DOI: 10.21870/0131-3878-2021-30-2-62-76

УДК 621.039

Достижимость радиологической эквивалентности в ЗЯТЦ на базе БР с учётом факторов неопределённости сценариев развития ядерной энергетики в России до 2100 г. Часть 1. Мощность ТР и БР

Иванов В.К.^{1,2}, Лопаткин А.В.², Меняйло А.Н.¹, Спирин Е.В.², Чекин С.Ю.¹,
Ловачёв С.С.¹, Корело А.М.¹, Соломатин В.М.²

¹ МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал «НМИЦ радиологии» Минздрава России, Обнинск;

² АО «Прорыв», Москва

Распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р утверждена Энергетическая стратегия страны, в которой предполагается одновременная эксплуатация тепловых и быстрых реакторов (ТР и БР). В указанном документе также отмечается, что основные проблемы атомной энергетики связаны с возможными высокими затратами по обращению с облучённым ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО). Ранее была рассмотрена модель развития ядерной энергетики (ЯЭ), когда к 2010 г. БР полностью вытесняют ТР. Было установлено, что в терминах величины LAR, отражающей пожизненный радиационный риск для населения, радиологическая эквивалентность РАО и природного уранового сырья достигается уже через 100 лет выдержки РАО. Этот эффект достигается за счёт «выжигания» ^{241}Am , ^{237}Np и ^{242}Cm при ЗЯТЦ на базе БР. Рассмотрены сценарии развития ЯЭ до 2100 г. с учётом факторов неопределённости по вкладу в энергомощность ТР и БР. Исследованы 3 сценария: неопределённость полностью замещается БР, неопределённость полностью замещается ТР и неопределённость замещается на 50% БР и на 50% ТР. Установлено, что по сценарию 1, когда неопределённость полностью замещается БР, радиологическая эквивалентность достигается через 412 лет. По другим сценариям время достижения радиологической эквивалентности неприемлемо (более 1000 лет). Для моделей с учётом и без учёта неопределённостей в развитии ЯЭ показан вклад основных дозообразующих радионуклидов и соответствующие отношения потенциальной биологической опасности. Полученные результаты по условиям достижения радиологической эквивалентности должны быть использованы при корректировке Стратегического плана развития ЯЭ в стране до 2100 г. с учётом современных требований радиационной экологии и радиологической защиты населения.

Ключевые слова: Энергетическая стратегия, развитие ядерной энергетики до 2100 г., радиологическая эквивалентность, радиационная эквивалентность, стандарты безопасности МАГАТЭ, сценарии развития ядерной энергетики до 2100 г., условие достижения радиологической эквивалентности.

Правительством РФ распоряжением от 9 июня 2020 г. № 1523-р утверждена Энергетическая стратегия страны на период до 2035 года. В этом документе подчёркивается лидирующее положение России в создании новой энергетической технологии атомной энергетики, в которой предполагается одновременная эксплуатация реакторов на тепловых и быстрых нейтронах (ТР и БР) с объединением в общий замкнутый ядерный топливный цикл (ЗЯТЦ). Это позволит обеспечить решение проблем по воспроизводству ядерного топлива, минимизации радиоактивных отходов и соблюдения режима нераспространения ядерных материалов.

В этом документе также подчёркивается, что «основные проблемы и риски развития атомной энергетики связаны со сравнительно высокими затратами на обеспечение ядерной и радиационной безопасности и с необходимостью обращения с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами с учётом требований экологической безопасности».

Иванов В.К. – науч. руководитель НРЭР, гл. радиозоолог ПН «Прорыв», Председатель РНКРЗ, чл.-корр. РАН, д.т.н.; Меняйло А.Н. – вед. науч. сотр., к.б.н.; Чекин С.Ю.* – зав. лаб.; Ловачёв С.С. – мл. науч. сотр.; Корело А.М. – ст. науч. сотр. МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России. Лопаткин А.В. – науч. рук. по РЭ, д.т.н.; Спирин Е.В. – гл. науч. сотр. отдела гл. радиозоолога ПН «Прорыв», д.б.н.; Соломатин В.М. – нач. отдела гл. радиозоолога ПН «Прорыв», к.б.н. АО «Прорыв».

