



УДК: 621.039.58, 008.2, 001.891.34

DOI: 10.26277/SECNRS.2020.97.3.001

© 2020. Все права защищены.

## МЕТОДОЛОГИЯ КОЛИЧЕСТВЕННОГО СРАВНЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ВАРИАНТОВ РЕАЛИЗАЦИИ ЯДЕРНЫХ ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ

Курьиндин А. В.\* , к. т. н. (kuryndin@secnrs.ru),  
Шаповалов А. С.\* (shapovalov@secnrs.ru),  
Поляков Р. М.\* (rpolyakov@secnrs.ru),  
Иванов К. В.\*\* (Kovllvanov@rosatom.ru),  
Хаперская А. В.\*\* , к. х. н. (AVKhaperskaya@rosatom.ru),  
Суворова Е. В.\*\* (EVSuvorova@rosatom.ru),  
Белинский Л. Л.\*\* (LeLBelinsky@rosatom.ru)

Статья поступила в редакцию 30 июня 2020 г.

*В настоящей статье представлен анализ государственной политики по развитию ядерных топливных циклов, реализуемой в странах, активно использующих атомную энергию, в контексте ее ориентированности на реализацию открытого или замкнутого ядерного топливного цикла.*

*Оценены мотивы, которыми руководствуются страны, активно использующие атомную энергию, при выборе того или иного варианта реализации ядерного топливного цикла, на основе чего сделан вывод, что аспекты безопасности не являлись преобладающими при выборе странами того или иного варианта развития ядерного топливного цикла.*

*Показана актуальность задачи сравнения безопасности ядерных топливных циклов и выработки объективных численных критериев, на основе которых это сравнение должно проводиться.*

*Также в статье представлен анализ подходов, рекомендованных международными организациями для использования в целях сравнения различных вариантов развития ядерных топливных циклов, отмечены их преимущества и недостатки с точки зрения применимости для сравнения безопасности ядерных топливных циклов.*

*На основе выполненного анализа авторами предложена объединяющая преимущества рассмотренных подходов методология количественного сравнения безопасности различных вариантов реализации ядерных топливных циклов.*

**► Ключевые слова:** радиационная безопасность, коллективная доза, ядерный топливный цикл, методология сравнения безопасности.

\* Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Российская Федерация.

\*\* Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Москва, Российская Федерация.

## METHODOLOGY FOR QUANTITATIVE COMPARISON OF DIFFERENT NUCLEAR FUEL CYCLES BY THEIR SAFETY

Kuryndin A. V.\*, Ph. D. (kuryndin@secnrs.ru),

Shapovalov A. S.\* (shapovalov@secnrs.ru),

Polyakov R. M.\* (rpolyakov@secnrs.ru),

Ivanov K. V.\*\* (KoVIlvanov@rosatom.ru),

Khaperskaya A. V.\*\*, Ph. D. (AVKhaperskaya@rosatom.ru),

Suvorova E. V.\*\* (EVSuvorova@rosatom.ru),

Belinsky L. L.\*\* (LeLBelinsky@rosatom.ru)

Article is received on July 8, 2020

*This article presents an analysis of national policies in the field of nuclear fuel cycles development, implemented in countries which widely utilize atomic energy. The analysis is focused on aspects of implementation of an open or closed nuclear fuel cycle.*

*The article also characterizes motives that are guided by the countries, when choosing one or another option for the implementation of the nuclear fuel cycle. Based on the characteristics given it is concluded that safety aspects were not predominant when the countries choose one or another option for nuclear fuel cycle development.*

*Importance of the comparison of nuclear fuel cycles by their inherent safety and the significance of the development of credible numerical criteria, based on which this comparison should be carried out, is shown in the article.*

*The article also presents an analysis of the approaches which are recommended by international organizations (IAEA, UNSCEAR, ICRP, NEA OECD) for use in order to compare the different nuclear fuel cycles, and shows the advantages and disadvantages of the approaches in terms of applicability for such comparison.*

*On the basis of the analysis performed and on the basis of combination of the advantages of the approaches which are considered, the authors have proposed the methodology for the quantitative comparison of nuclear fuel cycles, based on their safety characteristics.*

► **Keywords:** radiation safety, collective dose, nuclear fuel cycle, methodology for safety comparison.

\* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russian Federation.

\*\* State Atomic Energy Corporation ROSATOM, Moscow, Russian Federation.



## Введение

Из документов стратегического планирования в области энергетики и (или) экологии, принятых в странах, активно использующих атомную энергию для производства электроэнергии, а именно: в Российской Федерации [1, 2], Франции [3, 4], Японии [5], Великобритании [6], КНР [7, 8], США [9], следует, что это использование рассматривается в качестве ключевого фактора, способствующего ограничению выбросов парниковых газов в атмосфере. При этом национальные подходы к использованию атомной энергии характеризуются многообразием стратегий развития ядерного топливного цикла, оценить которое можно из анализа указанных стратегий стран, активно использующих атомную энергию.

Таким образом, каждая страна на национальном уровне определяет стратегию развития ядерного топливного цикла<sup>1</sup> (ЯТЦ) [10]. Основы национальных политик по реализации данных стратегий, в том числе реализация открытого или замкнутого ЯТЦ, официально представляются на обзорных совещаниях в рамках конвенции [11], которая в настоящий момент является единственным юридически обязывающим международным документом по безопасности обращения с образующимися в ЯТЦ отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО).

Франция формирует новый энергетический план [4] взамен действующего [3]. При этом предварительно известно, что государство намерено реализовывать замкнутый ЯТЦ, предусматривающий использование плутония в реакторах на тепловых нейтронах, а также в дальнейшем в реакторах на быстрых нейтронах с целью уменьшения долгосрочной опасности высокоактивных радиоактивных отходов (ВАО) [4].

