

УДК 621.039.5:574

## РАНЖИРОВАНИЕ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПРИРОДНУЮ СРЕДУ

© 2020 г. С. И. Спиридонов<sup>1,\*</sup>, Р. А. Микаилова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии, Обнинск, Россия*

*\*E-mail: spiridonov.si@gmail.com*

Поступила в редакцию 22.10.2019 г.

После доработки 27.03.2020 г.

Принята к публикации 11.06.2020 г.

Представлен методический подход к сравнительной оценке реакторных установок и других ядерно-энергетических объектов с точки зрения потенциального воздействия аварийных выбросов на природную среду. Подход основан на расчете радиоэкологического риска с учетом вероятностей реализации постулируемых аварий и параметров радиоактивных выбросов для совокупности аварийных сценариев. В качестве референтного природного сообщества рассматривается древесный ярус соснового леса. Для характеристики последствий радиоактивных выпадений применен индекс радиационного воздействия. Рассчитаны значения риска для ряда российских (ВВЭР-1000, ВВЭР-1200) и зарубежных (PWR-890, BWR-1412, EPR-1600) реакторных установок и выполнено их радиоэкологическое ранжирование. Установлено, что наиболее безопасным для биоты является реактор нового поколения ВВЭР-1200.

**Ключевые слова:** реакторные установки, природная среда, аварийные сценарии, радиоэкологическая оценка, дозы облучения, древесный ярус леса

**DOI:** 10.31857/S0869803120050082

В настоящее время в мире эксплуатируется свыше 450 реакторных установок различного типа и строится 55 реакторов [1]. При формировании стратегий развития ядерной энергетики большое внимание уделяется разработке новых технологий и выбору оптимальных технологических решений. В качестве основного критерия выбора рассматривается удельная стоимость электроэнергии, вырабатываемая одним энергоблоком [2]. Этот экономический показатель используется для подтверждения конкурентоспособности ядерной энергетики в сравнении с альтернативными способами производства энергии. Кроме экономических оценок, неотъемлемой составляющей комплекса работ по созданию атомных станций является обоснование их радиационной и экологической безопасности [3]. Более того, при выработке направлений развития ядерной энергетики необходимо учитывать результаты интегральной радиоэкологической оценки ядерно-энергетических систем [4].

При условии соблюдения радиационных нормативов и квот на облучение населения штатное функционирование АЭС является, согласно современным представлениям, безопасным для населения и биоты [5, 6]. В то же время реакторные

установки и другие объекты ядерного топливного цикла являются потенциальными источниками радиоактивных выбросов в случае нештатных и аварийных ситуаций. По данным МЧС России, за период развития ядерной энергетики, кроме крупных радиационных аварий (Чернобыльская АЭС, японская АЭС “Фукусима” и т.д.), зарегистрировано около 300 радиационных инцидентов и аварий. Большинство из них не привело к поступлению радионуклидов в окружающую среду и не повлияло на радиационную обстановку в глобальном плане. Тем не менее существует вероятность аварий различной степени тяжести, оцениваемая очень малыми величинами. Согласно классификации МАГАТЭ, радиационные аварии выделяются в отдельную группу, наряду с плановыми и существующими радиоэкологическими ситуациями [7].

Полновесное обоснование экологической безопасности АЭС на этапе их планирования и разработки включает оценку последствий постулируемых аварий [8, 9]. При выполнении таких оценок необходимо уделять серьезное внимание не только человеку, но и биоте. В документах авторитетных международных организаций говорится о необходимости подтверждать, а не исходить

из предположения о защищенности окружающей среды [7]. Российский федеральный закон “Об охране окружающей среды” № 7 ФЗ от 10.01.2002 (с изменениями, вступившими в силу 01.01.2013) включает положение об обеспечении устойчивого функционирования экосистем при проектировании объектов использования атомной энергии.

Цель работы, результаты которой изложены в настоящей статье, — разработка и апробация подхода к сравнительной радиоэкологической оценке ядерно-энергетических объектов с точки зрения потенциального воздействия аварийных выбросов на биоту.

## МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

### *Аварийные сценарии и период оценки*

На этапе планирования АЭС и других объектов ядерной энергетики, являющихся потенциальными источниками радиоактивных выбросов, разрабатываются сценарии проектных и запроектных аварий. Совокупность сценариев может охватывать аварии различной степени тяжести, в том числе и крупные, согласно международной классификации. Так, для АЭС с реактором с водой под давлением PWR мощностью 890 МВт (АЭС “Сарри”, США), кипящим водяным реактором BWR, мощностью 1412 МВт (АЭС “Пич-Боттом”, США) описаны ситуации, которые можно охарактеризовать как аварии 7-го уровня по шкале INES [10, 11]. Крупные аварии такого же уровня рассматриваются для реактора под давлением третьего поколения EPR мощностью 1600 МВт (АЭС “Хинкли”, Великобритания), находящегося на стадии строительства [12]. При разработке аварийных сценариев в качестве исходных событий рассматривались сейсмические воздействия, падение самолета, ударные волны и т.д.

