

УДК 621.039:502.1

РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА: ПРОБЛЕМЫ И РЕШЕНИЯ

И. Г. ТАНАНАЕВ¹⁾, В. А. АВРАМЕНКО¹⁾

¹⁾Дальневосточный федеральный университет, пос. Аякс, 10, 690922, о. Русский, Владивосток, Россия

Дальний Восток – форпост Российской Федерации в Азиатско-тихоокеанском регионе, основными современными приоритетами которого являются развитие промышленно-хозяйственной и социально-экономической деятельности региона в условиях освоения сырьевых ресурсов, создание новых рабочих мест и увеличение народонаселения в среде безопасного и комфортного проживания с гарантией обеспечения экологической и радиационной безопасности. Ученые из ДВФУ и ДВО РАН за счет проведения систематических исследований и практических разработок обеспечили научное сопровождение процессов окончательного удаления накопленных ЖРО, очистки и реабилитации загрязненных радионуклидами и токсичными элементами природных объектов. Это позволило ликвидировать потенциальную угрозу экологических и техногенных аварий на Дальнем Востоке. Синтезированы и внедрены новые магнитные материалы на основе высокопористых природных минералоподобных носителей, резорцинформальдегидные смолы, количественно извлекающие опасные радионуклиды из морской воды. Разработана технология с активным гидродинамическим режимом для переработки ЖРО, содержащих морскую воду и нефтепродукты. На АО «ДВЗ «Звезда» создаются опытно-промышленные установки по производству сорбционно-реагентных материалов по утилизации сложных ЖРО. Таким образом, преодолев ядерное наследие в Приморье, учеными из ДВФУ и ДВО РАН удалось обеспечить радиационную безопасность на предприятиях с использованием атомной энергии.

Ключевые слова: Дальний Восток; радиоэкология; атомные подводные лодки; ядерно-энергетические установки; утилизация, отработавшее ядерное топливо; жидкие радиоактивные отходы; радиационно-опасные объекты; наноструктурированные неорганические сорбенты; сорбционно-реагентные технологии; морская вода; радионуклиды; стронций-90; цезий-137.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Постановление Правительства № 218 от 9 апреля 2010 г., договор № 02.G25.31.0166 от 1 декабря 2015 г. между акционерным обществом «Дальневосточный завод «Звезда» и Министерством образования и науки Российской Федерации).

RADIATION SECURITY OF THE FAR EAST: PROBLEMS AND SOLUTIONS

I. G. TANANAEV^a, V. A. AVRAMENKO^a

^aFar Eastern Federal University, Ajax, 10, 690922, Russky Island, Vladivostok, Russia

Corresponding author: geokhi@mail.ru

Образец цитирования:

Тананаев И. Г., Авраменко В. А. Радиационная безопасность дальнего востока: проблемы и решения // Журн. Белорус. гос. ун-та. Экология. 2017. № 4. С. 33–39.

For citation:

Tananaeva I. G., Avramenko V. A. Radiation security of the far east: problems and solutions. *J. Belarus. State Univ. Ecol.* 2017. No. 4. P. 33–39 (in Russ.).

Авторы:

Иван Гундарович Тананаев – доктор химических наук, профессор, член-корреспондент РАН; директор академического департамента ядерных технологий Школы естественных наук (в ДВФУ), главный научный сотрудник (ИХ ДВО РАН).

Валентин Александрович Авраменко – доктор химических наук, профессор, член-корреспондент РАН; заместитель директора Школы естественных наук (ДВФУ), начальник отдела сорбционных процессов (ИХ ДВО РАН).

Authors:

Ivan G. Tananaev, doctor of science (chemistry), professor, corresponding member of RAS; director of nuclear technology department of the school of natural sciences (FEFU); chief scientific researcher (ICh FEB RAS).

geokhi@mail.ru

Valentin A. Avramenko, doctor of science (chemistry), professor, corresponding member of RAS; deputy director of the school of natural sciences (FEFU), head of the department of sorption processes (THEIR FEB RAS).

chemi@ich.dvo.ru

The Far East is an outpost of the Russian Federation in the Asia-Pacific region, the main modern priorities of which are the development of the industrial and economic and social and economic activities of the region in terms of developing raw materials, creating new jobs and increasing population in safe and comfortable environments, and radiation safety. Scientists from FEFU and FEB RAS, through systematic studies and practical developments, provided scientific support for the final disposal of accumulated LRW, treatment and rehabilitation of natural objects contaminated with radionuclides and toxic elements, which helped to eliminate the potential threat of ecological and technogenic accidents in the Far East. New magnetic materials based on highly porous natural mineral-like carriers, resorcinol-formaldehyde resins, quantitatively extracting dangerous radionuclides from sea water, have been synthesized and introduced. A technology with an active hydrodynamic regime for processing LRW containing sea water and oil products has been developed. Experimental-industrial plants for the production of sorption-reagent materials, for the utilization of complex LRW are being set up at JSC «DVZ «Zvezda». Thus, having overcome nuclear legacy in Primorye, scientists from FEFU and FEB RAS managed to ensure radiation safety at enterprises using atomic energy.