Официальная политика Японии – замыкание ЯТЦ. В Национальном стратегическом энергетическом плане Японии [5] закреплено, что основой долгосрочной политики является ЯТЦ с переработкой ОЯТ и эффективной утилизацией плутония с точки зрения лучшего использования

<sup>1</sup> Здесь и далее под ядерным топливным циклом в соответствии с терминологией [10] понимается любая деятельность, связанная с атомной генерацией электроэнергии, включая добычу урановой руды, обогащение урана, изготовление ядерного топлива, эксплуатацию ядерных реакторов, и, в случае замкнутого ЯТЦ, переработку отработавшего ядерного топлива, а также деятельность по обращению с радиоактивными отходами.

природных ресурсов и снижения объемов и опасности ВАО. Разработана стратегическая дорожная карта развития реакторов на быстрых нейтронах [5], в ближайшее время предусматривающая проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) в данном направлении.

Энергетическая стратегия Великобритании предусматривает создание новых атомных генерирующих мощностей [6]. Успех текущих планов по развертыванию до 16 ГВт мощности с использованием легководных реакторов назван ключевым приоритетом в обеспечении будущего ядерной энергетики. При этом следует отметить, что в целях реализации Плана снижения выброса парниковых газов [12] в [6] признается, что, вероятно, потребуется изучить более продвинутые и диверсифицированные варианты развития энергетики, к которым, среди прочих возможных, отнесены замыкание ЯТЦ по урану, переработка ОЯТ и рассмотрение альтернативных топливных циклов.

Политика Китая в части ЯТЦ – замыкание ЯТЦ с переработкой ОЯТ и рециклированием извлеченных ядерных материалов. В КНР, согласно Плану действий по развитию энергетики на 2014–2020 гг. [7], атомная энергогенерация должна увеличиться до 58 ГВт к концу 2020 г. за счет использования реакторов с водой под давлением, высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов и реакторов на быстрых нейтронах, а также должны продолжаться НИОКР по переработке ОЯТ с созданием двух заводов по переработке ОЯТ (200 и 800 тонн в год). Кроме того, планируется сооружение мощностей по изготовлению МОКС-топлива [7].

В документе стратегического планирования США [9] отмечена важность безуглеродной энергетики в обеспечении национальной безопасности.

В Российской Федерации [1] реализация концепции замкнутого топливного цикла рассматривается как основа для решения проблем воспроизводства ядерного топлива, минимизации РАО и соблюдения режима нераспространения ядерных материалов. При этом Российская Федерация, как и прочие рассмотренные выше страны, на уровне государственного стратегического планирования пока не предусматривает внедрение замкнутых ЯТЦ со сжиганием минорных актинидов [1, 2].

Важно отметить, что кроме Российской Федерации элементы замыкания ЯТЦ наиболее реализованы во Франции, Великобритании и Японии [8, 13], однако в полной мере (т. е. со сжиганием минорных актинидов) ЯТЦ не замкнут нигде. Концепция открытого ЯТЦ также

широко представлена в ряде стран, хотя и открытый ЯТЦ также нигде не реализован в полном объеме, ведь практика окончательного захоронения ОЯТ отсутствует. Работа по реализации открытого ЯТЦ ведется в США, Швеции, Финляндии [8, 13]. Так, например, Финляндия реализует проект по созданию пункта геологического захоронения ОЯТ, который представляет из себя систему тоннелей, расположенных в толще кристаллических пород [8].

В целом, основываясь на [8, 14–18], можно утверждать, что выбор открытого или замкнутого ЯТЦ обусловлен, в первую очередь, политическими и экономическими мотивами.

Ряд стран не определились со стратегией ЯТЦ, реализуя практику “wait and see” (фактически только хранения ОЯТ) без понимания дальнейших шагов, и находятся в процессе выбора концепции ЯТЦ (Бразилия, Украина и др.), еще ряд стран, в которых накоплено ОЯТ (Испания, Корея и др.), испытывают сложности с организацией долговременного хранения ОЯТ при отсутствии объекта захоронения.

Описанное выше многообразие подходов к развитию ЯТЦ, наблюдаемое среди стран, активно использующих атомную энергию, подводит к вопросу о том, какой вариант реализации ЯТЦ более безопасен и какой единый критерий сравнения ЯТЦ по безопасности должен применяться для получения ответа на этот вопрос.

#### **Анализ подходов, рекомендованных международными организациями для использования в целях сравнения различных вариантов развития ядерных топливных циклов**

По результатам анализа публикаций Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) [19], Агентства по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ ОЭСР) [20, 21] и МАГАТЭ (методология Международного проекта по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (ИНПРО), изложенная в [22]) можно выделить несколько подходов к сравнению ядерных технологий вообще и вариантов реализации ЯТЦ в частности:

- многофакторные подходы, основанные на учете разнообразных факторов (воздействие на окружающую среду, экономика, инфраструктура и т. д.), предложенные МАГАТЭ [22] (методология ИНПРО) или АЯЭ ОЭСР [21];

- подход, основанный на сравнении радиационного воздействия ядерных технологий по создаваемой ими коллективной дозе, предложенный МКРЗ [19] и АЯЭ ОЭСР [20].

На рис. 1 представлена краткая характеристика преимуществ и недостатков каждого из подходов с точки зрения сравнения ЯТЦ по безопасности.