*Контакты: 249035, Калужская обл., Обнинск, ул. Королева, 4. Тел.: (484) 399-30-79; e-mail: nrer@obninsk.com.

Как известно, международные стандарты радиологической защиты населения формируются тремя известными организациями: Научным комитетом ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН), Международной комиссией по радиологической защите (МКРЗ) и МАГАТЭ. В основополагающих принципах безопасности МАГАТЭ (Принцип 7. Защита нынешнего и будущих поколений) подчёркивается: «нынешнее и будущее население и окружающая среда должны быть защищены от радиационных рисков» [1]. Когда говорят о радиационных рисках населения, имеется в виду риск возможных канцерогенных эффектов, обусловленных радиационным воздействием. В Публикации 103 МКРЗ, являющейся в настоящее время основой при оценке канцерогенных радиационных рисков, подчёркивается, что «дозы в органах и тканях, а не эффективные дозы, требуются для оценки вероятности индукции рака у облучённых индивидуумов» [2]. В этом документе предложена также технология оценки величины пожизненного атрибутивного риска (Lifetime Attributable Risk – LAR) с учётом текущих заключений крупномасштабных радиационно-эпидемиологических исследований в Хиросиме и Нагасаки после атомной бомбардировки этих городов в 1945 г. [3-5].

Ранее, в работах [6-10] нами был рассмотрен сценарий развития ядерной энергетики (ЯЭ) в РФ, когда к 2100 г. быстрые реакторы (БР) полностью вытесняют тепловые реакторы (ТР) (рис. 1).

Рис. 1. Выработка электроэнергии (ГВт) на ТР и БР в системе ядерной энергетики.

При этом было показано, что радиологическая эквивалентность РАО и природного уранового сырья в терминах величины LAR достигается уже через 100 лет выдержки (после 2100 г.). Ключевое значение при этом имеет «выжигание» ^{241}Am , ^{237}Np и ^{242}Cm при ЗЯТЦ на базе БР. Эффект радиационной эквивалентности в терминах потенциальной биологической опасности (ПБО) – величины ожидаемой эффективной дозы (Зв) – достигается примерно через 300 лет.

Полученные результаты, безусловно, имеют высокое научное и практическое значение. Однако встаёт вопрос о получении аналогичных оценок, когда сценарий развития ЯЭ в стране на 2100 г. имеет высокий уровень неопределённости.

Материал и методы

Представленный в работах [6-10] и на рис. 1 сценарий развития ЯЭ в РФ, когда к 2100 г. БР полностью вытесняют ТР, будем считать контрольным сценарием и обозначим «Сценарий 0».

На рис. 2 представлены сценарии развития ЯЭ в России с учётом фактора неопределённости развития БР, когда к 2100 г. в той или иной мере сохраняются действующие ТР. Рассмотрены три сценария возможного замещения неопределённости:

Сценарий 1 – неопределённость полностью замещается БР (7,05 тыс. т РАО, соответствуют выработке 2,62 и 1,56 ТВт×год энергии на АЭС с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах соответственно и включают 3,94 тыс. т осколков и хвостов регенерата и 3,11 тыс. т ОЯТ ВВЭР). Всего в данном сценарии было образовано 68,50 тыс. т ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах.

Сценарий 2 – неопределённость полностью замещается ТР (31,9 тыс. т РАО, получены при выработке 3,6 и 0,56 ТВт×год энергии АЭС с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах соответственно и включают 3,94 тыс. т осколков и хвостов регенерата и 26,5 тыс. т ОЯТ ВВЭР с плутонием, не применённого в энергетике). Всего в данном сценарии было образовано 91,24 тыс. т ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах.

Сценарий 3 – неопределённость замещается на 50% БР и на 50% ТР (15,27 тыс. т РАО получены при выработке 2,85 и 1,06 ТВт×год энергии АЭС с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах соответственно и включают 3,57 тыс. т осколков и хвостов регенерата и 11,7 тыс. т ОЯТ ВВЭР с плутонием, не используемого в энергетике). Всего в данном сценарии было образовано 78,5 тыс. т ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах.

