

DOI: 10.26730/1999-4125-2018-2-12-20

УДК 556:504.454:504.454(574.42)

ИЗУЧЕНИЕ ФОРМ НАХОЖДЕНИЯ СТРОНЦИЯ-90 В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ НА ПРИМЕРЕ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

STUDY OF SPECIATION OF STRONTIUM-90 IN NATURAL WATER (CASE STUDY OF SEMIPALATINSK TEST SITE)

Торопов Андрей Сергеевич¹,
аспирант, e-mail: torop990@gmail.com
Andrey S. Toropov¹,
post-graduate student

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, отделение геологии, г. Томск, пр. Ленина, 30, 634050, Россия

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Geology Department, Russia, 634050, Tomsk, Lenin av., 30

Аннотация: Актуальность работы определяется необходимостью изучения миграции радиоактивных элементов в различных формах нахождения ввиду их эколого-геохимических особенностей и различной способности к транспорту за пределы источников загрязнения и, соответственно, влиянию на развитие радиоэкологической ситуации в регионе. **Цель работы:** провести экспериментальные исследования по распределению форм нахождения ⁹⁰Sr в условиях лабораторных экспериментов и непосредственно в водных объектах Семипалатинского испытательного полигона. **Методы исследования:** изучение форм нахождения проводилось с помощью последовательного каскадного фракционирования. Минерализация и pH воды определялись потенциометрически прибором Анион-4100, содержание ⁹⁰Sr - методом жидкосцинтилляционной спектрометрии. **Результаты:** установлено, что радиоактивный стронций находится преимущественно в растворенной форме (менее 3 нм). В природных водах, содержащих повышенные концентрации органических веществ, наблюдались более высокие доли коллоидных форм данного радиоактивного элемента.

Abstract: The urgency of the study is determined by the need to study the radioactive elements migration in different speciations due to their ability to transport beyond the contamination areas and to affect the radioecological situation in the region. **The aim of the study is** to investigate distribution of ⁹⁰Sr speciation in the laboratory experiments and directly in the water bodies of the Semipalatinsk Test Site. **The methods used in the study:** distribution of speciations of ⁹⁰Sr was studied using sequential cascade fractionation. Total dissolved solids (TDS) and pH were determined by potentiometry using device Anion-4100, and ⁹⁰Sr content was determined using the method of liquid scintillation counting spectrometry. **The results:** it has been established that radioactive strontium exists predominantly in dissolved aqueous forms (less than 3 nm). In natural water bodies, which have enhanced concentrations of organic substances, much higher shares of colloidal forms of this radioactive element were observed.

Ключевые слова: стронций-90, водные объекты, модельные растворы, миграция, ультрафильтрация, коллоиды, взвешенное вещество, Семипалатинский испытательный полигон.

Key words: strontium-90, water bodies, simulate solutions, migration, ultrafiltration, colloids, suspended matter, Semipalatinsk Test Site.

Введение

В настоящее время проведено большое количество исследований, направленных на изучение поведения техногенных радионуклидов в наземных экосистемах. При этом установлено, что основными параметрами, влияющими на миграционный процесс, являются формы нахождения радионуклидов в воде и ландшафтно-геохимические условия природной среды [1-4]. Техногенные ра-

дионуклиды могут содержаться в значимых количествах в природных водах радиационно-опасных объектов и представлять потенциальную опасность для экосистем и человека, перемещаясь за территорию испытательных площадок [5]. Однако информация о физико-химических формах миграции радиоактивных элементов в водной среде, в том числе и стронция-90, всё ещё не является исчерпывающей [6].

Таблица 1 - Содержание ^{90}Sr в образцах грунта, использованных для модельных растворов / ^{90}Sr content in soil samples used for simulate water

Образцы грунта / No of soil sample	Удельная активность ^{90}Sr / Specific activity of ^{90}Sr , Бк/кг/Bq/kg
1	$(9,0 \pm 0,9) \cdot 10^4$
2	$(9,0 \pm 0,9) \cdot 10^2$
3	$(7,4 \pm 0,7) \cdot 10^2$
4	$(8,0 \pm 0,8) \cdot 10^3$
5	$(3,5 \pm 0,4) \cdot 10^4$

С середины XX в. в результате атмосферных ядерных испытаний [7-9], ядерных катастроф в Чернобыле и на Фукусиме [10, 11], а также утечки из хранилищ радиоактивных отходов на ПО «Маяк», Россия [2, 12] и Хэнфорд, США [13] значительные количества радиоактивных элементов, в том числе и стронция-90 (период полураспада 28,8 лет), попало в окружающую среду [6, 8]. В частности, в результате атмосферных ядерных испытаний на Семипалатинском испытательном полигоне (СИП) в окружающую среду выброшено порядка 100 Ки/км² различных радионуклидов, среди которых стронций-90 является одним из определяющих дозовую нагрузку [14].