В результате аварийных выбросов природные экосистемы подвергаются в начальный период острому радиационному воздействию, а в дальнейшем — хроническому облучению. Следует отметить важность оценок для первого послеаварийного периода, поскольку острое радиационное воздействие может вызвать серьезное нарушение природных сообществ. Изменение структуры и функционирования экосистем происходит не только в результате прямого действия радиационного фактора, но и вследствие совокупности вторичных пострадиационных эффектов и восстановительных процессов [13, 14].

### *Референтное природное сообщество*

Среди природных объектов наиболее уязвимыми по отношению к радиоактивному загрязнению являются лесные экосистемы вследствие высокой радиочувствительности древесных расте-

ний (особенно хвойных), их повышенной способности задерживать поступающие из атмосферы радионуклиды и медленно самоочищаться от них [15, 16]. При тяжелых радиационных авариях именно лесные экосистемы подвергались сильному лучевому поражению [17]. Так, после аварии на Чернобыльской АЭС площадь полностью пораженных сосновых лесов составила 500–600 га [18]. На территории Восточно-Уральского радиоактивного следа, сформировавшегося в результате Кыштымской аварии в 1957 г., к осени 1959 г. сосна полностью погибла на участках площадью 2000 га [17, 19].

Ценообразующим сообществом является древесный ярус, при поражении которого нарушаются структура и функционирование лесной экосистемы в целом [13, 17, 20]. Таким образом, для оценки острого радиационного воздействия на биоту в качестве референтного природного сообщества выбрано хвойное (сосновое) насаждение. Немаловажным обстоятельством в пользу такого выбора является наличие данных для параметризации расчетных моделей, полученных в ходе масштабных исследований в области лесной радиоэкологии после Кыштымской и Чернобыльской аварий.

По рекомендации МКРЗ сосновые деревья входят в состав шести референтных организмов, характеризующих наземные экосистемы [21, 22]. Необходимо подчеркнуть различие понятий “референтная сосна” и “референтное сосновое насаждение”. В первом случае для соснового дерева, представленного в виде эллипсоида с определенными размерами, рассчитаны значения дозовых коэффициентов для внутреннего облучения от радионуклидов, содержащихся в пределах условного эллипсоида [21]. В качестве источника внешнего облучения рассматривается верхний слой почвы, содержащий радионуклиды. Такой подход не отражает специфику первого периода после радиоактивных выпадений, в течение которого основная дозовая нагрузка формируется радионуклидами (прежде всего короткоживущими), осевшими на кроны древесных растений. Выделение референтного соснового насаждения с определенными характеристиками позволяет описать процессы миграции радионуклидов в системе “атмосфера — полог леса — поверхность почвы”. В результате можно рассчитать динамику дозовой нагрузки на древесный ярус в первый послеаварийный период и оценить острое радиационное воздействие на сообщество древесных растений [23].

### *Подход к оценке радиоэкологического аварийного риска*

Каждый ядерно-энергетический объект, как источник потенциального воздействия на природную среду, можно охарактеризовать двумя ти-



**Рис 1.** Общая схема консервативной оценки аварийного риска воздействия реакторной установки на природную среду.

**Fig. 1.** General scheme of a conservative emergency risk assessment of the impact of a reactor facility on the environment.

пами показателей – вероятностями постулируемых (проектных и запроектных) аварий и характеристиками последствий радиоактивных выбросов для референтного природного сообщества. В глоссарии МАГАТЭ, содержащем определения основных понятий в области ядерной безопасности и радиационной защиты, аварийный риск определяется следующим образом [24]:

$$R = \sum_i p_i C_i,$$

где  $p_i$  – вероятность реализации  $i$ -го аварийного сценария,  $C_i$  – характеристика последствий реализации  $i$ -го аварийного сценария.

В качестве характеристики последствий аварии ( $C$ ) можно рассматривать различные показатели с возможным учетом неопределенностей их оценки. Как отмечено в [24], неопределенности могут быть представлены как составляющие величины  $C$  или в виде вариабельности итогового показателя  $R$ .

В работе [25] выполнено сопоставление радиоэкологических аварийных показателей для трех реакторов различного типа. При проведении оценок выбраны единичные, тяжелые аварийные сценарии для каждого реактора без учета вероятностей их реализации. Выполнено радиоэкологическое ранжирование сценариев на основе двух методических подходов:

– “точечная” консервативная оценка индекса радиационного воздействия ( $RIF$ ) на природное сообщество – древесный ярус соснового леса [26];

– расчет показателя, учитывающего пространственное распределение выпадений и соответственно вариабельность дозовых нагрузок на древесный ярус.

При различии в количественных оценках качественные результаты радиоэкологического ранжирования аварийных сценариев, полученные двумя методами, совпадают [25]. Таким образом, для скрининговой сравнительной оценки ядерно-энергетических объектов как источников потенциального радиационного воздействия на биоту можно использовать консервативный подход. В этом случае характеристикой последствий реализации аварийного сценария ( $C$ ) будет являться индекс радиационного воздействия, равный отношению максимальной дозовой нагрузки на референтное природное сообщество к дозовому пределу. Общая схема подхода к оценке радиоэкологического аварийного риска для реакторной установки приведена на рис. 1.