Рис. 2. Сценарий развития ядерной энергетики в Российской Федерации с учётом фактора неопределённости, одобренный решением Президиума НТС Госкорпорации «Росатом» 26 декабря 2018 г.

Используются два подхода для оценки уровня достижения радиоэквивалентности: радиационная эквивалентность (ПБО) – выравнивание ожидаемых эффективных доз (ОЭД) облучения населения от РАО и уранового сырья; радиологическая эквивалентность – выравнивание пожизненного атрибутивного (радиационно-обусловленного) риска (LAR) потенциальной индукции онкологических заболеваний от РАО и уранового сырья.

Результаты и обсуждение

На рис. 3-14 показаны оценки достижения радиационной (ПБО) и радиологической (LAR) эквивалентности по трём, указанным выше, сценариям замещения неопределённости в развитии ЯЭ.

По сценарию 1, когда неопределённость полностью замещается БР (рис. 4), радиологическая эквивалентность достигается через 412 лет (после 2100 г.). По другим сценариям время

достижения радиологической эквивалентности является неприемлемым (более 1000 лет). По контрольному сценарию 0, когда БР полностью вытесняют ТР (рис. 1), радиологическая эквивалентность РАО и природного уранового сырья достигается уже через 100 лет выдержки [6-10], т.е. в 4 раза быстрее, чем по сценарию 1.

Эти отличия требуют пояснений. На рис. 15 и 16 для указанных выше сценариев (1 и 0 соответственно) показан вклад основных дозообразующих радионуклидов в LAR от РАО, в зависимости от времени выдержки после 2100 г. Величины LAR получены для такого количества РАО в 2100 г., которое образуется из природного уранового сырья с ОЭД=1 мЗв. На рисунках приведены основные радионуклиды, чей вклад в LAR превысил 1%. При формировании рис. 16 (сценарий 0) предполагалось, что ТР развиваются и работают на базе топлива из обогащённого урана до тех пор, пока не исчерпан принятый в модели ресурс природного урана 540 тыс. т. Все облучённое топливо из ТР перерабатывается, из него извлекается плутоний, минорные актиниды (МА) и некоторые долгоживущие продукты деления. На базе извлечённого плутония развивается система БР. В модели принято, что в год запускается по одному БР при наличии требуемого количества плутония. В модели учитываются ТР типа ВВЭР и РБМК и БР типа БРЕСТ-1200. К 2030 г. мощность системы достигает 47,3 ГВт, к 2100 г. – 107 ГВт и состоит к этому времени только из БР (рис. 1). БР работают в замкнутом топливном цикле. При переработке облучённого топлива ТР и БР в долгоживущие РАО попадает не более 0,1% урана, плутония, МА, Sr, Cs, Tc и I от их содержания в переработанном топливе. Предполагается, что ежегодные партии РАО хранятся, учитывается изменение их нуклидного состава за счёт радиоактивного распада. Получено, что на 2100 г. в системе ядерной энергетики будет накоплено 7523 т долгоживущих нуклидов. Время наступления радиологической эквивалентности по данному сценарию 100 лет. На рис. 17 показано, что ОЭД ^{90}Sr и ^{137}Cs из РАО, накопленных по сценарию 1, в десятки раз превышает соответствующие значения ОЭД для сценария 0.

Рис. 3. ОЭД РАО в зависимости от времени выдержки, приведённые на 1 мЗв ПБО природного уранового сырья при использовании в зоне неопределённости (рис. 2) развития ЯЭ лишь реакторов на быстрых нейтронах. Точка пересечения кривых при линейной интерполяции точек данных 3373 года.

Рис. 4. LAR в зависимости от времени выдержки, рассчитанный по ОЭД из рис. 3 (РАО, в зоне неопределённости вводятся только реакторы на быстрых нейтронах). Точка пересечения кривых при линейной интерполяции точек данных 412 лет.

Рис. 5. ОЭД РАО в зависимости от времени выдержки, приведённые на 1 мЗв ПБО природного уранового сырья при использовании в зоне неопределённости (рис. 2) развития ЯЭ лишь реакторов на тепловых нейтронах. Точка пересечения кривых при линейной интерполяции точек данных 46856 лет.