Трудности изучения физико-химических механизмов транспортировки техногенных радионуклидов с водой связаны с применяемыми методическими приемами и объективной сложностью определения их форм нахождения в водных системах из-за ультранизких количеств [2]. Для формирования качественной физико-химической модели миграции и математической модели массопереноса техногенной радиоактивности необходимо более детальное изучение их физико-химического состояния, сорбционного взаимодействия с компонентами водных систем и способности изменять форму нахождения [15, 16].

В более ранних работах (до начала 90-х годов 20 века) по миграции радиоактивных элементов в водной среде миграционную способность оценивали по суммарному содержанию, либо по распределению взвешенной и растворенной форм. Такая оценка в настоящий момент считается недостаточной, так как биологическое воздействие радиоактивных элементов в воде определяется их состоянием в воде, в том числе и в виде органических и органоминеральных комплексов [2, 17, 18]. Ионная легкорастворимая форма миграции радионуклидов в окружающей среде считалась большее подвижной, чем коллоидная, однако многочисленными исследованиями было показано, что коллоидный транспорт частиц в водной среде способствует переносу загрязняющих веществ на значительные расстояния [3, 12, 15, 16, 17, 19, 20]. Также известны случаи существенно большей подвижности радионуклидов в коллоидных частицах, что противоречило условиям термодинамического моделирования [21].

Роль стронция-90 как одного из наиболее распространенных радиоактивных элементов для радиационно-загрязненных территорий, где источниками загрязнения являются ядерные испытания, ставит задачу исследования форм его нахождения в природных водах и оставляет открытым вопрос о реальных миграционных способностях данного радиоактивного элемента в водной среде.

Уточнённые данные о формах нахождения стронция-90 в воде в условиях модельных растворов могут в дальнейшем послужить основой для прогнозирования распределения форм нахождения данного радионуклида в реальных водных объектах, где его содержание находится на уровне, близком к пределу обнаружения.

Методология исследования

Аккумуляция стронция-90 в водных экосистемах может происходить за счет адсорбции на поверхности частиц взвешенного вещества, разрушения коллоидных веществ, либо их «слипания» и седиментации взвешенных веществ.

Методология исследования основана на использовании метода каскадного фракционирования с набором фильтров различного диаметра, который позволяет выделять взвешенные, коллоидные и растворенные формы.

Для детального понимания понимания распределения по формам нахождения стронция-90 в природных водах СИП и отработки метода фракционирования были поставлены лабораторные эксперименты в контролируемых условиях с растворами, имитирующие природные воду по составу. В основу приготовления модельных растворов положен принцип максимальной приближенности к природным процесса взаимодействия грунта с водой. В модельном эксперименте скорость процессов взаимодействия фаз в системе грунт-вода многократно увеличена за счет механического воздействия (диспергирования частиц и взбалтывания) в лабораторных условиях.

Модельные растворы (водные вытяжки) для проведения исследований приготовлены с использованием образцов грунта с площадки «Опытное поле» СИП, отобранных из наиболее загрязненных участков с высоким содержанием стронция-90, и дистиллированной воды. До начала проведения эксперимента проведено исследование радио-

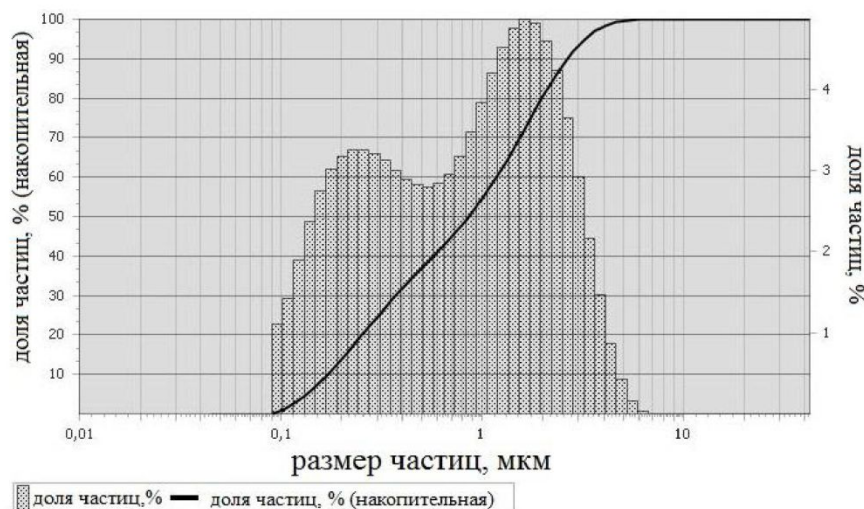


Рис.1. Распределение микрочастиц в модельном растворе 3 по их размеру/Distribution of particles in simulate solution No 3 by size.

