplestone D., Gilbin R. et al.* Issues and practices in the use of effects data from FREDERICA in the ERICA Integrated Approach. // *J. Environ. Radioact.*, 2008, **99**, P. 1474–1483.
13. *Garnier-Laplace J., Beaugin-Seiller K., Hinton T.G.* Fukushima wildlife dose reconstruction signals ecological consequences. // *Environ. Sci. Techinol*, 2011, **45**, No. 12, P. 5077–5078.

Поступила: 16.04.2015

Принята к публикации: 23.06.2015