Следует отметить, что конечным результатом применения и методологии ИНПРО [22], и многофакторного подхода АЯЭ ОЭСР [21] является совокупность количественных значений параметров, отражающих стоимостные, экономические, ресурсосберегающие характеристики различных вариантов реализации ЯТЦ, а также характеристики их безопасности. Иллюстрации результатов применения указанных подходов представлены на рис. 2 для [22] и на рис. 3 для [21].

Таким образом, методология ИНПРО [22] и многокритериальная методология АЯЭ ОЭСР [21] оставляют право суждения о предпочтительном варианте реализации ЯТЦ лицу, применяющему данные методологии, предлагая ему ранжировать стоимостные, экономические, ресурсосберегающие характеристики и характеристики безопасности по их субъективно воспринимаемой важности.

Недостатком методологии ИНПРО с точки зрения возможности ее применения для сравнения вариантов реализации ЯТЦ также является ее ориентированность на сравнение перспективного ЯТЦ с ЯТЦ, фактически реализованным на текущий момент времени, на предмет соответствия инновационного варианта реализации ЯТЦ критериям устойчивого развития<sup>2</sup> [23]. При этом не все критерии, оценка которых предусмотрена методологией ИНПРО, имеют количественное выражение<sup>3</sup>.

Конечным результатом применения методологии, предлагаемой МКРЗ [19] и АЯЭ ОЭСР [20], является вывод о предпочтительности того или иного варианта развития ЯТЦ, сделанный на основе единственного параметра – коллективной дозы. Однако использование только коллективной дозы не учитывает ряд

<sup>2</sup> Согласно [23] термин «устойчивое развитие» определен как развитие, которое отвечает потребностям настоящего поколения, не ставя под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности.

<sup>3</sup> Например, в методологии ИНПРО не установлен количественный критерий достаточности ни по проработанности на уровне НИОКР, ни по достаточности интерфейса «машина-человек», ни по ряду других критериев оценки.



Рис. 1. Преимущества и недостатки подходов МКРЗ, МАГАТЭ и АЯЭ ОЭСР для сравнения ЯТЦ по безопасности

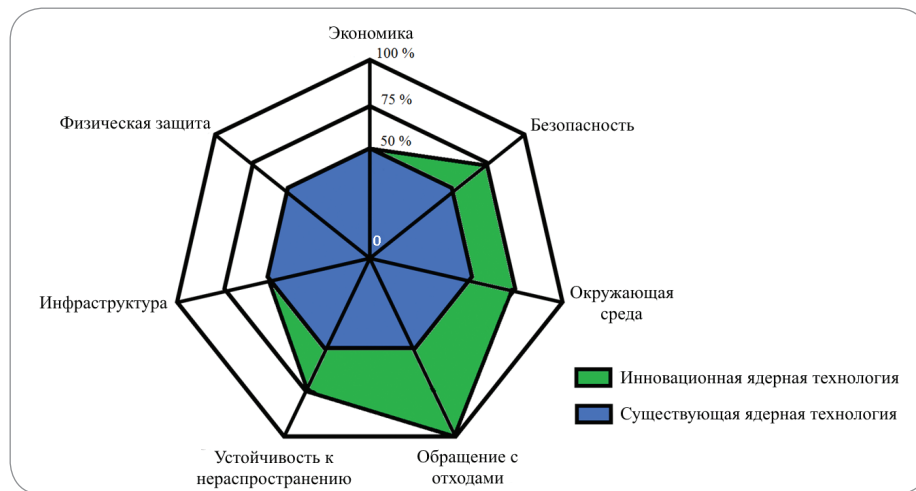


Рис. 2. Иллюстрация результата применения методологии ИНПРО

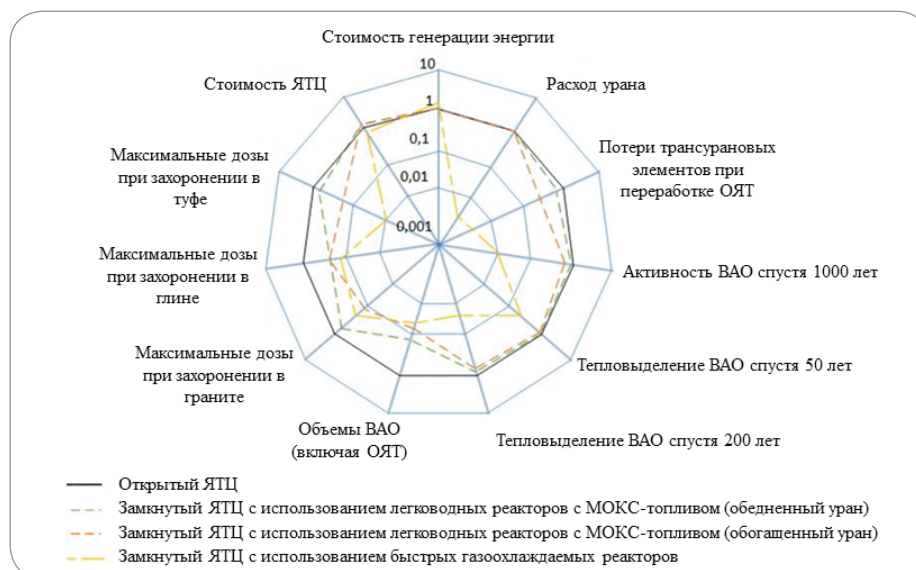


Рис. 3. Иллюстрация результата применения подхода АЯЭ ОЭСР

аспектов безопасности при реализации ЯТЦ, к которым относится, например, соблюдение:

- основных пределов доз облучения персонала и населения [24, 25];
- ограничений на риск потенциального облучения [25];
- ограничения на долговременное облучение населения после захоронения РАО [26].