Key words: Far East; radioecology; nuclear submarines; nuclear power plants; utilization, spent nuclear fuel; liquid radioactive waste; radiation-hazardous objects; nanostructured inorganic sorbents; sorption-reagent technologies; sea water; radionuclides; strontium-90; cesium-137.

Acknowledgment. The work is performed with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Government decree No. 02G25.31.0166 dated December 1, 2015, between stock company «Dalnevostochny Zavod «Zvezda» and the Ministry of Education and Science of the Russian Federation).

Введение

Дальний Восток является форпостом Российской Федерации в Азиатско-тихоокеанском регионе (АТР). Основные современные приоритеты Дальнего Востока сегодня – это развитие промышленно-хозяйственной и социально-экономической деятельности региона в условиях освоения сырьевых ресурсов, в том числе биоресурсов; создание новых рабочих мест и увеличение народонаселения в среде безопасного и комфортного проживания. В результате систематической правительственной поддержки Дальнего Востока город Владивосток и 15 районов Приморского края были наделены статусом открытого порта, ведется планомерная работа по экономическому развитию региона. Вместе с тем расширение экономической свободы и предоставление для отечественных инвесторов лучших условий для ведения бизнеса возможно только в условиях обеспечения экологической и радиационной безопасности территории Приморского края.

Основными радиационными объектами Дальнего Востока являются атомные подводные лодки (АПЛ) с ядерно-энергетическими установками (ЯЭУ); надводные корабли (НК) с ЯЭУ; суда атомного технологического обслуживания (АТО), в том числе плавучие мастерские (ПМ), хранившие ранее отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) и радиоактивные отходы (РАО); береговые технические базы Военно-Морского Флота (БТБ ВМФ), судоремонтные заводы, где производится утилизация АПЛ, НК и АТО, пункт временного хранения реакторных отсеков на плаву (ПВХ), береговой пункт длительного хранения РАО и аварийных АПЛ, а также радиоизотопные термоэлектрические генераторы и иные источники ионизирующего излучения (ИИИ).

Первоочередные задачи гарантированного обеспечения их радиационной безопасности – это утилизация АПЛ и НК с ЯЭУ; реабилитация бывших БТБ ВМФ, включая ПВХ; вывод ОЯТ АПЛ на переработку; утилизация накопленных РАО; обращение с радиационно-опасными объектами без утилизации. Кроме того, в связи с опасностью использования ИИИ, радиоактивных материалов и объектов с ЯЭУ в террористических целях, потребовалось решать задачи усиления физической защиты, осуществления радиационного мониторинга и аварийного реагирования. Ниже приведены основные результаты, приведшие к достижению радиационной безопасности территории Дальнего Востока.

Результаты исследования и их обсуждение

Утилизация АПЛ. Вывод АПЛ из состава ВМФ с последующей комплексной утилизацией начался в 1986 г. Предполагалось завершить вывод всех АПЛ устаревших проектов, отслуживших установленные сроки, в течение 5–6 лет. В ходе работы к 1990-м гг. XX века стало ясно, что промышленность не готова к выполнению поставленных задач, и утилизационные работы превратились в задачу государственного масштаба. Лавинообразное накопление в процессе утилизации АПЛ и НК большого числа радиационно-опасных объектов (ЯЭУ, ОЯТ, РАО) представляло угрозу для окружающей среды. К концу 1997 г. во всех пунктах отстоя находилось 157 АПЛ, значительная часть которых хранились с ОЯТ на борту, а более 30 имели повреждения с потерей плавучести. Скорость утилизации составляла 2 АПЛ в год, а стоимость ее содержания 4–5 млрд руб. в год (в ценах 1997–1998 гг.). Объемы же накопленных

ОЯТ и РАО превышали возможности мест хранения, при этом состояние объектов хранения не соответствовало изменившимся требованиям безопасности. С учетом активного вывода АПЛ из состава ВМФ можно было оценить срок завершения процесса от 40 лет [1]. С 1998 г. Постановлением Правительства Российской Федерации все функции государственного заказчика по комплексной утилизации АПЛ и техперсонала предприятия периметра ГК «Росатом», ученых Дальневосточного отделения Российской академии наук и вузов поставленные задачи были выполнены полностью. К 2017 г. из 203 выведенных из состава АПЛ ВМФ 197 уже утилизировано (с выгрузкой ОЯТ из реакторов), две находятся в стадии утилизации. На Дальнем Востоке начаты работы по утилизации большого атомного разведывательного корабля «Урал» и судна АТО «ПМ-124».

