DOI: 10.21870/0131-3878-2019-28-4-129-136

УДК 504.054:612.039.76

Сравнительная оценка радиационного воздействия на биоту и население в идентичных радиэкологических условиях в зоне влияния хранилища радиоактивных отходов

Лаврентьева Г.В.^{1,2}, Сынзыныс Б.И.², Мирзеабасов О.А.²

¹ Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калуга;

² ИАТЭ – филиал ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Обнинск

Целью данной работы является проведение оценки радиационного воздействия на население и биоту идентичных радиэкологических условий посредством индексов радиационного воздействия с учётом критических дозовых нагрузок на биоту, рекомендованных в рамках проекта ERICA и полученных в собственных натурных исследованиях при анализе изменения референтных показателей наземного моллюска улитка кустарниковая *F.fruticum*. Оценку дозовых нагрузок проводили на население и биоту, находящиеся в зоне влияния хранилища РАО после разгерметизации одной из ёмкостей. Оценку дозы облучения населения осуществляли на основании методологии, предложенной МАГАТЭ, учитывая сценарий «утечка жидкости». Суммарная доза облучения населения от множественных путей поступления радионуклидов в организм человека составляет 4,0Е-04 Зв/год. Мощность поглощённой дозы облучения наземного моллюска, рассчитанная методом Монте-Карло, составляет 76±9 мГр/год. Сравнительную оценку воздействия радиационного фактора на население и представителя биоты проводили посредством индексов радиационного воздействия. Сценарий «утечка жидкости» создаёт радиэкологическую обстановку на изучаемой территории, при которой человек является защищённым от радиационного воздействия. Наземный моллюск с учётом критических нагрузок, полученных при проведении натурных экспериментов, является не защищённым, а при учёте предела мощности дозы, предложенного проектом ERICA, – защищённым. Установлено, что на изучаемой территории представитель биоты подвергается наибольшему радиационному воздействию, чем человек, при учёте критических дозовых нагрузок, полученных нами в натурных экспериментах и рекомендуемых на международном уровне. Таким образом, необходимо расширять анализ ситуаций, когда потенциально нарушается антропоцентрический принцип в системе радиационной защиты и превалирует эоцентрический подход.

Ключевые слова: индекс радиационного воздействия, критическая дозовая нагрузка, биота, моллюск *F.fruticum*, доза облучения, облучение, хранилище радиоактивных отходов, утечка жидкости, эоцентрическая концепция, ERICA.

Введение

В настоящее время, учитывая возможное неэквидозное облучение человека и биоты, требуется гармонизация подходов обеспечения радиационной безопасности окружающей среды [1]. При этом возникает необходимость гармонизации оценок воздействия радиационного фактора на человека и биоту. Однако до сих пор нет единых международных норм, критических дозовых нагрузок для биоты. Например, в рамках проекта ERICA рекомендован безопасный предел 10 мГр/ч, который предназначен для всех групп организмов [2]. МКРЗ в Публикации 108 [3] дифференцирует представителей биоты и рекомендует следующие безопасные уровни воздействия ионизирующего излучения: для млекопитающих, позвоночных животных и сосны обыкновенной – 0,1-1,0 мГр/сут, а для растений и беспозвоночных животных – 10-100 мГр/сут. Дифференцированный подход также был предложен Министерством энергетики США [4]:

Лаврентьева Г.В.* – доцент, к.б.н. КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана, ИАТЭ НИЯУ МИФИ. Сынзыныс Б.И. – д.б.н., проф.; Мирзеабасов О.А. – доцент, к.т.н. ИАТЭ НИЯУ МИФИ.

*Контакты: 248000, Калужская обл., Калуга, ул. Баженова, 2. Тел. +7 (4842) 77-45-05; e-mail: Lavrentyeva_G@list.ru.

для водных животных и наземных растений дозовым пределом является 10 мГр/сут, а для наземных животных – 1 мГр/сут. Анализ рекомендуемых международными организациями безопасных пределов облучения биоты показывает, что минимальные уровни колеблются в пределах 4-40 мкГр/ч.

В связи с вышесказанным возникает ряд неопределённостей при оценке радиационного воздействия на человека и биоту в одинаковых радиоэкологических условиях, т.е. обитающих на одной территории.