нуклидного состава образцов грунта, использованных в дальнейшем для приготовления модельных растворов (табл.1).

При моделировании раствора к навеске грунта массой 150 г добавляли дистиллированную воду в соотношении грунт /вода 1:10. Для лучшего диспергирования суспензию в течение 1 часа подвергали ультразвуковому воздействию частотой 50 Гц, затем в течение 1 часа встряхивали на шейкере и оставляли в состоянии покоя на 24 часа. После отстаивания, взвешенную (надосадочную) часть удаляли, а осадок центрифугировали при скорости 2500 об./мин. в течение 15 минут для удаления почвенных частиц. Непосредственная предфильтрация без центрифугирования проводило к быстрому забиванию пор фильтра и значительному снижению скорости фильтрации, что могло привести к существенным артефактам из-за образования на поверхности мембраны фильтрационного осадка (кека), способного обладать адсорбционными свойствами по отношению к фильтранту и задержке более мелких частиц слоем фильтрационного кека.

При экспериментальных исследованиях выявлено, что некоторые модельные растворы оставались после всех операций оптически неоднородными (мутными) относительно дистиллированной воды. Поэтому был выполнен анализ на содержание микрочастиц на лазерном анализаторе Fritsch. Результаты центрифугирования модельного раствора 3, показали наличие в растворе частиц с размерами от 0,1 до 7 мкм (рис. 1) с максимумами распределения, соответствующими размерам частиц 0,2 и 2 мкм.

Исходя из формулы Сведберга-Николса, было рассчитано, что для удаления частиц крупнее 450 нм время центрифугирования необходимо увеличить в 3 раза. Таким образом, для устранения мут-

ности растворов время центрифугирования увеличено до 45 минут, что позволило получить растворы без почвенных частиц. После центрифугирования растворы фильтровались через мембранный фильтр с размером пор 450 нм (предфильтрация) и выдерживались в течение 12-24 часов при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Затем модельные растворы подвергались каскадному фракционированию для выделения различных форм нахождения ^{90}Sr . Выбран каскад из 4 фильтров, который позволяет отделять взвешенные, растворенные формы нахождения, а также коллоиды и псевдоколлоиды различного размера. Использованы фильтры 10000 нм, 450 нм, 100 нм и 3 нм (10 кДа). Фильтр 450 нм соответствовал верхней границе размеров частиц для модельных растворов. Этот фильтр наиболее часто используется для отсекаания взвешенных компонентов в природных водах [1, 19, 22]. При определении форм нахождения указанного радионуклида в природных водах СИП и выделения взвешенных веществ дополнительно использовался фильтр с диаметром пор 10 мкм, как стадия префильтрации.

На последних ступенях фильтрации (3 нм) для определения коллоидных форм использованы ультрафильтрационные мембраны из регенерированной целлюлозы. Эти фильтры способны задерживать молекулы определенного размера, зависящие от размера пор, которые можно выразить через номинальную отсекаемую молекулярную массу. Принято считать, что 90% незаряженных молекул сферической формы молекулярной массы отсекаются мембраной [23]. Таким образом, фильтрационная мембрана с размером 3 нм будет задерживать молекулы 10 кДа. Такое обозначение по величине отсекаемой молекулярной массы используется для фильтров с диаметром пор, близким к размерам молекул веществ [1, 18, 23].

Таблица 2 - Физико-химические параметры модельных растворов / Physicochemical characteristics of simulate solutions

Образцы No of Sample	pH	Минерализация, мг/л/ TDS, mg/l	C _{орг} , мг/л DOC, mg/l
№1	7,55	320±10	<10
№2	8,20	600±12	18±6
№3	8,40	720±14	40±8
№4	7,81	540±10	25±7
№5	6,20	430±10	<10

Таким образом, применение системы фильтров позволяет извлекать из воды взвешенные вещества и коллоиды различного размера. Тем не менее, необходимо отметить некоторую условность такого разделения, поскольку размер частиц различной природы в природных водах перекрывается. В отдельных фракциях могут присутствовать частицы различного происхождения. Так, для диапазона 100-1000 нм характерны частицы взвешенного вещества, коллоиды гидроксидов Fe, агрегаты молекул органического вещества гуминовой природы, а также бактерии. Условность следует учитывать при интерпретации экспериментальных данных.