Обращение с реакторными отсеками. Обеспечение долговременного хранения реакторных отсеков списанных АПЛ – одно из важных направлений работ по ядерной и радиационной безопасности, связанных с ликвидацией опасного наследия. Технология их переработки на Дальнем Востоке состояла в герметизации, покрытии защитным составом и транспортировке в бухту «Разбойник» для контролируемого хранения в надводном положении. В дальнейшем блок извлекался из воды, боковые отсеки отрезались, реакторный отсек ставился на длительное 70-летнее хранение на береговую площадку. По плану 2017–2018 гг. в пункте долговременного хранения «Устричный» в Приморском крае предстоит разместить на долговременное хранение 24 реакторных отсека списанных АПЛ. В 2017 г. стартует не имеющий аналогов в мире проект по единовременной транспортировке 12 из 24 трехотсечных блоков АПЛ из Камчатского края в бухту «Разбойник» для разделки и долговременного хранения. Один трехотсечный блок весит в среднем 1 тыс. т, следовательно, можно представить себе масштаб операции [2].

Переработка ОЯТ АПЛ. Завершен проект по выводу к месту переработки отработанного ядерного топлива (ОЯТ) на Дальнем Востоке, что позволило ликвидировать потенциальную угрозу экологических и техногенных аварий в регионе. Всего с 2002 по 2014 г. из Приморского края полностью вывезен 41 эшелон с ОЯТ суммарной активностью 84 млн Ки с целью переработки на ФГУП «ПО «Маяк».

Обращение с РАО. Жидкие радиоактивные отходы, содержащие морскую воду (ЖРО с МВ), возникают в процессе эксплуатации, ремонта и утилизации судов с ЯЭУ в чрезвычайных ситуациях, а также при авариях на АЭС, расположенных в прибрежной зоне. Сложность переработки ЖРО, содержащих МВ, главным образом определяется тремя факторами: высоким солесодержанием, вплоть до 30 г/л; сложным радионуклидным составом, включающем трудноизвлекаемые радионуклиды и высокой активностью, требующей мер обеспечения защиты персонала на производстве.

Особенности химического состава ЖРО с МВ связана с ограничением выбора отработанных на практике методов обращения с ними: дистилляция, обратный осмос и ионный обмен за счет высокого солесодержания. В настоящее время накоплен значительный опыт по обращению с ЖРО с МВ на Дальнем Востоке РФ [3].

В действующие технологии выделения ^{137}Cs из ЖРО с МВ содержат как ионообменные, так и мембранные методы. На первой стадии, в связи с низкими коэффициентами очистки, требуется использование селективных сорбентов. Как правило, применяются ферроцианидные сорбенты, обладающие наибольшей селективностью к радионуклидам цезия на фоне больших концентраций ионов натрия и калия [4–6]. Различного рода цеолиты и цеолитоподобные сорбенты, к сожалению, показывают значительно меньшие коэффициенты разделения в МВ и не могут обеспечить глубокую очистку от радионуклидов цезия [7]. Применение таких материалов для одностадийной очистки ЖРО с МВ от радионуклидов цезия возможно лишь при невысокой активности отходов. В последнее время все большее значение стали приобретать селективные фенол- и резорцинформальдегидные смолы (РФС) [8–10], имеющие высокую селективность к радионуклидам цезия в области больших значений pH. Существенным преимуществом данных материалов является то, что сорбция радионуклидов цезия на них обратима и десорбцию можно легко осуществить лишь снижением pH регенерирующего раствора. Применение РФС для одностадийной очистки ЖРО с МВ от радионуклидов цезия возможно при невысокой радиоактивности.

Удаление ^{90}Sr из растворов с высоким содержанием солей жесткости до сих пор не может считаться до конца решенной проблемой. Факторы селективности Sr/Ca для подавляющего большинства селективных сорбентов составляют величины лишь от 1 до 10. Такая низкая селективность не обеспечивает высокой очистки от ^{90}Sr в растворах с высоким содержанием солей жесткости. Кроме того, в МВ существует ряд равновесий между сульфат- и бикарбонат ионами и ионами щелочноземельных металлов, включая радионуклиды стронция, осложняющих ионообменное равновесие ионит-раствор [4].