#### Дозовый критерий

Для оценки индекса радиационного воздействия необходимо установить дозовый предел для референтного природного объекта. Следует подчеркнуть, что рекомендуемый МКРЗ пороговый уровень мощности дозы хронического облучения

1 мГр/сут [21] не пригоден для оценки последствий острого облучения. Это связано со значительным снижением мощности дозы в течение первого годичного периода после аварийного выброса [23]. Поскольку дозовые нагрузки при тяжелых аварийных сценариях могут вызвать гибель деревьев сосны, в качестве дозового предела целесообразно рассматривать летальную дозу.

Согласно данным, полученным в крупномасштабном эксперименте “Экос” по острому облучению леса [13], значения  $LD_{50}$  и  $LD_{100}$  для сосны составляют 38 и 100 Гр соответственно [20]. Следует подчеркнуть, что в условиях контролируемого эксперимента “Экос” проведено экспериментальное измерение дозовой нагрузки на древесные растения. При анализе экологических последствий радиоактивных выпадений в результате аварии на Чернобыльской АЭС гибель сосновых насаждений зафиксирована при дозе выше 60 Гр. [27]. Как отмечено в монографии [28], деревья в ближней зоне ЧАЭС погибали при дозе от 15 до 100 Гр. Таким образом, на основе данных [13, 20] и не противоречащей им информации [27, 28] значение дозы, приводящей к полной гибели сосны при остром облучении, принято равным 100 Гр.

## РАСЧЕТНЫЙ ИНСТРУМЕНТАРИЙ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

### *Модели и параметры*

Дозовые нагрузки на древесные растения оценивали с использованием совокупности миграционных и дозиметрических моделей [23]. Перенос радионуклидов в атмосфере рассчитывали на основе гауссовой модели. Метеорологические параметры устанавливали по результатам обработки большого массива метеоданных (более 8 тыс. записей) в рамках проекта МАГАТЭ INPRO ENV-PE [29]. Согласно этим данным, наиболее встречающаяся категория атмосферы – F, скорость ветра – 0.5 м/с. При моделировании процессов перераспределения радионуклидов в лесной экосистеме учитывали их первоначальное задержание кронами деревьев, экологическое очищение полога леса и радиоактивный распад [23]. Значение коэффициента задерживания радионуклидов (для плотно сомкнутых насаждений) принято равным 0.9 [30]; величина константы экологического очищения полога леса составила  $7.7 \times 10^{-3} \text{ сут}^{-1}$  [15].

Дозовые нагрузки на кроны древесных растений рассчитывали от двух источников ионизирующего излучения – радионуклиды в пологе леса (толстый бесконечный источник) и на поверхности почвы (тонкий бесконечный источник) [23]. При параметризации моделей толщина слоя “кроны древесных растений” принята равной 10 м, плотность воздушно-растительной смеси –

2.4 кг/м<sup>3</sup> [23]. Кроме дозовых нагрузок от радионуклидов, распределенных в системе “древесные растения – поверхность почвы”, оценены дозы кратковременного облучения древесного яруса от ИРГ в составе радиоактивного облака, согласно методике [31].

В результате применения миграционно-дозиметрических моделей получены значения обобщенных дозовых коэффициентов, позволяющих оценить годовую дозовую нагрузку на древесные растения от каждого радионуклида, поступающего в атмосферу в результате аварии. В рамках консервативной оценки выбраны максимальные величины этих показателей для территории радиоактивного следа. Расчеты показали, что для аварий с малой высотой выброса наибольшая плотность выпадений может быть зафиксирована на промплощадке. При таких сценариях максимальная доза облучения референтного природного сообщества формируется на границе промплощадки.

В табл. 1 приведены значения обобщенных дозовых коэффициентов для основных дозообразующих радионуклидов с единичной активностью в составе аварийных выбросов с высотами 10 и 40 м. Значения, представленные в табл. 1, рассчитаны для фиксированных метеоусловий (категория атмосферы – F, скорость ветра – 0.5 м/с), с учетом характеристик референтного природного сообщества.

### *Характеристики аварийных сценариев*

Для апробации подхода к сравнительной оценке ядерно-энергетических объектов с точки зрения потенциального радиационного воздействия на биоту использованы данные, характеризующие постулированные аварии на реакторных установках различного типа. Рассмотрены аварийные сценарии, разработанные для зарубежных реакторов PWR-890, BWR-1412, EPR-1600 и российских реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200. Основные характеристики сценариев (суммарная выбрасываемая активность, высота выброса и вероятность аварии) представлены в табл. 2. Активности отдельных радионуклидов в составе выбросов приведены в [10–12, 32, 33]. Анализ “входной” для радиоэкологических расчетов информации показывает, что параметры аварийных выбросов рассматриваемых реакторных установок существенным образом различаются. Это касается как активностей выбрасываемых в атмосферу радионуклидов и высот выбросов, так и вероятностей аварийных событий. Содержательный анализ процессов, формирующих столь различные характеристики аварийных выбросов, представляет собой важную задачу “не радиоэкологического” плана.

**РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЕ РАНЖИРОВАНИЕ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК**

Для всех аварийных сценариев (табл. 2) рассчитаны индексы радиационного воздействия на древесный ярус соснового леса с использованием консервативного подхода. Значения этого показателя варьируют в широком диапазоне для каждой реакторной установки. Так, для реактора PWR-890 величина RIF изменяется от 22 до 57, для BWR-1412 – от 5 до 23, для EPR-1600 – от 0.001 до 8300. Широкий диапазон варьирования обусловлен существенным различием в характеристиках аварийных сценариев, к которым относятся: радионуклидный состав выброса, активности поступающих в атмосферу радионуклидов и высота выброса.

Следует подчеркнуть, что для большинства аварийных сценариев реакторов PWR-890, BWR-1412 и EPR-1600 индекс радиационного воздействия превышает единицу. Это означает, что максимальная дозовая нагрузка на древесные растения превышает установленный дозовый критерий (летальную дозу). Для российских реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 значения RIF существенно меньше единицы. Минимальное и максимальное значения этого показателя для ВВЭР-1000 равны 0.0005 и 0.77, а для ВВЭР-1200—0.0001 и 0.037 соответственно.

На основе результатов расчетов можно сделать вывод о том, что сравнительная радиоэкологическая оценка реакторных установок по данным единичного аварийного сценария не является полноценной [25]. В силу существенной вариативности характеристик отдельных сценариев для ранжирования реакторов с точки зрения потенциального радиационного воздействия на природную среду необходимо рассматривать совокупности всех постулированных аварий.

На рис. 2 представлены результаты сравнительной аварийной радиоэкологической оценки рассматриваемых реакторов на основе данных, характеризующих активности выбрасываемых радионуклидов и вероятности аварий [10–12, 32, 33]. Наиболее потенциально опасной для биоты, согласно консервативной оценке RIF, является реакторная установка PWR-890. При расчетах для этого реактора из диапазона вероятностей реализации аварийных сценариев (табл. 2) выбраны наибольшие значения. Несмотря на то что в «аварийном перечне» реактора EPR-1600 присутствует наиболее тяжелый по суммарной выбрасываемой активности сценарий, вклад этого сценария в значение итогового показателя (R) компенсируется малой вероятностью его реализации.

Вероятности постулируемых аварий на реакторных установках ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 ( $10^{-6}$ – $10^{-7}$  год<sup>-1</sup>) сопоставимы со значениями аналогичных показателей для реакторов PWR-890,

**Таблица 1.** Обобщенные дозовые коэффициенты, характеризующие максимальную дозовую нагрузку на референтное сосновое насаждение, мкГр/(год Бк)  
**Table 1.** Generalized dose coefficients characterizing the maximum radiation dose to the reference pine plantation,  $\mu\text{Gy}/(\text{year Bq})$

Радионуклид	Высота выброса	
	10 м	40 м
<sup>140</sup> Ba	$1.03 \times 10^{-8}$	$9.41 \times 10^{-10}$
<sup>141</sup> Ce	$1.20 \times 10^{-8}$	$1.09 \times 10^{-9}$
<sup>143</sup> Ce	$1.58 \times 10^{-9}$	$1.44 \times 10^{-10}$
<sup>144</sup> Ce	$1.56 \times 10^{-8}$	$1.42 \times 10^{-9}$
<sup>134</sup> Cs	$1.35 \times 10^{-7}$	$1.23 \times 10^{-8}$
<sup>136</sup> Cs	$1.42 \times 10^{-8}$	$1.30 \times 10^{-9}$
<sup>137</sup> Cs	$8.82 \times 10^{-8}$	$8.02 \times 10^{-9}$
<sup>131</sup> I (аэрозоль)	$4.98 \times 10^{-9}$	$4.54 \times 10^{-10}$
<sup>140</sup> La	$3.90 \times 10^{-9}$	$3.57 \times 10^{-10}$
<sup>99</sup> Mo	$3.17 \times 10^{-9}$	$2.90 \times 10^{-10}$
<sup>95</sup> Nb	$1.26 \times 10^{-9}$	$1.14 \times 10^{-10}$
<sup>147</sup> Nd	$6.64 \times 10^{-9}$	$6.06 \times 10^{-10}$
<sup>239</sup> Np	$7.19 \times 10^{-10}$	$6.58 \times 10^{-11}$
<sup>143</sup> Pr	$9.83 \times 10^{-9}$	$8.97 \times 10^{-10}$
<sup>241</sup> Pu	$1.14 \times 10^{-9}$	$1.04 \times 10^{-10}$
<sup>86</sup> Rb	$2.87 \times 10^{-8}$	$2.62 \times 10^{-9}$
<sup>105</sup> Rh	$6.48 \times 10^{-10}$	$5.90 \times 10^{-11}$
<sup>103</sup> Ru	$1.32 \times 10^{-8}$	$1.20 \times 10^{-9}$
<sup>106</sup> Ru	$2.80 \times 10^{-7}$	$2.55 \times 10^{-8}$
<sup>127</sup> Sb	$4.30 \times 10^{-9}$	$3.92 \times 10^{-10}$
<sup>89</sup> Sr	$5.14 \times 10^{-8}$	$4.68 \times 10^{-9}$
<sup>90</sup> Sr	$4.50 \times 10^{-8}$	$4.09 \times 10^{-9}$
<sup>127m</sup> Te	$1.33 \times 10^{-9}$	$1.21 \times 10^{-10}$
<sup>129m</sup> Te	$1.44 \times 10^{-9}$	$1.31 \times 10^{-10}$
<sup>131m</sup> Te	$1.14 \times 10^{-9}$	$9.43 \times 10^{-11}$
<sup>132</sup> Te	$8.53 \times 10^{-10}$	$7.78 \times 10^{-11}$
<sup>90</sup> Y	$7.91 \times 10^{-9}$	$7.22 \times 10^{-10}$
<sup>91</sup> Y	$5.86 \times 10^{-8}$	$5.33 \times 10^{-9}$
<sup>95</sup> Zr	$3.03 \times 10^{-8}$	$2.76 \times 10^{-9}$
<sup>85</sup> Kr	$4.71 \times 10^{-12}$	$2.49 \times 10^{-13}$
<sup>88</sup> Kr	$4.10 \times 10^{-9}$	$2.22 \times 10^{-10}$
<sup>133</sup> Xe	$5.02 \times 10^{-11}$	$2.66 \times 10^{-12}$