Минерализацию и pH растворов измеряли с помощью анализатора жидкости лабораторного серии Анион 4100. Содержание растворенного органического вещества измеряли методом бихроматной окисляемости с фотометрическим окончанием на спектрофотометре ПЭ-5300ВИ.

Отбор проб природных вод проводился в соответствии с ГОСТ 17.1.5.05-85. Определение стронция-90 проводили методом бета-спектрометрии с использованием жидкосцинти-

ляционного спектрометра TriCarb серии 2900. Для проб с активностью выше 100 Бк/л по указанному радионуклиду проводились прямые измерения. Для проб с меньшей удельной активностью проводили предварительное концентрирование методом осаждения карбоната стронция, разделение с дочерним продуктом распада иттрия-90 и его дальнейшее накопление до достижения равновесия ^{90}Sr - ^{90}Y (15 суток). Химический выход контролировали гамма-спектрометрически по метке стронция-85.

Результаты и их обсуждение

Модельные растворы (водные вытяжки) образцов заметно отличались по физико-химическим свойствам, что могло определяться характеристиками грунта, который использовался в экспериментах по ресуспендированию (табл. 2).

Величина pH модельных растворов изменялась в диапазоне от 6,2 до 8,4, что соответствует нейтральным и слабощелочным водам, степень минерализации – от 320 до 720 мг/л (пресные воды), содержание растворенного органического вещества – от <10 до 40 мг/л. По физико-химическим свойствам модельные растворы близ-

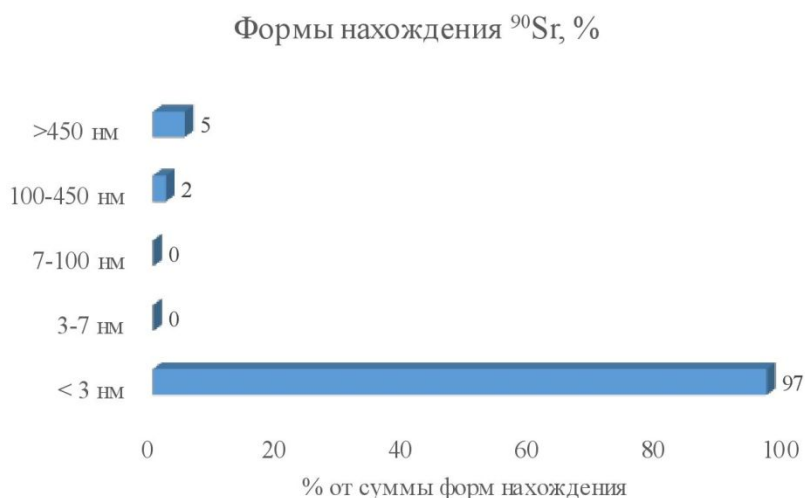


Рис. 2. Формы нахождения ^{90}Sr в модельных растворах / Speciation of ^{90}Sr in water in laboratory scale experiments

Таблица 3. Формы нахождения ^{90}Sr в водных объектах СИП, Бк/л / Speciation of ^{90}Sr in water bodies of Semipalatinsk Test Site, Bq/l

Объект исследования / Object	10000-450 нм/ nm	450-100 нм/ nm	100-3 нм/ nm	<3 нм/ nm
Водоток штольни № 176 / № 176 tunnel outflowing waterstream	0,5±0,05 (3)	<2	180±20 (97)	
Водоток штольни № 177 / Waterstream outflowing № 177 tunnel	<2	<2	<2	<2
Водоток штольни № 503 / Waterstream outflowing № 503 tunnel	<2	<2	40±4 (27)	110±10 (73)
Водоток штольни № 504 / Waterstream outflowing № 504 tunnel	4,1±0,6 (1)	<0,02	420±40 (99)	
Водоток штольни № 511 / Waterstream outflowing № 511 tunnel	0,45±0,10 (3)	<0,01	130±20 (97)	
Ручей Карабулак (в преде- лах площадки «Дегелен») / Riverstream Karabulak (inside "Degelen" test ground boudaries)	1,4±0,20 (3)	<0,04	48±5 (97)	
«Атомное» озеро / "Atomic" lake	<0,04	<0,04	0,59±0,09	
Озеро «Телкем-2» / Telkem-2 lake	20±2 (11)	10±1 (5)	<2	160±20 (84)
Воронка В-1 площадки «Опытное поле» / Artificial crater lake V-1 of "Ground zero" experimental ground	<0,7	<0,7	2,4±0,2 (49)	2,5±0,2 (51)

Примечание: в отдельных водных объектах представлена сумма форм нахождения (использована сокращенная схема каскадного фракционирования), в скобках указана процентная доля от суммы всех форм нахождения.