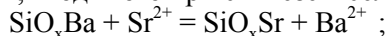
Наиболее перспективными сорбентами для выделения ^{90}Sr из МВ считались кристаллические силикотитанаты, получаемые методом гидротермального синтеза [11]. Однако они обладают большой емкостью по отношению не только к катионам Sr^{2+} , но и Ca^{2+} . В процессе поиска более перспективных

сорбционных материалов авторы указали на использование сорбционно-реагентных систем на основе аморфного силиката бария BaSiO_3 , который получается в результате золь-гель перехода, индуцированного введением ионов Ba^{2+} в раствор Na_2SiO_3 [12–14].

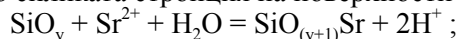
Само понятие сорбционно-реагентных систем (СРС) связано с протеканием химических реакций в ионообменных системах. Такие системы достаточно хорошо изучены (см. например, обзор [15]). В общем случае сорбционно-реагентными системами являются те, в которых извлечение радионуклида осуществляется одновременно за счет ионного обмена, необменной сорбции и соосаждения вещества на осадке, образующемся на поверхности и (или) в пористой среде, и (или) в объеме раствора.

Примерами таких систем, пригодных для сорбции ^{90}Sr [16], ^{60}Co или ^{57}Mn [17;18] из МВ являются BaMnO_4 в сульфатном растворе или активированный уголь в перманганатном растворе, в которых протекают процессы осаждения, соответственно, BaSO_4 или MnO_2 . Наиболее изученной сорбционно-реагентной системой является аморфный силикат бария BaSiO_3 , имеющий практическое применение для очистки МВ от радионуклидов стронция [19]. Реагент получается в результате золь-гель перехода, индуцированного введением ионов Ba^{2+} в раствор Na_2SiO_3 . Образующиеся высокопористые матрицы содержат большое количество обменных ионов бария, способных образовывать с сульфат-анионами нерастворимые осадки BaSO_4 , содержащимися в очищаемых растворах (МВ). Изменение условий золь-гель перехода и введение в золь модифицирующих добавок позволяет варьировать свойства получаемых матриц. Совокупность реакций, протекающих между раствором, содержащим сульфат ионы и аморфным силикатом бария, включает:

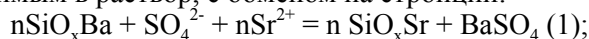
- ионный обмен стронция и бария, вводимого при синтезе в селективную матрицу:



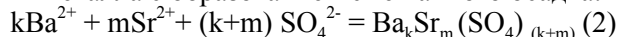
- образование нерастворимого силиката стронция на поверхности сорбента:



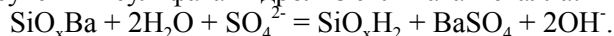
- образование слаборастворимого осадка сульфата бария с сульфат ионом, присутствующим в растворе или специально вводимым в раствор, с обменом на стронций:



- соосаждение стронция и металла с образованием смешанного осадка:



- и протекающий в присутствии сульфата гидролиз силиката металла:



Реакция силиката бария с сульфат-ионами раствора приводит к значительному изменению селективности извлечения стронция из растворов, содержащих ионы кальция, за счет протекания реакций (1) и (2). Более подробно процесс образования осадков в пористой среде силиката описан в [13].

К недостаткам BaSiO_3 относится низкая гидромеханическая прочность при использовании его в качестве получения композиционного материала, в котором активный компонент (BaSiO_3) переводится в гранулированную форму с использованием соответствующих связующих материалов [14].

Напротив, эффективная очистка от данных радионуклидов возможна методами соосаждения, например с гидратированной MnO_2 . В ДВФУ был получен сорбционный материал на основе оксида марганца, обладающего высокой избирательностью по отношению к ионам Sr^{2+} в морской воде и растворах-имитаторах. Среднее значение коэффициента распределения (K_r) ^{90}Sr составляет $2 \times 10^3 - 8 \times 10^3 \text{ см}^3/\text{г}$. Материал химически и механически устойчив для многократного использования в динамическом режиме сорбции-элюирования-регенерации. Сорбированный Sr^{2+} может быть элюирован раствором 0,5 М HCl с последующей регенерацией сорбента раствором 1,0 М NaOH . Показано, что в трех последовательных циклах сорбции – десорбции в указанных выше условиях величины полной динамической обменной емкости сорбента снижается от 0,21 до 0,16 мг-экв/г. Ресурс сорбента радионуклида (5 % проскока) превышает 150 колоночных объемов пропущенных растворов и не снижается в трех циклах сорбции – десорбции [20]. Полученный сорбционный материал может быть рекомендован для очистки ЖРО от ^{90}Sr сложного солевого состава, содержащего в том числе морскую воду.