Из изложенного выше следует, что рассмотренные методологии имеют как преимущества, так и недостатки, поэтому для целей взаимного сравнения безопасности реализации различных ЯТЦ авторами предложена методология (Методология сравнения), основанная на [19, 20], но лишенная недостатков методологий АЯЭ ОЭСР [21] и методологии ИНПРО [22].

### Методология количественного сравнения безопасности различных вариантов реализации ядерных топливных циклов

Предлагаемый подход сравнения использует в качестве основного критерия сравнения вариантов реализации ядерного топливного цикла коллективную дозу (аналогично подходам МКРЗ [19] и АЯЭ ОЭСР [21]), определяемую как:

$$S(E_1, E_2, \Delta T) = \int_{E_1}^{E_2} E \cdot \left[ \frac{dN}{dE} \right]_{\Delta T} \cdot dE \quad (1)$$

или

$$S = \sum_i E_i \cdot N_i, \quad (2)$$

где:  $E_i$  – средняя эффективная доза для подгруппы лиц;

$N_i$  – число лиц в этой подгруппе;

$\Delta T$  – продолжительность рассматриваемого промежутка времени.

Но при этом в рамках предложенной Методологии сравнения необходим предварительный отбор вариантов реализации ЯТЦ, при которых соблюдены нормативные ограничения по безопасности. Блок-схема, отражающая Методологию сравнения в общем виде, представлена на рис. 4.

Для определения того, пригоден ли тот или иной вариант реализации ЯТЦ для дальнейшего рассмотрения – сравнения по коллективной дозе (интегральному критерию) – необходимо проведение сравнения каждого из рассматриваемых вариантов реализации ЯТЦ со следующими критериями:

- средняя годовая эффективная доза облучения критической группы населения от ЯТЦ при его

нормальной эксплуатации ( $E$ ) не должна превышать 1 мЗв/год (п. 3.1 [25]);

- риск потенциального облучения для населения от ЯТЦ при его нормальной эксплуатации ( $p$ ) не должен превышать  $1,0 \cdot 10^{-5}$  год<sup>-1</sup> (п. 2.3 [25]);

- годовая эффективная доза облучения критической группы населения за счет РАО (которые образуются в рамках рассматриваемого варианта ЯТЦ) после их захоронения не должна превышать 0,01 мЗв (п. 3.12.19 [26]).

Расчет индивидуальных доз облучения населения, необходимых для выполнения сравнения с нормативными ограничениями, предлагается проводить для нормальной эксплуатации объектов ЯТЦ, в том числе АЭС, с использованием моделей [27] или [28–30] и с использованием моделей [31] для аварийных ситуаций, характерных для ЯТЦ.

После отбора тех вариантов реализации ЯТЦ, для которых нормативные ограничения соблюдены, должно быть выполнено сравнение ЯТЦ по коллективной дозе (интегральному критерию), при этом наиболее безопасным ЯТЦ является тот, коллективная доза которого наименьшая среди всех ЯТЦ из рассматриваемой совокупности.

Расчеты эффективных коллективных доз предлагается выполнять для времен интегрирования  $\Delta T$ , равных 1 000 лет, 10 000 лет и 100 000 лет (формула (1)).

Данные временные интервалы выбраны из следующих соображений. В соответствии с [32] расчеты коллективных эффективных доз, обусловленных выбросами и сбросами радиоактивных веществ, связанных с текущей выработкой электроэнергии на АЭС и деятельностью иных объектов ЯТЦ в мировом масштабе, выполняются для времен в 500 лет и 10 000 лет. Время 500 лет в [32] предложено исходя из того предположения, что это время, в течение которого будет возможна генерация электроэнергии за счет использования атомной энергии. Важно отметить, что в [32] коллективные дозы оценены без учета радиационного воздействия на население выхода радионуклидов из пунктов захоронения РАО или ОЯТ. При этом в соответствии с [33] критерием приемлемости РАО классов 1, 2 [34] для захоронения является сохранение изолирующей способности упаковки РАО в течение 1 000 лет. В этих условиях не ожидается значимое радиационное воздействие на население за счет выхода радионуклидов из пунктов захоронения РАО классов 1, 2 или ОЯТ. По этой причине вместо рекомендованных [32] 500 лет,  $\Delta T$  целесообразно принять равным 1 000 лет.