ки к воде ручьев и водотоков штолен испытательной площадки «Дегелен» СИП [24, 25]. Исходное содержание стронция-90 в модельных растворах колебалось от 400 до 1200 Бк/л, что, вероятно, определялось исходным его содержанием в грунте, использованном для приготовления модельного раствора.

Для всех модельных растворов результаты соотношения форм нахождения изучаемого радионуклида совпадали. Результаты по распределению форм ^{90}Sr представлены в усредненном виде (рис. 2).

Следует отметить, что из-за инструментальной погрешности измерений стронция-90 в растворах после этапов каскадного фракционирования, которая могла достигать 20 %, практически по всех случаях наблюдалось недостоверное изменение остаточной удельной активности. При использовании в расчетах долей форм нахождения различий по остаточной удельной активности в модельных растворах, все 100 % будут относиться

растворенной форме (менее 3 нм). Поэтому материал фильтра, использованный для фильтрации, также подвергали спектрометрическим измерениям, что позволило выявить небольшую долю радиостронция, связанного со взвешенным веществом и коллоидами размерами 100-450 нм (рис. 2).

В целом, в обоих случаях (с учетом доли ^{90}Sr , удержанного на фильтре, и без) очевидным является то, что фракция с размером частиц до 3 нм является доминирующей для данного радиоактивного элемента. В природных водах частицы размера 100-450 нм относят к высокомолекулярным коллоидам гидроксидов железа (псевдоколлоидам). Предполагается механизм сорбции стронция-90 частицами указанного размера, однако детальных исследований в этом направлении не проводилось.

Достоверного влияния концентрации органического вещества и других параметров состава воды в изучаемых модельных растворах на рас-

пределение форм нахождения стронция-90 установить не удалось.

Для изучения форм нахождения ^{90}Sr в природных водах СИП выбраны водоемы и водотоки различных испытательных площадок где ранее были зафиксированы количественные значения данного радионуклида [14, 25] (табл. 3).

Активность ^{90}Sr при каскадной фильтрации воды озера Телкем-2 снижалась от 190 ± 20 до 160 ± 20 Бк/л. С учетом погрешности измерений, которая не перекрывает изменения уровня остаточной удельной активности после каждой стадии фильтрации задержки ^{90}Sr не происходило. Однако данный радиоактивный элемент удерживается и на мембранах с удовлетворительной схожимостью по материальному балансу (до 20 %), что позволяет считать эти изменения удельной активности в процессе фильтрации истинными.

По результатам проведенных исследований, установлено, что преобладающей формой миграции ^{90}Sr в воде озера Телкем-2 являются соединения, связанные с частицами с размерами частиц менее 3 нм.

Стронций-90 в воде самого крупного искусственного водоема территории СИП - Атомного озера - зафиксирован только в растворенной форме (0,59 Бк/л).

При ступенчатой фильтрации воды водотока штольни №503 через каскад фильтров в диапазоне от 10000 до 100 нм удельная активность ^{90}Sr сохранялась на исходном уровне. Далее по каскаду после фильтра через мембрану 7 нм (100 кДа) активность данного радионуклида снизилась на 13 %, и после фильтра с отсечением номинальной молекулярной массы 10 кДа. Преобладающей формой нахождения для ^{90}Sr в воде водотока штольни 503 осталась растворенная (75%), на долю взвешенных и коллоидных форм приходилось порядка 25 % от суммы.

В воде воронки В-1 было отмечено распределение ^{90}Sr между растворенной и коллоидной. Такое распределение отличается от других водисточников и может быть связано с характером поступления ^{90}Sr в воду данного водоема – вымывание из грунта, слагающего гребень и склоны воронки В-1. Вода этого водоема содержит высокие концентрации растворенного органического вещества (35 ± 3 мг/л), что может способствовать образованию коллоидов, которые будут фиксировать стронций-90.