**Таблица 2.** Основные характеристики аварийных сценариев  
**Table 2.** Basic characteristics of emergency scenarios

Реактор	Сценарии	Суммарная активность, ТБк	Высота выброса, м	Вероятность, год <sup>-1</sup>
PWR-890	1	$7.51 \times 10^6$	8.4	$1.0 \times 10^{-5} - 2.0 \times 10^{-5}$
	2	$7.33 \times 10^6$	8.4	$1.0 \times 10^{-6} - 2.0 \times 10^{-6}$
	3	$1.38 \times 10^6$	24.6	$4.0 \times 10^{-7}$
	4	$5.79 \times 10^6$	24.6	$4.0 \times 10^{-7}$
BWR-1412	1	$1.76 \times 10^7$	39.6	$3.0 \times 10^{-6}$
	2	$1.74 \times 10^7$	39.6	$3.0 \times 10^{-7}$
	3	$2.38 \times 10^7$	39.6	$3.0 \times 10^{-7}$
EPR-1600	1	$5.70 \times 10^4$	34.7	$1.49 \times 10^{-7}$
	2	$1.90 \times 10^5$	60.7	$4.84 \times 10^{-7}$
	3	$2.12 \times 10^7$	35.7	$8.06 \times 10^{-12}$
	4	$2.23 \times 10^7$	35.7	$5.84 \times 10^{-12}$
	5	$2.18 \times 10^7$	35.7	$1.02 \times 10^{-8}$
	6	$2.37 \times 10^7$	35.7	$6.98 \times 10^{-9}$
	7	$2.06 \times 10^7$	35.7	$2.67 \times 10^{-11}$
	8	$2.11 \times 10^7$	35.7	$8.37 \times 10^{-12}$
	9	$2.07 \times 10^7$	35.7	$1.23 \times 10^{-9}$
	10	$2.16 \times 10^7$	35.7	$1.09 \times 10^{-9}$
	11	$1.58 \times 10^7$	35.7	$6.51 \times 10^{-13}$
	12	$2.02 \times 10^7$	35.7	$3.96 \times 10^{-11}$
	13	$2.02 \times 10^7$	35.7	$1.27 \times 10^{-9}$
	14	$2.02 \times 10^7$	35.7	$3.29 \times 10^{-8}$
	15	$2.65 \times 10^6$	24.7	$4.14 \times 10^{-9}$
	16	$1.11 \times 10^7$	24.7	$5.01 \times 10^{-9}$
	17	$1.04 \times 10^8$	10	$3.83 \times 10^{-9}$
ВВЭР-1200	1	$1.15 \times 10^2$	30	$1.0 \times 10^{-6}$
	2	$1.49 \times 10^4$	30	$1.0 \times 10^{-7}$
ВВЭР-1000	1	$2.42 \times 10^2$	25	$1.0 \times 10^{-6} *$
	2	$4.50 \times 10^5$	25	$1.0 \times 10^{-7} *$

\* Вероятности для ВВЭР-1000 соответствуют вероятностям для ВВЭР-1200.