Опыт переработки ЖРО, содержащих МВ, на предприятиях Дальнего Востока Российской Федерации. На ряде объектов, связанных с переработкой ЖРО, образующихся при эксплуатации, ремонте и утилизации НК и АПЛ с ЯЭУ Дальнего Востока, проводились испытания различных технологий переработки ЖРО, содержащих МВ.

Первой можно считать технологию, реализованную на станции переработки ЖРО на техническом танкере «Пинега» в 1995 г. (разработка ВНИИПИЭТ, Санкт-Петербург). Данная схема была опробована на ЖРО, содержащих до 10 % МВ, но в связи с трудностями эксплуатации установка в дальнейшем была законсервирована.

Особенностью работы технологической схемы установки «Ландыш» (разработка B&W NE, USA, 1999 г.) явился полный цикл обращения с ЖРО, включающий их кондиционирование (цементирование)

и упаковку вторичных радиоактивных отходов, образующихся в результате переработки. Опытные испытания, выполненные на ЖРО, содержащих 50 % МВ, показали общее сокращение объемов РАО при переработке ЖРО до ТРО в 14 раз. Однако заложенные при проектировании ограничения по емкости фильтров предварительной очистки, а также ограничения по биологической защите оборудования, не позволяют перерабатывать ЖРО с активностью $>10^5$ Бк/Л. Кроме того, высокое содержание Cl^- -ионов в МВ требует специальной тары для хранения отвержденных концентратов выпарной установки. К настоящему времени на упомянутой установке удалось переработать более 3000 м³ ЖРО с МВ.

С использованием установки «Шарья» (разработка АО «Экоатом», г. Сосновый Бор) на различных типах ЖРО с МВ с 1993 по 2000 г. было переработано более 5000 м³ ЖРО низкой солености. Различие технологической схемы от упомянутой отличается отсутствием стадии выпарки рассолов, приведшей к накоплению в ходе эксплуатации более 1000 м³ ЖРО – обратноточеского концентрата соленостью от 30 г/Л и активностью более 10^6 Бк/Л.

Для их переработки, а также утилизации ЖРО с МВ, была создана установка «Барьер», в которой применены новые сорбционно-реагентные материалы и селективные сорбенты (разработка ИХ ДВО РАН). На стадии предварительного снижения гамма-активности используются природные цеолиты, полная очистка от ^{137}Cs происходит на ферроцианидных фильтрах, очистка от ^{60}Co и трансурановых элементов (ТУЭ) – на сорбционно-реагентных фильтрах с дозировкой в ЖРО KMnO_4 . Основной фильтрационный узел, связанный с удалением ^{90}Sr , основан на фильтрах заполненных сорбционно-реагентным материалом на основе BaSiO_3 . На установке «Барьер» с 2000 г. по настоящее время переработано более 5000 м³ накопленные ЖРО с МВ различного состава, а также концентраты (рис.).



Рис. Опытная установка «Барьер» [18;19]

Fig. Test installation «Barjer» [18;19]

В 2016 г. на основании имеющейся литературы и опыта работы в области обращения с ЖРО сложного состава силами Института химии ДВО РАН и ДВФУ на АО «ДВЗ «Звезда» создана пилотная установка сорбционно-реагентной переработки ЖРО с МВ и нефтепродуктов на уровне, превосходящем известные передовые технологии переработки данного типа отходов. При этом используются ферроцианидные сорбенты и сорбционно-реагентные материалы, производимые ДВЦ «ДальРАО» по технологии, разработанной в Институте химии ДВО РАН.

Решение поставленной задачи было достигнуто с помощью применения наноструктурированных адсорбентов длительного использования, способных восстанавливать свою сорбционную активность посредством несложной регенерации. Кроме того, при повторном использовании очищенных вод и продуктов переработки ЖРО существенно сокращаются затраты на водопотребление и водоотведение. Вместе с тем соли тяжелых металлов имеют значительную ценность, а их извлечение и повторное использование из отработанных электролитов в производстве может дать значительный экономический эффект. В процессе ремонта и утилизации образующиеся ЖРО накапливаются в монжюсах соответствующих цехов ДВЗ «Звезда» и в плавучих емкостях ПЕК-50 и (или) планируемой к постройке емкости ПЕК-200. Пилотная установка имеет хорошую референтность при обращении с такого типами ЖРО на объектах ДВЦ «РосРАО» и состоит из двух модулей: модуль очистки ЖРО (МО) и модуль цементирования (МЦ), а также комплект транспортно-технологического оборудования. МО предназначен для выполнения очистки ЖРО от разнообразных загрязнений: механических; нефтепродуктов; коллоидных частиц с последующей очисткой от радионуклидов на сорбционных фильтрах и от химических загрязнений на установках обратного осмоса. МЦ предназначен для заключения в цементную матрицу отходов в виде рассола, получаемого на установках обратного осмоса.