Рис. 6. LAR в зависимости от времени выдержки, рассчитанный по ОЭД из рис. 5 (РАО, в зоне неопределённости вводятся только реакторы на тепловых нейтронах). Точка пересечения кривых при линейной интерполяции точек данных 12277 лет.

Рис. 7. ОЭД РАО в зависимости от времени выдержки, приведённые на 1 мЗв ПБО природного уранового сырья при одинаковой доле реакторов на тепловых и быстрых нейтронах в зоне неопределённости (рис. 2) развития ЯЭ. Точка пересечения кривых при линейной интерполяции точек данных 23058 лет.

Рис. 8. LAR в зависимости от времени выдержки, рассчитанный по ОЭД из рис. 7 (РАО, в зоне неопределённости вводятся 50% тепловых реакторов и 50% быстрых реакторов). Точка пересечения кривых при линейной интерполяции точек данных 1966 лет.

Рис. 9. ОЭД ОЯТ ТР в зависимости от времени выдержки, приведённые на 1 мЗв ПБО природного уранового сырья, при использовании в зоне неопределённости развития ЯЭ (рис. 2) только реакторов на быстрых нейтронах. Точка пересечения кривых при линейной интерполяции точек данных 78662 года.

Рис. 10. LAR в зависимости от времени выдержки, рассчитанный по ОЭД из рис. 9 (ОЯТ тепловых реакторов, в зоне неопределённости вводятся только реакторы на быстрых нейтронах). Точка пересечения кривых при линейной интерполяции точек данных 33113 лет.

Рис. 11. ОЭД ОЯТ ТР в зависимости от времени выдержки, приведённые на 1 мЗв ПБО природного уранового сырья, если зона неопределённости (рис. 2) развития ЯЭ включает только ТР. Точка пересечения кривых при линейной интерполяции точек данных 84175 лет.

Рис. 12. LAR в зависимости от времени выдержки, рассчитанный по ОЭД из рис. 11 (ОЯТ тепловых реакторов, в зоне неопределённости вводятся только реакторы этого типа). Точка пересечения кривых при линейной интерполяции точек данных 34898 лет.

Рис. 13. ОЭД ОЯТ ТР в зависимости от времени выдержки, приведённые на 1 мЗв ПБО природного уранового сырья при условии, что в зоне неопределённости (рис. 2) развития ЯЭ доля реакторов на тепловых и быстрых нейтронах одинакова. Точка пересечения кривых при линейной интерполяции точек данных 82636 лет.

Рис. 14. LAR в зависимости от времени выдержки, рассчитанный по ОЭД из рис. 13 (ОЯТ тепловых реакторов, в зоне неопределённости вводятся 50% тепловых реакторов и 50% быстрых реакторов). Точка пересечения кривых при линейной интерполяции точек данных 35547 лет.

Рис. 15. Вклад облучения от различных радионуклидов РАО в LAR в зависимости от времени выдержки РАО для сценария 1 (зона неопределённости сценариев полностью замещается БР).

Рис. 16. Вклад облучения от различных радионуклидов РАО в LAR в зависимости от времени выдержки для контрольного сценария 0 (БР полностью вытесняют ТР).

Рис. 17. Отношение ОЭД различных радионуклидов РАО в сценарии 1 к соответствующим значениям ОЭД в контрольном сценарии 0 для времён выдержки 100 и 1000 лет.

Заключение

Стратегический план Госкорпорации «Росатом» по развитию ЯЭ в стране на период до 2100 г. допускает неопределённость соотношения по мощности ТР и БР. Рассмотрены три сценария: неопределённость замещается БР, неопределённость замещается ТР, неопределённость замещается на 50% БР и на 50% ТР.

Принципиальным выводом проведённых исследований является приемлемость с позиций достижения радиологической эквивалентности только первого сценария – полное замещение неопределённости БР. Выравнивание канцерогенных рисков РАО и природного уранового сырья достигается в этом случае примерно через 400 лет выдержки. Поэтому указанный вывод должен быть использован при корректировке и оптимизации Стратегического плана развития ЯЭ в стране с учётом современных требований радиационной экологии и радиологической защиты населения.