Целью данной работы является проведение оценки радиационного воздействия на население и биоту идентичных радиоэкологических условий посредством индексов радиационного воздействия с учётом критических дозовых нагрузок на биоту, рекомендованных в рамках проекта ERICA и полученных в собственных натурных исследованиях при анализе изменения референтных показателей наземного моллюска улитка кустарниковая *F.fruticum*.

Оценку дозовых нагрузок проводили на население и биоту, находящихся в радиоэкологических условиях, сложившихся после разгерметизации ёмкости хранилища радиоактивных отходов (РАО) в 1998 г. на севере Калужской области [5]. На территории сформировался источник радиоактивного загрязнения и регистрируется поступление ^{90}Sr и ^{137}Cs в прилегающие экосистемы.

Материалы и методы

Оценку дозы облучения населения проводили на основании методологии, предложенной МАГАТЭ [6]. В соответствии с методологией оценки доз для населения от воздействия хранилища РАО использовали сценарий поступления радионуклидов в окружающую среду – «утечка жидкости» – утечка жидкости из хранилища траншейного типа. Сценарий учитывает поступление радиоактивных вод в окружающую среду от некондиционированных отходов в хранилище при штатном режиме работы. При утечке радиоактивных вод из хранилища дождевая вода инфильтруется через отходы, а затем попадает со сточными водами в дренажную систему. Из дренажной системы загрязнённый водный поток устремляется в локальный водный объект. Потоки загрязнённых вод могут попасть в окружающую среду и подвергнуть загрязнению близлежащие территории. С одной стороны, этот сценарий является наиболее вероятным для хранилищ радиоактивных отходов, которые были созданы в 50-60-е гг. прошлого столетия и не обладают совершенным проектным планом, безопасным местоположением для хранения РАО. С другой стороны, выбранный сценарий в наибольшей степени характеризует реальную картину поступления активности от исследуемого хранилища РАО в окружающую среду.

Дозовые нагрузки рассчитывались для населения, проживающего постоянно или ведущего сельскохозяйственную деятельность вблизи хранилища РАО. Дозы для персонала не рассматривались ввиду его крайней малочисленности. Для расчётов были использованы параметры, полученные при проведении мониторинговых работ изучаемой территории [7], и параметры, рекомендуемые методикой [6].

Расчёт суммарной дозы на население для данного сценария проводился по формуле:

$$Dose = Dose_{ing,i} + Dose_{inh,i} + Dose_{ext,i}, \quad (1)$$

где $Dose_{ing,i}$ – годовая доза внутреннего облучения населения от поступления радионуклида с пищевыми продуктами и водой (вклад i -го радионуклида, содержащегося в загрязнённой почве), Зв/год; $Dose_{inh,i}$ – годовая доза внутреннего облучения населения за счёт ингаляции от пы-

ли (вклад i -го радионуклида, содержащегося в почве), Зв/год; $Dose_{ext,i}$ – годовая доза внешнего облучения населения, включающая облучение от загрязнённой радионуклидом поверхности земли (вклад i -го радионуклида, содержащегося в почве), Зв/год.

Мощность поглощённой дозы облучения для наземного моллюска, обитающего на территории расположения хранилища радиоактивных отходов, определили посредством метода Монте-Карло [8]. Для расчёта с использованием пакета MCNP были разработаны материальная и геометрическая модели моллюска. Материальная модель учитывает состав раковины ($CaCO_3$) и её плотность. Состав мягкой ткани моллюска представлен 4-компонентной системой ICRU плотностью 1 г/см^3 – модельной биологической тканью для дозиметрических работ. Геометрическая модель представлена подобранными параметрами: моллюск представлен геометрией шара, радиус шара 1 см; раковина моллюска имеет геометрию сферического слоя, толщина слоя $25 \cdot 10^{-4}$ см; масса моллюска (средняя масса моллюсков, обитающих на территории расположения хранилища РАО) – 7,2 г; масса раковины моллюска (средняя масса раковин моллюсков, обитающих на исследуемой территории) – 2,7 г. При расчёте мощности поглощённой дозы облучения учитывались все возможные сценарии облучения животного, а именно сценарий «самооблучение организма»; сценарий «обитание моллюска на поверхности почвы»; сценарий «облучение моллюска в состоянии анабиоза при зарывании моллюска в почву»; сценарий «облучение моллюска от крапивы при обитании на растительности в вегетационный период». Для расчёта мощности дозы облучения моллюска от излучения ^{90}Sr и его дочернего радионуклида ^{90}Y были решены задачи переноса излучений β - и γ -источника.