BWR-1412 и для двух сценариев реактора EPR-1600. Однако вследствие относительно небольших активностей радионуклидов в составах ава-

рийных выбросов российских реакторов значения радиологических рисков для ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 являются невысокими. При этом ве-



**Рис. 2.** Аварийные риски воздействия реакторных установок на природную среду.

**Fig. 2.** Emergency risks of the impact of reactor facilities on the natural environment.

личина  $R$  для реактора нового поколения ВВЭР-1200 ниже величины  $R$  для реактора ВВЭР-1000 в 20 раз.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях развития ядерной энергетики, создания новых реакторных установок и топливных циклов необходимы радиоэкологические оценки, позволяющие сопоставить реакторы как источники потенциальной опасности для природной среды. Предложен подход для такого сопоставления на основе рисков радиационного воздействия на референтное природное сообщество — древесный ярус хвойного (соснового) леса. Входной информацией для расчета рисков являются характеристики аварийных сценариев, разработанных для реакторных установок. Предложенный подход может быть использован для радиоэкологической оценки не только энергоблоков АЭС, но и других объектов ядерного топливного цикла, представляющих собой источники потенциальной радиационной опасности. Такую оценку на этапе планирования ядерно-энергетических объектов и систем можно рассматривать в качестве одного из элементов их экологического обоснования [4].

Разработанный подход апробирован на основе данных, характеризующих вероятности постулированных аварий на реакторах различного типа и активности радионуклидов в составе прогнозируемых атмосферных выбросов. Результаты расчета показали, что риски для природной среды существенным образом варьируют в зависимости от особенностей реакторной установки, определяющих параметры аварийных сценариев. Наиболее безопасным для биоты, согласно выполненным

оценкам, является реактор ВВЭР-1200, относящийся к поколению “3+”.

Следует подчеркнуть возможность дальнейшего развития подхода к оценке аварийных радиоэкологических рисков для природной среды с учетом распределения дозовой нагрузки по территории радиоактивного следа. Применение такого “пространственного” подхода продемонстрировано в работе [25] для единичных аварийных сценариев.

Результаты итоговой радиоэкологической оценки в значительной степени определяются входными данными — вероятностями постулированных аварий и параметрами радиоактивных выбросов. Для корректного сопоставления ядерно-энергетических объектов как потенциальных источников радиационного воздействия на природную среду аварийные сценарии целесообразно формировать на основе унифицированных методик.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nuclear Power Reactors in the World. IAEA-RDS-2/39. IAEA, Vienna, 2019. 86 p.
2. Алексеев П.Н., Гагаринский А.Ю., Калугин М.А. и др. К стратегии развития ядерной энергетики России // Атомная энергия. 2019. Т. 126. Вып. 4. С. 183–187. [Alekseev P.N., Gagarinskii A.Y., Kalugin M.A., et al. On a Strategy for the Development of Nuclear Power in Russia // Atomic Energy. 2019. V. 126. № 4. P. 207–212. (In Russian)]
3. Алексахин Р.М. Актуальные экологические проблемы ядерной энергетики // Атомная энергия. 2013. Т. 114. Вып. 5. С. 243–249. [Alexakhin R.M. Topical environmental problems of nuclear power // Atomic Energy. 2013. V. 114. № 5. P. 301–307. (In Russian)]
4. Спиридонов С.И. Перспективы системной радиоэкологии в решении инновационных задач ядерной энергетики // Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. Т. 54. № 4. С. 415–422. [Spiridonov S.I. Prospects of systemic radioecology in solving innovative tasks of nuclear power engineering // Radiats. Biol. Radioecol. 2014 Jul-Aug. V. 54. №4. P. 415–22. (In Russian)]
5. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с. [Normy radiatsionnoj bezopasnosti (NRB-99/2009): Sanitarnye pravila i normativy SanPiN 2.6.1.2523-09. M.: Federal'nyj tsentr gigieny i epidemiologii Rospotrebnadzora, 2009. 100 s. Radiation Safety Standards (RSS-99/2009): Sanitary epidemiological rules and standards SanPin 2.6.1.2523-09. Moscow, Federal Centre of Hygiene and Epidemiology Rospotrebnadzora, 2009, 100 p. (In Russian)]
6. Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03). Санитарные правила и гигиенические нормативы. СанПиН 2.6.1.24-03. М.: Минздрав России, 2003. 41 с. [Sani-