Публикация подготовлена по результатам выполнения работ в Госкорпорации «Росатом» в рамках ПН «Прорыв».

Литература

1. Основополагающие принципы безопасности. Серия норм МАГАТЭ по безопасности, № SF-1. Вена: МАГАТЭ, 2007. 23 с.
2. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103 //Ann. ICRP. 2007. V 37, N 2-4. P. 1-332.
3. **Preston D.L., Kusumi S., Tomonaga M., Izumi S., Ron E., Kuramoto A., Kamada N., Dohy H., Matsuo T., Nonaka H., Thompson D.E., Soda M., Mabuchi K.** Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III: Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987 //Radiat. Res. 1994. V. 137 (2 Suppl.). P. 68-97.
4. **Preston D.L., Shimizu Y., Pierce D.A., Suyama A., Mabuchi K.** Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997 //Radiat. Res. 2003. V. 160, N 4. P. 381-407.
5. **Preston D.L., Ron E., Tokuoka S., Funamoto S., Nishi N., Soda M., Mabuchi K., Kodama K.** Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998 //Radiat. Res. 2007. V. 168, N 1. P. 1-64.
6. **Адамов Е.О., Ганев И.Х.** Экологически безупречная ядерная энергетика. М.: НИКИЭТ им. Н.А. Доллежалева, 2007. 145 с.
7. **Лопаткин А.В.** Радиационно-эквивалентное обращение с РАО. Техническая справка 01.2017 НРРЭ. М., 2017. 21 с.
8. **Иванов В.К., Чекин С.Ю., Меняйло А.Н., Максютов М.А., Туманов К.А., Кашеева П.В., Ловачёв С.С., Адамов Е.О., Лопаткин А.В.** Уровни радиологической защиты населения при реализации принципа радиационной эквивалентности: риск-ориентированный подход //Радиация и риск. 2018. Т. 27, № 3. С. 9-23.
9. **Меняйло А.Н., Ловачёв С.С., Чекин С.Ю., Иванов В.К.** Технология оценки радиационных рисков ОЯТ с учётом состава смесей радионуклидов и распределения органных доз облучения //Радиация и риск. 2019. Т. 28, № 1. С. 26-36.
10. Атомная энергетика нового поколения: радиологическая состоятельность и экологические преимущества /под общ. ред. В.К. Иванова, Е.О. Адамова. М.: Изд-во «Перо», 2019. 379 с.

Achievability of radiological equivalence associated with closed nuclear fuel cycle with fast reactors: impact of uncertainty factors in scenarios of Russian nuclear power development through to 2100. Part 1. Fast and thermal reactors

Ivanov V.K.^{1,2}, Lopatkin A.V.², Menyajlo A.N.¹, Spirin E.V.², Chekin S.Yu.¹,
Lovachev S.S.¹, Korelo A.M.¹, Solomatin V.M.²

¹ A. Tsyb MRRC, Obninsk;

² Joint Stock Company PRORYV, Moscow

The Russian Government approved the Energy Strategy of the Russian Federation (Government Decree No.1523-r of June 9, 2020). The Strategy envisages the use of both thermal (TR) and fast (FR) reactors. The Strategy points out that the problems of nuclear power are associated with potential high expenses for irradiated fuel and radioactive wastes management. The previously designed model of the Russian nuclear energy development suggested that fast reactors only would operate at NPPs after 2010. Radiological equivalence, expressed as the equivalence of lifetime radiation risks to the public from radioactive wastes and from primary uranium ore, was shown to be achieved after 100-year storage. The burnup of ²⁴¹Am, ²³⁷Np и ²⁴²Cm in closed nuclear fuel cycle with fast reactors is a key part in the achievability of radiation risks equivalence. Scenarios of the Russian nuclear energy development through to 2100 with account of uncertainty factors in the measurement of contribution of fast and thermal reactors to the electric energy production are considered in the paper. The following three scenarios were developed: uncertainty is replaced by FRs; uncertainty is replaced by TRs; 50 per cent of FRs and 50 per cent of TRs replace uncertainty. If the energy is produced by fast reactors only (scenario 1) radiological equivalence was found to be achieved in 412 years. In two other scenarios radiological equivalence will be achieved after more than 1000 years. Contribution of main dose-forming radionuclides and relevant ratios of potential biological hazards is included in models regardless of whether uncertainty in nuclear energy development is taking or not taking into account. Results of the study of conditions for radiological equivalence achievement should be used for amending Strategic plan of Russian nuclear power development through to 2100 that meets requirements of radiation ecology and radiation protection of the public.