Результаты и обсуждение

В настоящее время дискуссионным аспектом в радиобиологических исследованиях является экокентрическая парадигма защиты окружающей среды, что требует оценки радиационного воздействия на биоту и человека, обитающих на одной территории, т.е. в идентичных радиоэкологических условиях. Для этих целей в ряде исследований [9-11] применяют индекс радиационного воздействия $RIF_{h,b}$, который рассчитывали по формулам:

$$RIF_h = \frac{D_h}{CDV_h}, \quad (2)$$

$$RIF_b = \frac{D_b}{CDV_b}, \quad (3)$$

где D_h – доза облучения человека, Зв; D_b – доза облучения биологического объекта, Гр; CDV_h – критическая дозовая нагрузка для человека, Зв; CDV_b – критическая дозовая нагрузка для биоты, Гр.

Если $RIF_{h,b} < 1$, то человека/биоту можно считать защищёнными от воздействия ионизирующих излучений, если $RIF_{h,b} > 1$ – не защищёнными. При сопоставлении индексов радиационного воздействия представляется возможным провести сравнительную оценку влияния аварийной ситуации «утечка жидкости» на хранилище РАО на биоту и человека. При этом, если $RIF_h > RIF_b$, то воздействие радиоэкологических условий на биоту меньше, чем на человека.

Таким образом, для проведения сравнительного анализа радиационного воздействия на население и биоту необходимо оценить соответствующие дозовые нагрузки и индексы радиационного воздействия. В рамках данной работы были рассчитаны дозы облучения населения при реализации сценария «утечка жидкости» на хранилище РАО.

Проведенные расчёты дозы облучения населения от множественных путей поступления радионуклидов в организм человека показали, что суммарная доза облучения составляет $4,0\text{E-}04$ Зв/год (табл. 1). При этом основной вклад в дозу для населения вносит пероральный путь поступления ^{90}Sr в организм с продуктами питания и водой [12].

Таблица 1

Доза облучения населения для сценария «утечка жидкости»

Радионуклид	Доза внутреннего облучения от продуктов питания, Зв/год	Доза внутреннего облучения от ингаляции, Зв/год	Доза внешнего облучения от поверхности почвы, Зв/год	Полная доза облучения населения, Зв/год
^{137}Cs	$2,1\text{E-}07$	$2,6\text{E-}11$	$2,6\text{E-}07$	$4,7\text{E-}07$
^{90}Sr	$4,0\text{E-}04$	$1,2\text{E-}09$	$1,1\text{E-}06$	$4,0\text{E-}04$

Для определения индекса радиационного воздействия для населения за критическую дозовую нагрузку (CDV_h) принимался предел дозы для населения 1 мЗв/год , регламентируемый в [13], в качестве дозы облучения (D_h) применялось рассчитанное значение дозы облучения населения – $4,0\text{E-}04$ Зв/год. Индекс радиационного воздействия для населения RIF_h составляет величину $0,4$. На основании рассчитанного индекса радиационного воздействия можно заключить, что сценарий «утечка жидкости» создаёт радиоэкологическую обстановку на изучаемой территории, при которой человек является защищённым от радиационного воздействия, т.к. $RIF_h < 1$.

Расчёт индексов радиационного воздействия для наземного моллюска является более дискуссионным, чем для человека из-за отсутствия однозначных критериев защиты окружающей среды от радиационного фактора, а значит и отсутствия обоснованного и общепринятого значения критической дозовой нагрузки для биоты (CDV_b). В связи с вышесказанным при проведении расчётов были использованы разные критические дозовые нагрузки (табл. 2).