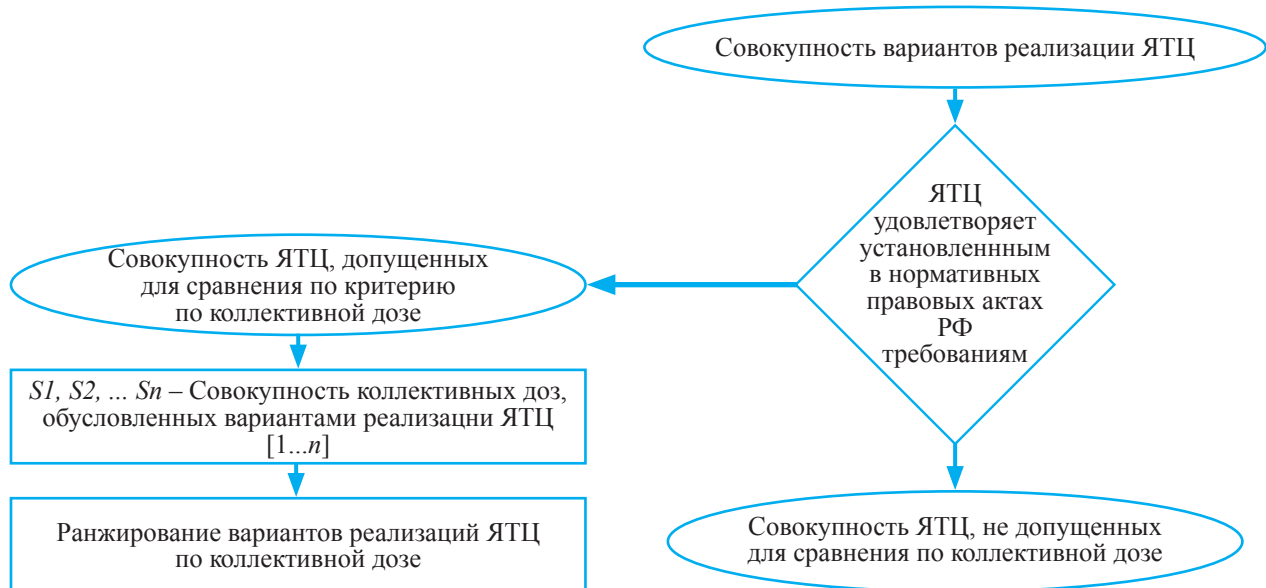


Рис. 4. Обобщенная блок-схема Методологии сравнения

$\Delta T$ , равное 10 000 лет, принято в соответствии с рекомендацией [32], в основе которой постулирован факт, что данный период приблизительно равен длительности теплого периода между двумя ледниковыми периодами, в течение которого можно считать справедливым приближение сохранения текущих характеристик глобального климата и окружающей среды, влияющих на миграцию радионуклидов.  $\Delta T$ , равное 100 000 лет, принято

в целях оценки дальнейшей (после 10 000 лет) динамики коллективных доз облучения на случай, если вопреки упомянутому выше приближению [32] ледниковый период наступит гораздо позже.

Номенклатура источников поступления радионуклидов в окружающую среду и путей облучения персонала и населения [20, 32], целесообразная для учета в рамках Методологии сравнения, представлена на рис. 5.

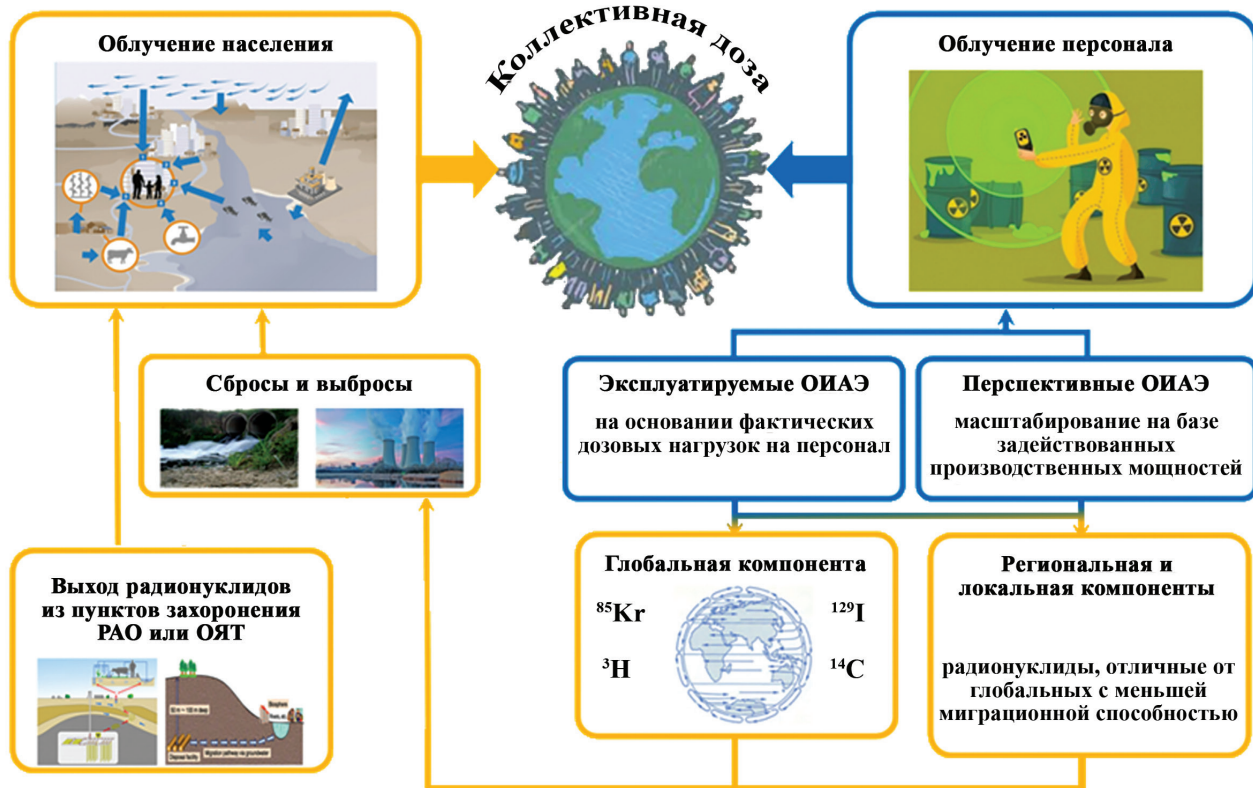


Рис. 5. Номенклатура источников поступления радионуклидов в окружающую среду и путей облучения персонала и населения, учитываемых при расчете коллективной дозы

Основными параметрами для оценки коллективной дозы и для проверки соблюдения нормативных ограничений являются активности сбросов и выбросов радионуклидов при нормальной эксплуатации и авариях, а также активности радионуклидов, выходящих из пунктов захоронения РАО. В рамках реализации разработанной Методологии сравнения необходимо использовать доступные фактические данные по сбросам и выбросам объектов ЯТЦ, в том числе АЭС, а при их отсутствии – проектные и (или) экспертно определенные значения. Выход радионуклидов из пунктов захоронения РАО целесообразно определять путем моделирования миграции радионуклидов для референтных пунктов захоронения с использованием геофильтрационных и геомиграционных моделей.