Радиационный мониторинг и аварийное реагирование. Активно развивается радиационный мониторинг на территории Приморского края. В 2017 г. он осуществлялся уже на 33 пунктах Государственной наблюдательной сети (ГНС) Приморского УГМС. При этом на 20 станциях МЭД измерялась с помощью автоматических датчиков, входящих в состав автоматических метеорологических комплексов (АМК), а на 13 станциях измерения проводились с помощью дозиметров различной модификации.

На основании оценки источников поступления радиоактивных загрязнений путем атмосферного выпадения радионуклидов космического, искусственного и естественного происхождения, а также ввоза загрязненных товаров и транспортных средств в Приморский край, несанкционированного хранения радиоактивных предметов показано, что среднегодовые значения МЭД γ -излучения на период 2014–2017 гг. на станциях края варьировали в пределах 10–23 мкР/час, а на территории г. Владивостока 12–15 мкР/час, находясь в пределах естественного радиационного фона без превышения допустимых норм для населения, установленных СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)». Годовая эффективная доза облучения населения от всех источников ионизирующего излучения в расчете на 1 жителя составила $2,86 \text{ мЗв/год}$, что соответствует приемлемому уровню природного облучения (допустимая величина $5,0 \text{ мЗв/год}$).

Отмечается, что на территории Приморского края еще имеются отдельные локальные участки, оказывающие влияние на радиационную обстановку: зоны аварии АПЛ в бухте Чажма (1985 г.), места базирования атомных судов ТОФ и предприятия на побережье залива Петра Великого. В рамках реабилитации упомянутых загрязненных территорий ведется работа по улучшению радиационной обстановки.

С 2011 г. в атмосфере появились техногенные радионуклиды, поступившие с воздушными массами после аварии на АЭС «Фукусима-1». Однако случаев высокого радиоактивного загрязнения в течение года не зафиксировано.

В структуру коллективных доз облучения населения Приморского края по-прежнему наибольший вклад вносят природные и медицинские источники ионизирующего излучения (100 %). Среди доз, создаваемых за счет медицинского облучения, ведущее место занимают рентгенографические (38,7 %), компьютерная томография (26,2 %), исследования.

Отчет о реализации государственной программы Приморского края «Охрана окружающей среды Приморского края» размещен на странице департамента природных ресурсов и охраны окружающей среды Приморского края официального сайта Администрации Приморского края (www.primorsky.ru).

Заключение

Опыт очистки морской воды от опасных радионуклидов, а также промышленной переработки ЖРО, содержащих морскую воду, позволяет считать, что наиболее успешным для такой переработки является технология селективной сорбции. Используемая в настоящее время сорбционная технология переработки высокосолесных вод сложного химического состава, включая морскую воду, позволяет очищать среднеактивные ЖРО с активностью до 107 Бк/л до норм, позволяющих сбрасывать очищенные воды в акваторию (менее 102 Бк/л по радионуклидам ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co , менее 0,1 Бк/л по основным трансураниевым элементам). Опыт очистки морской воды от опасных радионуклидов, а также промышленной переработки ЖРО, содержащих морскую воду, позволяет считать, что наиболее успешным для такой переработки является технология селективной сорбции. При этом используются ферроцианидные сорбенты и сорбционно-реагентные материалы, производимые ДВЦ «ДальРАО» по технологии, разработанной в Институте химии ДВО РАН.