В качестве CDV_b использованы установленные в рамках многолетних натурных экспериментов критические нагрузки для наземного моллюска [14]. Критические нагрузки были определены при анализе зависимостей «доза-эффект», учитывая изменение высоты раковины моллюска и уровня белков металлотиионенинов в зависимости от мощности поглощённой дозы облучения животного [14]. При изучении изменения высоты раковины установлена критическая дозовая нагрузка – 37 ± 6 мГр/год, при изучении уровня белков металлотиионенинов – $42,3 \pm 5,8$ мГр/год. Также в качестве показателя CDV_b принимался во внимание дозовый стандарт 10 мГр/ч ($87,6\text{ мГр/год}$) [2], принятый в рамках проекта ERICA. В качестве дозы облучения биологического объекта D_b принята максимальная мощность дозы облучения наземного моллюска, обитающего на изучаемой территории – 76 ± 9 мГр/год. Мощность поглощённой дозы облучения наземного моллюска была рассчитана посредством дозиметрической модели с использованием метода Монте-Карло [8].

На основании проведённых расчётов можно предположить, что наземный моллюск с учётом критических нагрузок, полученных при проведении натурных экспериментов, в сложившихся радиоэкологических условиях не является защищённым, т.к. индексы радиационного воздействия превышают 1 в среднем в 2 раза. Однако при учёте предела мощности дозы, предложенного проектом ERICA, изучаемый биологический объект является защищённым, т.к. $RIF_b < 1$.

Таблица 2

Индексы радиационного воздействия для наземного моллюска

Критическая дозовая нагрузка (CDV_b), мГр/год	Индекс радиационного воздействия (RIF_b)
37±6	2,1
42,3±,8	1,8
87,6	0,9

Анализ воздействия радиоактивно загрязнённой территории в районе расположения хранилища РАО на человека и биоту осуществлялся посредством сравнения индексов радиационного воздействия RIF_h и RIF_b . На основании рассчитанных индексов наземный моллюск *F.fruticum* на изучаемой территории подвергается наибольшему радиационному воздействию, чем человек. При этом индекс $RIF_b > RIF_h$ при учёте всех критических дозовых нагрузок как полученных нами в натурных экспериментах, так и рекомендуемых на международном уровне.

Следует отметить, что большее воздействие радиационного фактора на представителей биоты, чем на человека в идентичных радиоэкологических условиях, впервые было установлено на Южном Урале [1]. Аналогичный вывод был также отмечен и в регионе аварии на Чернобыльской АЭС, где превышение доз облучения представителей флоры и фауны превышало дозы облучения для человека в 30-120 раз [1].

Заключение

На основании проведённой сравнительной оценки радиационного воздействия на население и представителя биоты идентичных радиоэкологических условий, сложившихся при разгерметизации ёмкости хранилища РАО, можно сделать вывод о большем влиянии радиационного фактора на наземного моллюска, чем на человека.

Полученные оценки ставят под сомнение антропоцентрический принцип «если защищён человек, то защищена и биота», что в свою очередь обсуждается многими учёными и авторитетными международными организациями в области защиты окружающей среды от радиационного фактора. При этом необходимо расширять анализ ситуаций, когда потенциально нарушается антропоцентрический принцип в системе радиационной защиты и превалирует экоцентрический подход, в том числе и с учётом представителей биоты, не включённых в список «условных (референтных) животных и растений» [3].