Для расчета коллективных доз, обусловленных сбросами и выбросами радионуклидов,

а также выходом радионуклидов из пунктов захоронения с последующей разгрузкой загрязненной воды в реки, моря и океаны, в разработанной Методологии сравнения использованы модели, применяемые Научным комитетом по действию атомной радиации ООН (НКДАР ООН) [28–30] для оценок индивидуальных и коллективных доз облучения мирового населения, обусловленных использованием атомной энергии. Данные модели расчета коллективных доз подразделяются в зависимости от описываемых масштабов на модели, предназначенные для оценки локальной, региональной и глобальной компонент коллективной дозы (рис. 6 и 7).

Для моделирования обмена водной массой между различными регионами Мировой океан в рамках принятой модели разбит на камеры [35], представленные на рис. 8.



Рис. 6. Номенклатура используемых в Методологии сравнения моделей для расчета локальной, региональной и глобальной компонент коллективной дозы, обусловленной выбросами радиоактивных веществ в атмосферный воздух



Рис. 7. Номенклатура используемых в Методологии сравнения моделей для расчета локальной, региональной и глобальной компонент коллективной дозы, обусловленной сбросами радиоактивных веществ в водные объекты





Рис. 8. Разбиение Мирового океана на камеры, используемое в рамках модели расчета региональной компоненты

Для моделирования глобального круговорота радионуклидов в рамках Методологии целесообразно использовать камерные модели,

предлагаемые [29, 35]. На рис. 9 в качестве примера представлена структура камерной модели глобального круговорота ЗН.

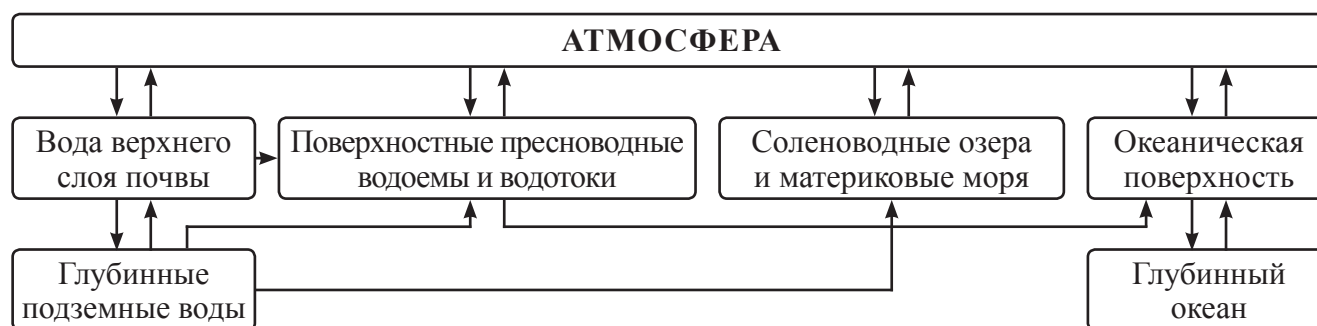


Рис. 9. Структура модели глобального круговорота ЗН

### Выводы и обсуждение

Конечным результатом применения разработанной авторами Методологии сравнения является ранжированный по безопасности перечень вариантов развития ЯТЦ.

Для дальнейших работ представляет интерес применение изложенной выше методологии в отношении вариантов перспективных ЯТЦ, внедрение которых в настоящее время рассматривается в Российской Федерации, и сравнение их с открытым ЯТЦ, реализация которого осуществляется в ряде стран.

### Литература

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года: утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р.
2. О Генеральной схеме размещения объектов электроэнергетики до 2035 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2017 г. № 1209-р.
3. Multiannual Energy Plan // Ministère de la Transition écologique et solidaire. 2017. URL: [www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/4pages\\_PPE\\_GB\\_DEF\\_Web.pdf](http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/4pages_PPE_GB_DEF_Web.pdf) (дата обращения: 18.08.2020).
4. Sixth French report for the Joint Convention / ASN. 2017.
5. Strategic Energy Plan // Agency for Natural Resources and Energy. 2018. URL: [www.enecho.meti.go.jp/en/category/others/basic\\_plan/5th/pdf/strategic\\_energy\\_plan.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/en/category/others/basic_plan/5th/pdf/strategic_energy_plan.pdf) (дата обращения: 18.08.2020).