Библиографические ссылки

1. Ахунов А. Д. Двадцать лет упорного труда // Вопросы утилизации АПЛ: Бюл. ЗАО «Атомэнергоиздат». 2009. № 1 (17). С. 18–26.
2. Электронный ресурс. URL: <http://nuclear-submarine-decommissioning.ru> (дата обращения: 07.10.2017).
3. Horne R. A. *Marine Chemistry*. The Structure of Water and the Chemistry of the Hydrosphere. N. Y., 1969.
4. Harjula R., Lehto Y., Tusa E., et al. Industrial scale removal of cesium with hexacyanoferrate exchanger – process development. *Nucl. Technol.* 1994. Vol. 107, No. 3. P. 272–278.
5. Егорин А. М., Токарь Э. А., Авраменко В. А. и др. Органоминеральный сорбент на основе смешанного ферроцианида цинка-калия для извлечения и концентрирования радионуклида Cs-137 из морской воды // Седьмая Российская молодежная школа по радиохимии и ядерным технологиям: тез. докл. Озерск, 12–16 сент. 2016 г. Озерск, 2016. С. 118–119.
6. Dalrymple W. The ultimate water treatment system // *Nuclear Engineering International*. 2012, July issue. P. 18–20.
7. Nenoff T. M., Krumhansl J. L. Cs+ removal from seawater by commercially available molecular sieves // *Solvent Extraction & Ion Exchange*. 2012. Vol. 30, № 1. P. 33–40.
8. Hassan N. M., Adu-Wusu K., Marra J. C. Resorcinol-formaldehyde adsorption of cesium from Hanford waste solutions // *Radioanal. and Nucl. Chem.* 2005. Vol. 262, № 3. P. 579–586.
9. Егорин А. М., Паламарчук М. С., Токарь Э. А. и др. Извлечение ^{137}Cs из морской воды с использованием резорцинформальдегидной смолы // *Радиохимия*. 2017. Т. 59, № 2. С. 142–146.

10. Avramenko V. A., Tananaev I. G., Sergienko V. I. Treatment of liquid radioactive waste containing seawater // Unique marine ecosystems: modern technologies of exploration and conservation for future generations: Abstracts of the International Conference. Russia, Vladivostok, 4–7 august 2016. Vladivostok, 2016. P. 22.
11. Solbra N., Allison S., Waite S., et al. Cesium and Strontium Ion Exchange on the Framework Titanium Silicate $M_2Ti_2O_3SiO_4 \cdot nH_2O$ ($M = H, Na$) // Environ. Sci. Technol. 2001. Vol. 35. P. 626–629.
12. Сокольницкая Т. А., Авраменко В. А., Бурков И. С. и др. Образование осадка при поглощении стронция сорбционно-реагентными материалами // Журн. физ. Химии. 2004. Т. 78, № 3. С. 497–502.
13. Авраменко В. А., Бурков И. С., Глуценко В. Ю. и др. Сорбционно-реагентные материалы для переработки жидких радиоактивных отходов // Вестник ДВО РАН. 2002. № 3. С. 7–21.
14. Егорин А. М., Сокольницкая Т. А., Тутов М. В. и др. Композитные селективные сорбенты для очистки морской воды от радионуклидов цезия и стронция // Доклады РАН. 2015. Т. 460, № 2. С. 177–181.
15. Janauer G. E., Gibbons R. E., Bernier W. E. A systematic approach to reactive ion exchange // Ion exchange and Solvent Extr., 1985. Vol. 9. P. 53–173.
16. Рыженков А. П., Егоров Ю. В. Сорбция стронция-90 из пресных вод в процессе сульфатного модифицирования манганита бария // Радиохимия. 1995. Т. 37, № 6. С. 549–553.
17. Marton G., Szanya T., Hanak L., et al. Purification of nuclear power plant decontamination solutions by preparative scale reactive adsorption // Chemical Engineering Science. 1996. Vol. 51, No. 11. P. 2655–2660.
18. Авраменко В. А., Тананаев И. Г., Сергиенко В. И. Современные технологии обращения с жидкими радиоактивными отходами // Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017: сб. ст. по материалам науч.-практ. конф. с междунар. участием (11–15 сент. 2017 г.) / под. ред. Ю. А. Омельчук, Н. В. Ляминой, Г. В. Кучерик. Симферополь, 2017. С. 32–34.
19. Авраменко В. А., Егорин А. М., Папынов Е. К. и др. Технологии переработки жидких радиоактивных отходов, содержащих морскую воду // Радиохимия. 2017. Т. 59, № 4. С. 355–360.
20. Егорин А. М., Миско Д. С., Шелестюк Е. А. и др. Извлечение Sr-90 из жидких сред сложного солевого состава // Химия и химическое образование: сб. тр. VII Междунар. симпоз., Владивосток, 17–20 окт. 2017. Владивосток, 2017. С. 167–168.