- tarnye pravila proektirovaniya i ekspluatatsii atomnykh stantsij (SP AS-03). Sanitarnye pravila i gigenicheskie normativy. SanPin 2.6.1.24-03. M.: Minzdrav Rossii, 2003. 41 s. Sanitary rules of design and operation of nuclear power plants (SP AS-03). Sanitary rules and hygiene standards SP 2.6.1.24-03. Moscow: Russian Ministry of Health, 2003. 41 p. (In Russian)]
7. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3. Vienna: IAEA, 2014. 436 p.
  8. Nuclear Accident Knowledge Taxonomy. IAEA Nuclear Energy Series, № NG-T-6.8. Vienna: IAEA, 2016. 52 p.
  9. Approaches to Safety Evaluation of New and Existing Research Reactor Facilities in Relation to External Events. IAEA Safety Report Series. № 94. Vienna: IAEA, 2016. 132 p.
  10. State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project. V. 2: Surry Integrated Analysis (NUREG/CR-7110. V. 2. Revision 1). Office of Nuclear Regulatory Research, 2013. 559 p.
  11. State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses Project. Volume 1: Peach Bottom Integrated Analysis (NUREG/CR-7110. V. 1. Revision 1). Office of Nuclear Regulatory Research, 2013. 329 p.
  12. Hinkley Point C Pre-Construction Safety Report. NNB Generation Company Limited, United Kingdom. 2012. Chapter 15. Sub-chapter 15-4. UK EPR-0002-154 Issue 06. 252 p.
  13. *Alexakhin R.M., Karaban R.T., Prister B.S. et al.* The effects of acute irradiation on a forest biogeocenosis (experimental data, model and practical applications to accidental cases) // *Sci. Total Environ.* 1994. V. 157. № 4. P. 357–369.
  14. *Спирidonov С.И., Фесенко С.В., Алексахин Р.М., Спирин Д.А.* Математическое моделирование последствий острого лучевого воздействия на древесный ярус лесного биогеоценоза // *Радиобиология.* 1989. Т. 29. Вып. 4. С. 544–549. [*Spiridonov S.I., Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Spirin D.A.* Matematicheskoe modelirovanie posledstviy ostrogo luchevo go vozdeystviya na drevesnuy yarus lesnogo biogeotsenoza (Mathematical modelling of the consequences of the acute radiation exposure of the wood layer of the forest biogeocenosis) // *Radiobiologiya.* 1989. T. 29. Vyp. 4. S. 544–549. (In Russian)]
  15. *Тихомиров Ф.А.* Действие ионизирующих излучений на экологические системы. М.: Атомиздат, 1972. 174 с. [*Tikhomirov F.A.* Dejstvie ioniziruyushchikh izluchenij na ekologicheskie sistemy (Action of ionizing radiation on ecological systems). M.: Atomizdat, 1972. 174 s. (In Russian)]
  16. *Алексахин Р.М.* Ядерная энергия и биосфера. М.: Энергоиздат, 1982, 215 с. [*Alexakhin R.M.* Yadernaya energiya i biosfera (Nuclear energy and biosphere). M.: Energoizdat, 1982, 215 с. (In Russian)]
  17. Крупные радиационные аварии: Последствия и защитные меры / Под общ. ред. Л.А. Ильина и В.А. Губанова. М.: ИздАТ, 2001. 752 с. [Kрупnye radiatsionnye avarii: Posledstviya i zashchitnye меры (Major radiation accidents: consequences and protective measures) / Pod obshch. red. L.A. Il'ina i V.A. Gubanova. M.: IzdAT, 2001. 752 s. (In Russian)]
  18. *Козубов Г.М., Таскаев А.И.* Радиобиологические и радиоэкологические исследования древесных растений. Санкт-Петербург: Наука, 1994. 255 с. [*Kozubov G.M., Taskaev A.I.* Radiobiologicheskie i radioekologicheskie issledovaniya drevesnykh rastenij (Radiobiological and radioecological investigations of tree plants). Sankt-Peterburg: Nauka, 1994. 255 с. (In Russian)]
  19. *Лазуков М.И., Чупрунов В.С.* Радиологические исследования в лесах на территории ВУРСа // Вопросы лесной радиоэкологии / Под ред. А.И. Чилимова. М., 2000. С. 101–119. [*Lazukov M.I., Chuprunov V.S.* Radiologicheskie issledovaniya v lesakh na territorii VURSa (Radiological studies in the forests of EURT) // *Voprosy lesnoj radioekologii / Pod red. A.I. Chilimova.* Moskva, 2000. С. 101–119. (In Russian)]
  20. *Спирин Д.А., Романов Г.Н., Федоров Е.А., Алексахин Р.М.* Радиоэкологический сдвиг в фитоценозах и возможный критерий его прогнозирования // *Экология.* 1988. № 4. С. 25–29. [*Spirin D.A., Romanov G.N., Fedorov E.A., Alexakhin R.M.* Radioecological shift in phytocenoses and a possible criterion for its prediction // *Ekologiya.* 1988. № 4. P. 25–29. (In Russian)]
  21. Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108 // *Ann. ICRP.* 2008. V. 38. № 4–6. 242 p.
  22. Dose Coefficients for Non-human Biota Environmentally Exposed to Radiation. ICRP Publication 136 // *Ann. ICRP.* 2017. V. 46. № 2. 136 p.
  23. *Микаилова Р.А., Спирidonov С.И.* Доза облучения древесного яруса хвойного леса, обусловленная аварийным выбросом АЭС // *Атомная энергия.* 2017. Т. 123. Вып. 63. С. 165–170. [*Mikailova R.A., Spiridonov S.I.* Irradiation dose of the woody tier of a coniferous forest due to accidental emissions from NPP // *Atomic Energy.* 2018. V. 123. № 3. P. 202–208. (In Russian)]
  24. IAEA Safety Glossary. Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection. Vienna: IAEA, 2019. 278 p.
  25. *Спирidonov С.И., Микаилова Р.А.* Сравнительная радиоэкологическая оценка сценариев тяжелых аварий на АЭС на основе риска для природного сообщества // *Атомная энергия.* 2018. Т. 125. Вып. 3. С. 175–180. [*Spiridonov S.I., Mikailova R.A.* Comparative radioecological assessment of serious-accident scenarios in NPP on the basis of the risk for natural communities // *Atomic Energy.* 2019. T. 125. № 3. С. 198–203. (In Russian)]
  26. *Fesenko S.V., Alexakhin R.M., Geraskin S.A. et al.* Comparative radiation impact on biota and man in the area affected by the accident at the Chernobyl nuclear power plant // *J. Environ. Radioactivity.* 2005. V. 80. P. 1–25.
  27. *Arkhipov N.P., Kuchma N.D., Askbrant S. et al.* Acute and long-term effects of irradiation on pine (*Pinus silvestris*) stands post-Chernobyl // *Sci. Total Environ.* 1994. V. 157. № 4. P. 383–386.
  28. *Абатуров Ю.Д., Абатуров А.В., Быков А.В. и др.* Влияние ионизирующего излучения на сосновые леса в ближней зоне Чернобыльской АЭС. М.: На-