Литература

1. **Алексахин Р.М.** Проблемы радиоэкологии: Эволюция идей. Итоги. М.: РАСХН, 2006. 880 с.
2. ERICA. Environmental Risk from Ionizing Contaminants: Assessment and Management. Developed under EU 6th Framework Programme. Contract No. FI6R-CT-2004-508847. 2003.
3. ICRP, 2008. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. ICRP Publication 108 //Ann. ICRP. 2008. V. 38, N 4-6. 234 p.
4. U.S. DOE-STD-1153-2002. A graded approach for evaluation radiation doses to aquatic and terrestrial biota. Washington: US Department of energy, 2002. 234 p. [Электронный ресурс]. URL: https://www.standards.doe.gov/standards-documents/1100/1153-AStd-2002/@_images/file (дата обращения 11.11.2019).
5. **Ястребков А.Ю., Захарова Е.В., Каменский К.А.** Оценка воздействия приповерхностного хранилища радиоактивных отходов ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» на геологическую среду //Разведка и охрана недр. 2014. № 3. С. 56-62.
6. Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities IAEA-TECDOC-1380. Vienna: IAEA, 2003. 145 p.
7. **Лаврентьева Г.В., Мирзеабасов О.А., Сынзыныс Б.И.** Мониторинг радиоактивного загрязнения почв в зоне воздействия регионального приповерхностного хранилища радиоактивных отходов в стадии вывода из эксплуатации //Радиационная биология. Радиоэкология. 2017. Т. 57, № 3. С. 279-285.
8. **Лаврентьева Г.В., Гешель И.В., Кураченко Ю.А., Сынзыныс Б.И., Шошина Р.Р.** Радиационно-индуцированные изменения морфофизиологических показателей сухопутного моллюска вида *Bradybaena fruticum* в естественной среде обитания //Актуальные вопросы биомедицинской инженерии: сб. материалов VII Всероссийской научной конференции для молодых ученых, 23 октября-11 декабря 2017 г. Саратов: Саратовский государственный технический университет, 2018. С. 205-208.
9. **Спиридонов С.И., Алексахин Р.М., Фесенко С.В., Санжарова Н.И.** Чернобыль и окружающая среда //Радиационная биология. Радиоэкология. 2007. Т. 47, № 2. С. 196-203.
10. **Фесенко С.В., Алексахин Р.М., Санжарова Н.И., Спирин Е.В., Спиридонов С.И., Гонтаренко И.А., Стрэнд П.** Сравнительная оценка радиационного воздействия на биоту и человека в 30-километровой зоне Чернобыльской АЭС //Радиационная биология. Радиоэкология. 2004. Т. 44, № 6. С. 618-626.
11. **Баранов С.А., Спиридонов С.И., Мукушева М.К.** Применение радиационных рисков для оценки влияния радиоактивного загрязнения территории СИП на население //Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан. 2009. № 5. С. 48-54.
12. **Lavrentyeva G., Katkova M., Shoshina R., Synzynys B.** Risk assessment for human health and terrestrial ecosystem under chronic radioactive pollution near regional radioactive waste storage //J. Phys.: Conf. Ser. 2017. V. 784, N 1. P. 1-6.
13. 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.
14. **Лаврентьева Г.В., Мирзеабасов О.А., Сынзыныс Б.И., Гешель И.В.** Радиационный экологический риск для наземной экосистемы в зоне влияния хранилища радиоактивных отходов //Радиация и риск. 2018. Т. 27, № 4. С. 65-75.

Comparative assessment of radiation exposure to biota and population in identical radioecological conditions in the zone of influence of the radioactive waste storage

Lavrentyeva G.V.^{1,2}, Synzynys B.I.², Mirzeabasov O.A.²

¹ Bauman Moscow State Technical University (Kaluga Branch), Kaluga;

² Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, Obninsk

This article presents analysis of radiation impact factors (RIF) to human and biota species habiting the same area. RIF is expressed as the ratio of actual radiation doses to human and non-human biota to critical dose. To calculate RIFs, critical doses given in the ERICA project and doses measured by authors during field experimental studies of radiation effects on reference doses to terrestrial mollusk *F.fruticum*. The source of radioactive contamination of the area under study is the area around the radioactive waste storage contaminated as a result of depressurization failure of a storage facility. Radiation doses to the public and non-human biota habiting the contaminated area were estimated. For evaluating human radiation exposure the approach applied to IAEA scenario "fluid leak" was used. Annual total radiation doses to the public formed by radionuclides entered a human body is $4.0E-04$ Sv/year. Absorbed dose rate to the terrestrial mollusk, calculated with Monte-Carlo method, is 76 ± 9 mGy/year. The scenario "fluid leak" creates a radioecological situation in the study area, in which a human is protected from radiation exposure. The mollusk, objects of the field studies, exposed to critical doses, are not protected, however, the mollusk exposed to radiation at dose rate limit, proposed by the ERICA, are protected. Results of the experimental study demonstrates that RIF values calculated with the use of experimental data and data recommended by international organizations for non-human species are higher than RIF values for human. The results of analysis allow authors to make the following conclusion: much more radioecological situations, in which the anthropocentric principle in the radiation protection system can be invalid and the ecocentric approach can be valid, should be subjected to analysis.

Key words: radiation exposure index, critical dose, biota, mollusk *F.fruticum*, radiation dose, irradiation, radioactive waste storage, liquid leakage, ecocentric concept, ERICA.