6. Long-term Nuclear Energy Strategy // HM Government. 2013. URL: [assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/168047/bis-13-630-long-term-nuclear-energy-strategy.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/168047/bis-13-630-long-term-nuclear-energy-strategy.pdf) (дата обращения: 18.08.2020).
7. План действий по развитию энергетики на 2014–2020 гг. // Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment. 2014. URL: [www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/laws/1312.pdf](http://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/laws/1312.pdf) (дата обращения: 18.08.2020).
8. World Nuclear Association // Официальный сайт. URL: [www.world-nuclear.org](http://www.world-nuclear.org) (дата обращения: 18.08.2020).
9. Restoring America's Competitive Nuclear Energy Advantage. A Strategy to Assure U. S. National Security / U. S. Department of Energy, 2020.
10. IAEA Safety Glossary. Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection. 2018 Edition / IAEA, 2018.
11. Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами. INFCIRC/546 / МАГАТЭ, 1997.
12. Carbon Plan // HM Government. URL: [assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/47621/1358-the-carbon-plan.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/47621/1358-the-carbon-plan.pdf) (дата обращения: 18.08.2020).
13. Country Nuclear Power Profiles // IAEA. URL: [cnpp.iaea.org/pages/index.htm](http://cnpp.iaea.org/pages/index.htm) (дата обращения: 18.08.2020).
14. Agreement for Cooperation between the Government of the United States of America and the Government of the Republic of Korea concerning Civil Uses of Atomic Energy. 1974.
15. The History of Nuclear Energy. DOE/NE-088 // U. S. Department of Energy. URL: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/The%20History%20of%20Nuclear%20Energy\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/The%20History%20of%20Nuclear%20Energy_0.pdf) (дата обращения: 18.08.2020).
16. Otso-Pekka Kauppinen. Suomen Ydinpolttoainekierto. Research report 16 // Lappeenranta University of Technology, 2011. URL: <https://docplayer.fi/50806816-Otso-pekka-kauppinen-suomen-ydinpolttoainekierto-lappeenrannan-teknillinen-yliopisto-teknillinen-tiedekunta-lut-energia-tutkimusraportti-16.html> (дата обращения: 18.08.2020).
17. Schneider M. Fast Breeder Reactors in France // Science and Global Security. 2009. V. 17. No. 1. Pp. 36–53.
18. Цверинаншвили И. А. Референдум 1980 года об использовании атомной энергетики в Швеции // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. Гуманитарные и общественные науки. 2017. Т. 8. № 1. С. 48–54.
19. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 / ICRP, 2007.
20. Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options: a Comparative Study. Radiation Protection / NEA OECD, 2000.
21. Nuclear Development. Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management. NEA № 5990 / NEA OECD, 2006.
22. Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems, INPRO Manual: INPRO Manual – Overview of the Methodology. Vol. 1. Final Report of Phase 1 of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO). IAEA-TECDOC-1575 / Rev. 1 / IAEA, 2008.
23. Our Common Future. World Commission on Environment and Development / Oxford: Oxford University Press, 1987. 383 p.
24. О радиационной безопасности населения. Федеральный закон Российской Федерации от 9 января 1996 г. № 3-ФЗ: принят Государственной Думой Российской Федерации 5 декабря 1995 г.
25. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009): утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 7 июля 2009 г. № 47.
26. СП 2.6.1.2612-10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности» (ОСПОРБ-99/2010): утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 26 апреля 2010 г. № 40.
27. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух. РБ-106-15: утверждено приказом Ростехнадзора от 11 ноября 2015 г. № 458.
28. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly // United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation “Sources and Effects of Ionizing Radiation”. Annex A: Dose Assessment Methodologies / UNSCEAR, New York, 2000.

29. UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes // United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation “Source and Effects of Ionizing Radiation” / UNSCEAR, New York, 1993.

30. Radiation Protection 72. Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment. Report EUR 15760 EN / European Commission, 1995.

31. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендуемые методы оценки и прогнозирования радиационных последствий аварий на объектах ядерного топливного цикла. РБ-134-17: утверждено приказом Ростехнадзора от 16 ноября 2017 г. № 479.

32. UNSCEAR 2016 Report to the General Assembly // Proceedings from United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation “Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation” / UNSCEAR, New York, 2016.

33. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения. НП-093-14: утверждены приказом Ростехнадзора от 15 декабря 2014 г. № 572.

34. О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов. Постановление Правительства Российской Федерации от 19 октября 2012 г. № 1069.

35. Smith J. G. and Simmonds J. R. (Editors). The Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment Used in PC-CREAM 08. Report No. HPA-RPD-058 / Health Protection Agency, 2009.

## References

1. Energeticheskaya strategiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2035 goda [Energy Strategy of Russia up to 2035]. Endorsed by the Russian Government directive No. 1523-r dated June 9, 2020.

2. O generalnoy skheme razmeshcheniya objektov elektroenergetiki do 2035 goda [On the Master Plan for Siting Power Generating Facilities up to 2035]. The Russian Government directive No. 1209-r of 09.06.2017.

3. Multiannual Energy Plan. Ministère de la Transition écologique et solidaire. 2017. Available at: [www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/4pages\\_PPE\\_GB\\_DEF\\_Web.pdf](http://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/4pages_PPE_GB_DEF_Web.pdf).

4. Sixth French Report for the Joint Convention. ASN. 2017.

5. Strategic Energy Plan. Agency for Natural Resources and Energy. 2018. Available at: [www.enecho.meti.go.jp/en/category/others/basic\\_plan/5th/pdf/strategic\\_energy\\_plan.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/en/category/others/basic_plan/5th/pdf/strategic_energy_plan.pdf).

6. Long-term Nuclear Energy Strategy. HM Government. 2013. Available at: [assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/168047/bis-13-630-long-term-nuclear-energy-strategy.pdf](http://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/168047/bis-13-630-long-term-nuclear-energy-strategy.pdf).

7. Energy Development Plan for 2014–2020. Grantham Research Institute on Climate Change and the Environment. 2014. Available at: [www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/laws/1312.pdf](http://www.lse.ac.uk/GranthamInstitute/wp-content/uploads/laws/1312.pdf).

8. World Nuclear Association. Official site: [www.world-nuclear.org](http://www.world-nuclear.org).

9. Restoring America’s Competitive Nuclear Energy Advantage. A Strategy to Assure U. S. National Security. DoE. 2020. U. S. Department of Energy, 2020.