Key words: *the Energy strategy, development of nuclear energy through to 2100, radiological equivalence, radiation equivalence, IAEA safety standards, scenarios of nuclear power development through to 2100, condition for radiological equivalence achievement.*

References

1. Fundamental safety principles. IAEA Safety Standards Series, N SF-1. Vienna, IAEA, 2007. 23 p. (In Russian).
2. ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. *Ann. ICRP*, 2007, vol. 37, no. 2-4, pp. 1-332.
3. Preston D.L., Kusumi S., Tomonaga M., Izumi S., Ron E., Kuramoto A., Kamada N., Dohy H., Matsuo T., Nonaka H., Thompson D.E., Soda M., Mabuchi K. Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part III: Leukemia, lymphoma and multiple myeloma, 1950-1987. *Radiat. Res.*, 1994, vol. 137 (2 Suppl.), pp. 68-97.
4. Preston D.L., Shimizu Y., Pierce D.A., Suyama A., Mabuchi K. Studies of mortality of atomic bomb survivors. Report 13: Solid cancer and noncancer disease mortality: 1950-1997. *Radiat. Res.*, 2003, vol. 160, no. 4, pp. 381-407.
5. Preston D.L., Ron E., Tokuoka S., Funamoto S., Nishi N., Soda M., Mabuchi K., Kodama K. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998. *Radiat. Res.*, 2007, vol. 168, no. 1, pp. 1-64.

Ivanov V.K. – Scientific Advisor of NRER, Chief Radioecologist of Project PRORYV, Chairman of RSCR, Corresponding Member of RAS, D. Sc., Tech.; Menyajlo A.N. – Senior Researcher, C. Sc., Biol.; Chekin S.Yu.* – Head of Lab.; Lovachev S.S. – Research Assistant; Korelo A.M. – Senior Researcher. A. Tsyb MRRC. Lopatkin A.V. – Research Advisor for RE, D. Sc., Tech.; Spirin E.V. – Chief Researcher of the Dep. of the Chief Radioecologist, Project PRORYV, D. Sc., Biol.; Solomatin V.M. – Head of Dep. of the Chief Radioecologist, Project PRORYV, C. Sc., Biol. JSC PRORYV.

*Contacts: 4 Korolyov str., Obninsk, Kaluga region, Russia, 249035. Tel.: (484) 399-30-79; e-mail: nrer@obninsk.com.

6. **Adamov E.O., Ganev I.Kh.** Environmentally pure nuclear power. Moscow, N. Dollezhal PERDI, 2007. 145 p. (In Russian).
7. **Lopatkin A.V.** Radiation-equivalent treatment of radioactive waste. Technical reference 01.2017 NRRE. Moscow, 2017. 21 p. (In Russian).
8. **Ivanov V.K., Chekin S.Yu., Menyajlo A.N., Maksioutov M.A., Tumanov K.A., Kashcheeva P.V., Lovachev S.S., Adamov E.O., Lopatkin A.V.** Application of the radiation equivalence principle to estimation of levels of radiological protection of the population: risk-oriented approach. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2018, vol. 27, no. 3, pp. 9-23. (In Russian).
9. **Menyajlo A.N., Lovachev S.S., Chekin S.Yu., Ivanov V.K.** Assessment of radiation risks from spent nuclear fuel depending on composition of radionuclides and radiation dose distribution in organs. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2019, vol. 28, no. 1, pp. 26-36. (In Russian).
10. New generation nuclear power: radiological viability and environmental benefits. Eds.: V.K. Ivanov, E.O. Adamov. Moscow, Pero, 2019. 379 p. (In Russian).