- ука, 1996. 240 с. [*Abaturov Yu.D., Abaturov A.V., Bykov A.V. i dr. Vliyanie ioniziruyushchego izlucheniya na sosnovye lesa v blizhnej zone Chernobyl'skoj AES (Influence of ionizing radiation on pine forests in the near zone of Chernobyl NPP)*]. М.: Nauka, 1996. 240 с. (In Russian)]
29. *Dvorzhak A., Mora J.C., Robles B.* Probabilistic risk assessment from potential exposures to the public applied for innovative nuclear installations // *Reliabil. Engineer. & Syst. Safety*. 2016. V. 152. P. 176–186.
30. *Алексахин Р.М., Нарышкин М.А.* Миграция радионуклидов в лесных биогеоценозах. М.: Наука, 1977. 144 с. [*Alexakhin R.M., Naryshkin M.A. Migratsiya radionuklidov v lesnykh biogeotsenozakh (Migration of radionuclides in forest biogeocenoses)*]. М.: Nauka. 1977. 144 с. (In Russian)]
31. *Vives i Batlle J., Jones S.R., Coplestone D.* A method for estimating  $^{41}\text{Ar}$ ,  $^{85,88}\text{Kr}$  and  $^{131\text{m},133}\text{Xe}$  doses to non-human biota // *J. Environ. Radioact.* 2015. V. 144. P. 152–161.
32. Обоснование инвестирования в строительство атомной электростанции в республике Беларусь. Этап 4. Оценка воздействия на окружающую среду. Кн. 4. Раздел 9. Характеристика окружающей среды и оценка воздействий на нее БелАЭС. Почвы. Сельское хозяйство. Оценка радиационного воздействия на агроэкосистемы. 1588-ПЗ-ОИ4 Белнипиэнергопром, 2009. 209 с. [Обоснование инвестирования в строительство атомной электростанции в республике Беларусь. Этап 4. Оценка воздействия на окружающую среду. Кн. 4. Раздел 9. Характеристика окружающей среды и оценка воздействий на нее БелАЭС. Почвы. Сельское хозяйство. Оценка радиационного воздействия на агроэкосистемы. 1588-ПЗ-ОИ4 Белнипиэнергопром, 2009. 209 с. (In Russian)]
33. Обоснование инвестирования в строительство атомной электростанции в республике Беларусь. Кн. 11. Оценка воздействия на окружающую среду. Ч. 8. Отчет об ОВОС. Ч. 8.3. Оценка воздействия АЭС на окружающую среду. 1588-ПЗ-ОИ4 (Редакция 06.07.2010 г.). Белнипиэнергопром, 2010. 167 с. [Обоснование инвестирования в строительство атомной электростанции в республике Беларусь. Кн. 11. Оценка воздействия на окружающую среду. Ч. 8. Отчет об ОВОС. Ч. 8.3. Оценка воздействия АЭС на окружающую среду. 1588-ПЗ-ОИ4 (Redaktsiya 06.07.2010 g.). Belniপিenergoprom, 2010. 167 s. (In Russian)]

## Ranking of Reactor Facilities Based on the Assessment of Potential Radiation Impact on the Environment

S. I. Spiridonov<sup>a,#</sup> and R. A. Mikailova<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Russian Institute of Radiology and Agroecology, Obninsk, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: spiridonov.si@gmail.com*

The paper presents a methodological approach to the comparative assessment of reactor units and other nuclear power facilities in terms of the potential impact of accidental releases on the environment. The approach is based on the calculation of the radioecological risk taking into account the probabilities of the occurrence of postulated accidents and the parameters of radioactive releases for the set of emergency scenarios. The tree layer of the pine forest is considered as a reference natural community. The radiation exposure index is used to characterize the effects of radioactive fallout. The risk values were calculated for a number of Russian (VVER-1000, VVER-1200) and foreign (PWR-890, BWR-1412, EPR-1600) reactor units and their radioecological ranking was performed. It was established that the new generation VVER-1200 reactor is the safest for biota.

**Keywords:** reactor installations, natural environment, emergency scenarios, radioecological assessment, radiation doses, wood layer of the forest