References

1. Akhunov A. D. [Twenty years of hard work]. *Issues of NS dismantlement*: Bull. of Atomenergoizdat. 2009. No. 1 (17). P. 18–26 (in Russ.).
2. Electronic resource. URL: <http://nuclear-submarine-decommissioning.ru> (date of access: 07.10.2017).
3. Horne R. A. Marine Chemistry. The Structure of Water and the Chemistry of the Hydrosphere. N. Y., 1969.
4. Harjula R., Lehto Y., Tusa E., et al. Industrial scale removal of cesium with hexacyanoferrate exchanger – process development. *Nucl. Technol.* 1994. Vol. 107, No. 3. P. 272–278.
5. Egorin A. M., Tokar E. A., Avramenko V. A., et al. [Organomineral sorbent based on mixed zinc-potassium ferrocyanide for extraction and concentration of radionuclide Cs-137 from sea water]. *Seventh Russian Youth School on Radiochemistry and Nuclear Technologies*: Abstracts. Ozersk, Sept. 12–16, 2016. Ozersk, 2016. P. 118–119 (in Russ.).
6. Dalrymple W., The ultimate water treatment system. *Nuclear Engineering International*. 2012, July issue. P. 18–20.
7. Nenoff T. M., Krumhansl J. L. Cs+ removal from seawater by commercially available molecular sieves. *Solvent Extraction & Ion Exchange*. 2012. Vol. 30, No. 1. P. 33–40.
8. Hassan N. M., Adu-Wusu K., Marra J. C. Resorcinol-formaldehyde adsorption of cesium from Hanford waste solutions. *Radioanal. and Nucl. Chem.* 2005. Vol. 262, No. 3. P. 579–586.
9. Egorin A. M., Palamarchuk M. S., Tokar E. A., et al. [Extraction of ^{137}Cs from sea water using resorcinol-formaldehyde resin]. *Radiochemistry*. 2017. Vol. 59, No. 2. P. 142–146 (in Russ.).
10. Avramenko V. A., Tananaev I. G., Sergienko V. I. Treatment of liquid radioactive waste containing seawater. *Unique marine ecosystems: modern technologies of exploration and conservation for future generations*: Abstracts of the International Conference. Russia, Vladivostok, 4–7 august 2016. Vladivostok, 2016. P. 22.
11. Solbra N., Allison S., Waite S., et al. Cesium and Strontium Ion Exchange on the Framework Titanium Silicate $M_2Ti_2O_3SiO_4 \cdot nH_2O$ ($M = H, Na$). *Environ. Sci. Technol.* 2001. Vol. 35. P. 626–629.
12. Sokolnitskaya T. A., Avramenko V. A., Burkov I. S., et al. [Formation of a sediment upon absorption of strontium by sorption-reagent materials]. *J. of Physical Chemistry*. 2004. Vol. 78, No. 3. P. 497–502 (in Russ.).
13. Avramenko V. A., Burkov I. S., Glushchenko V. Yu., et al. [Sorption-Reagent Materials for Processing Liquid Radioactive Waste]. *Vestnik of the Far-Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*. 2002. No. 3. P. 7–21 (in Russ.).
14. Egorin A. M., Sokolnitskaya T. A., Tutov M. V., et al. [Composite selective sorbents for the purification of sea water from radionuclides of cesium and strontium]. *Doklady RAS*. 2015. Vol. 460, No. 2. P. 177–181 (in Russ.).
15. Janauer G. E., Gibbons R. E., Bernier W. E. A systematic approach to reactive ion exchange. *Ion exchange and Solvent Extr.*, 1985. Vol. 9. P. 53–173.
16. Ryzhenkov A. P., Egorov Yu. V. Sorption of strontium-90 from fresh water in the process of sulfate modification of barium manganite. *Radiochemistry*. 1995. Vol. 37, No. 6. P. 549–553 (in Russ.).
17. Marton G., Szanya T., Hanak L., et al. Purification of nuclear power plant decontamination solutions by preparative scale reactive adsorption. *Chemical Engineering Science*. 1996. Vol. 51, No. 11. P. 2655–2660.
18. Avramenko V. A., Tananaev I. G., Sergienko V. I. [Modern technologies for handling liquid radioactive waste]. *Environmental, Industrial and Energy Security – 2017*: Collection of articles on the materials of the scientific and practical conference with international participation. 11–15 Sept. 2017 / Yu. A. Omelchuk, N. V. Lyamina, G. V. Kucherik (eds.). Simferopol, 2017. P. 32–34 (in Russ.).
19. Avramenko V. A., Egorin A. M., Papanov E. K., et al. [Technologies for Processing Liquid Radioactive Wastes Containing Seawater]. *Radiochemistry*. 2017. Vol. 59, No. 4. P. 355–360 (in Russ.).
20. Egorin A. M., Misko D. S., Shelestyuk E. A., et al. [Extraction of Sr-90 from liquid media of complex salt composition]. *Chemistry and Chemical Education: VII International Sympos. Vladivostok, 17–20 Oct. 2017. Vladivostok, 2017. P. 167–168 (in Russ.).*