10. IAEA Safety Glossary. Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection. 2018 edition. IAEA, 2018.

11. The Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management. INFCIRC/546. IAEA, 1997.

12. Carbon Plan. HM Government. Available at: [assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/47621/1358-the-carbon-plan.pdf](http://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/47621/1358-the-carbon-plan.pdf).

13. Country Nuclear Power Profiles. IAEA. Available at: [cnpp.iaea.org/pages/index.htm](http://cnpp.iaea.org/pages/index.htm).

14. Agreement for Cooperation between the Government of the United States of America and the Government of the Republic of Korea Concerning Civil Uses of Atomic Energy. 1974.

15. The History of Nuclear Energy. DOE/NE-088. U. S. Department of Energy. Available at: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/The%20History%20of%20Nuclear%20Energy\\_0.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/The%20History%20of%20Nuclear%20Energy_0.pdf).

16. Otso-Pekka Kauppinen. Suomen Ydinpolttoainekierto. Research report 16. Lappeenranta University of Technology, 2011. Available at: <https://docplayer.fi/50806816-Otso-pekka-kauppinen-suomen-ydinpolttoainekierto-lappeenrannan-teknillinen-yliopisto-teknillinen-tiedekunta-lut-energia-tutkimusraportti-16.html>.



17. M. Schneider. Fast Breeder Reactors in France. *Science and Global Security*, 2009, v. 17, no. 1, pp. 36–53.
18. Tservanashvili I. A. Referendum 1980 goda ob ispolzovanii atomnoy energetiki v Shvetsii [The 1980 Sweden Referendum on Nuclear Energy]. *Nauchno-technicheskie vedomosti SPB GPU. Gumanitarnye i obshchestvennye nauki – Scientific and technical Bulletin of SPB STU. Humanities and social Sciences*, 2017, v. 8, no. 1, pp. 48–54.
19. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP 37. ICRP*, 2007.
20. Radiological Impacts of Spent Nuclear Fuel Management Options: a Comparative Study. *Radiation Protection. NEA OECD*, 2000.
21. Nuclear Development. Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management. NEA No. 5990. *NEA OECD*, 2006.
22. Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems, INPRO Manual: INPRO Manual – Overview of the Methodology. Vol. 1. Final Report of Phase 1 of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO). IAEA-TECDOC-1575. Rev. 1. IAEA, 2008.
23. Our Common Future. World Commission on Environment and Development. Oxford: Oxford University Press, 1987. 383 p.
24. 3-FZ “O radiatsionnoy bezopasnosti naseleniya” [Federal Law of 09.01.1996 no. 3-FZ “On the Radiological Safety of the Public”].
25. Normy radiatsionnoy bezopasnosti (NRB-99/2009) [Radiation Safety Standards (NRB-99/2009)]. SanPiN 2.6.1.2523-09 from 07.07.2009 no. 47.
26. Osnovnye sanitarnye pravila obespecheniya radiatsionnoy bezopasnosti (OSPORB-99/2010) [Basic Health Rules for Radiological Safety (OSPORB-99/2010)]. SP 2.6.1.2612-10 from 26.04.2010 no. 40.
27. Rekomenduemye metody rascheta parametrov, neobkhodimyykh dlya razrabotki i ustanovleniya normativov predelno dopustimyykh vybrosov radioaktivnykh veshchestv v atmosferyni vozdukh. RB-106-15 [Nuclear Safety Guide “Methods Recommended to Calculate the Parameters Essential for Quantifying and Setting Limits to Radioactivity Release into the Atmospheric Air”. RB-106-15]. Moscow, Rostekhnadzor, 2015.
28. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly. Proceedings from United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation “Sources and Effects of Ionizing Radiation”. Annex A: Dose Assessment Methodologies. UNSCEAR, New York, 2000.
29. UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. Proceedings from United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation “Source and Effects of Ionizing Radiation”. UNSCEAR, New York, 1993.
30. Radiation Protection 72. Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment. Report EUR 15760 EN. European Commission, 1995.
31. Rekomenduemye metody otsenki i prognozirovaniya radiatsionnykh posledstviy avari na objektakh yadernogo toplivnogo tsikla. RB-134-17 [Nuclear Safety Guide “Methods Recommended for Assessing and Predicting the Radiological Consequences of Accidents at Nuclear Fuel Cycle Facilities”. RB-134-17]. Moscow, Rostekhnadzor, 2017.
32. UNSCEAR 2016 Report to the General Assembly. Proceedings from United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation “Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation”. UNSCEAR, New York, 2016.
33. Kriterii priemlemosti radioaktivnykh otkhodov dlya zakhroneniya. NP-093-14 [Federal Rules and Regulations “Acceptance Criteria for Disposal of Radioactive Waste”. NP-093-14]. Moscow, Rostekhnadzor, 2014.
34. O kriteriyakh otneseniya tverdykh, zhidkikh i gazoobraznykh otkhodov k radioaktivnym otkhodam, kriteriyakh otneseniya radioaktivnykh otkhodov k osobym radioaktivnym otkhodam i k udalyaemym radioaktivnym otkhodam i kriteriyakh klassifikatsii udalyaemykh radioaktivnykh otkhodov [On the Criteria Used to Qualify Solid, Liquid and Gaseous Waste as Radioactive Waste, the Criteria Used to Qualify Radioactive Waste as Special Radioactive Waste or Removable Radioactive Waste, and the Criteria for Classifying Removable Radioactive Waste]. The Russian Government Directive no. 1069 of 19.10.2012.
35. Smith J. G. and Simmonds J. R. (Editors). The Methodology for Assessing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment Used in PC-CREAM 08. Report no. HPA-RPD-058. Health Protection Agency, 2009.