References

1. **Aleksakhin R.M.** Problemy radioekologii: Evolyutsiya idey. Itogi [Problems of radioecology: the evolution of ideas. The results]. Moscow, RAAS, 2006. 880 p.
2. ERICA. Environmental Risk from Ionizing Contaminants: Assessment and Management. Developed under EU 6th Framework Programme. Contract No. FI6R-CT-2004-508847. 2003.
3. ICRP, 2008. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. ICRP Publication 108. *Ann. ICRP*, 2008, vol. 38, no. 4-6, 234 p.
4. U.S. DOE-STD-1153-2002. A graded approach for evaluation radiation doses to aquatic and terrestrial biota. Washington, US Department of energy, 2002. 234 p. Available at: <https://www.standards.doe.gov/standards-documents/1100/1153-AStd-2002/@@@images/file> (Accessed 11.11.2019).
5. **Yastrebkov A.Yu., Zakharova E.V., Kamenskiy K.A.** Geological environment impact assessment of the near-surface radioactive waste storage facility of the IPPE. *Razvedka i okhrana nedr – Prospect and Protection of Mineral Resources*, 2014, no. 3, pp. 56-62. (In Russian).
6. Derivation of activity limits for the disposal of radioactive waste in near surface disposal facilities IAEA-TECDOC-1380. Vienna, IAEA, 2003. 145 p.
7. **Lavrentyeva G.V., Mirzeabasov O.A., Synzynys B.I.** Monitoring of radioactive pollution of soils in the zone of influence of regional near surface storage of radioactive waste in the closure process. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology*, 2017, vol. 57, no. 3, pp. 279-285. (In Russian).

Lavrentyeva G.V.* – Associate Prof., C. Sc., Biol. BMSTU (KB), IATE MEPhI. Synzynys B.I. – D. Sc., Biol., Prof., Mirzeabasov O.A. – Associate Prof., C. Sc., Tech. IATE MEPhI.

*Contacts: 2 Bazhenova str., Kaluga, Kaluga region, Russia, 248000. Tel. +7(4842) 77-45-05; e-mail: Lavrentyeva_G@list.ru.

8. **Lavrentyeva G.V., Geshel' I.V., Kurachenko YU.A., Synzynys B.I., Shoshina R.R.** Radiation-induced changes in the morphophysiological parameters of the land mollusk of the species *Bradybaena fruticum* in the natural habitat. *Sbornik materialov VII Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii dlya molodykh uchenykh "Aktual'nyye voprosy biomeditsinskoy inzhenerii"* [Collection of materials of the VII All-Russian Scientific Conference for Young Scientists "Actual issues of biomedical engineering"]. Saratov, SSTU, 2018, pp. 205-208. (In Russian).
9. **Spiridonov C.I., Aleksakhin R.M., Fesenko S.V., Sanzharova N.I.** Chernobyl and the environment. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology*, 2007. vol. 47, no. 2, pp. 196-203. (In Russian).
10. **Fesenko S.V., Aleksakhin R.M., Sanzharova N.I., Spirin E.V., Spiridonov S.I., Gontarenko I.A., Strend P.** Comparative assessment of radiation exposure on biota and humans in the 30-km zone of the Chernobyl nuclear power plant. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology*, 2004, vol. 44, no. 6, pp. 618-626. (In Russian).
11. **Baranov S.A., Spiridonov S.I., Mukusheva M.K.** Primeneniye radiatsionnykh riskov dlya otsenki vliyaniya radioaktivnogo zagryazneniya territorii SIP na naseleniye [The use of radiation risks to assess the impact of radioactive contamination of the SIP territory on the population]. *Vestnik Natsional'noy akademii nauk Respubliki Kazakhstan – Bulletin of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, 2009, no. 5, pp. 48-54.
12. **Lavrentyeva G., Katkova M., Shoshina R., Synzynys B.** Risk assessment for human health and terrestrial ecosystem under chronic radioactive pollution near regional radioactive waste storage. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2017, vol. 784, no. 1, pp. 1-6.
13. *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).
14. **Lavrentyeva G.V., Mirzeabasov O.A., Synzynys B.I., Geshel I.V.** Radiation ecological risk for the terrestrial ecosystem in the zone close to the radioactive waste storage facility. *Radiatsiya i risk – Radiation and Risk*, 2018, vol. 27, no. 4, pp. 65-75. (In Russian).