Результаты исследований распределения форм нахождения в лабораторных контролируемых

условиях с модельными растворами и в натурных экспериментах не противоречат литературным сведениями о характере миграции радиоактивного стронция в воде. Отдельными авторами [26] также отмечается способность радиостронция связываться с взвешенным веществом природных вод до 15 % от удельной активности в растворенной форме.

Заключение

Исследования форм нахождения радиоцезия в лабораторных условиях и на реальных водных объектах СИП установили следующее:

– при проведении лабораторных экспериментов в контролируемых условиях с модельными растворами, близкими по составу к природным водам СИП, стронций-90 находился преимущественно в растворенной форме (в среднем 97 % от суммы форм нахождения);

– стронций-90 в водотоках территории СИП находится преимущественно в растворенной форме, в водоемах данный радиоактивный элемент фиксируется во взвешенной и коллоидной формах. При этом, формы нахождения и их распределение в поверхностных водах индивидуальны для каждого изученного водного объекта и могут зависеть от ряда факторов: тип водоема, общехимический состав воды, содержание растворенных органических веществ и других факторов.

Полученные результаты позволяют судить о миграционной способности и распределении форм нахождения стронция-90 в отдельных водных объектах СИП. Результаты исследования целесообразно использовать при оценке степени загрязненности территорий радиоактивными элементами и способности их миграции за пределы испытательных площадок.

Автор выражает благодарность научному руководителю, доктору геолого-минералогических наук, профессору Рихванову Леониду Петровичу за ценные замечания при работе с рукописью статьи. Автор также выражает признательность руководству и коллективу Филиала «Институт радиационной безопасности и экологии» Национального ядерного центра за поддержку в организации исследований, полевых и аналитических работ.

Исследование частично профинансировано за счет гранта программно-целевого финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан (№ 0122/ПЦФ-14), гранта Министерства образования и науки Российской Федерации (госзадание № 5.10015.2017.5.2/ДААД).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильина С.М. Роль органометаллических комплексов и коллоидов в речном стоке бореальной климатической зоны (на примере Северной Карелии и Владимирской Мещеры): дисс... канд геол.-минерал. наук. – МГУ. – Москва, 2011. – 186 с.
2. Калмыков С.Н. Роль коллоидных частиц в миграции актинидов с подземными водами: автореф.

дисс... докт. хим. наук. Москва, 2008. – 49 с.

3. Новиков А.П., Калмыков С.Н., Ткачев В.В. Формы существования и миграция актиноидов в окружающей среде. // Рос. Хим. Ж. – 2005. – Т. XLIX. – №2. – С. 119-126.

4. Папина Т.С. Транспорт и особенности распределения тяжелых металлов в ряду: вода – взвешенное вещество – донные отложения речных экосистем / Аналитический обзор (Монография). – ИВЭП СО РАН. – Новосибирск. – 2001. – 58 с.

5. Программа целевого финансирования Министерства образования и науки Республики Казахстан 0122/ПЦФ-15. Разработка новых функциональных материалов на основе полиэтилентерефталатных и поликарбонатных трековых мембран, проведение фундаментальных и опытно-конструкторских исследований по применению новых типов и видов мембран [Текст]: отчет о НИР за 2015 г. – (промежут.) /рук. К.К. Кадыржанов. № ГР 0115РКО2950. – 189 с.

6. Turner N.B., Ryan J.N., Saiers J.E. Effect of desorption kinetics on colloid-facilitated transport of contaminants: Cesium, strontium, and illite colloids // Water Reserv. Res. 2006. Т. 42. № 12. P. 1-17.

7. Изучение современного состояния и последствий деятельности объектов атомной энергетики Семипалатинского полигона на окружающую среду [Текст]: отчет о НИР за 2009-2011 гг. – (заключит.) /рук. С.Н. Лукашенко. № ГР 0109РКО1414. – 216 с.

8. Aarkrog A. Input of anthropogenic radionuclides into the World Ocean // Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr. 2003. V. 50. № 17–21. P. 2597–2606.

9. Lelieveld J., Kunkel D., Lawrence M.G. Global risk of radioactive fallout after major nuclear reactor accidents // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12. № 9. P. 4245–4258.

10. Castrillejo M. et al. Reassessment of ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, and ¹³⁴Cs in the Coast off Japan Derived from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Accident // Environ. Sci. Technol. 2016. V. 50. № 1. P. 173–180.

11. Smith J.N. et al. Recent Transport History of Fukushima Radioactivity in the Northeast Pacific Ocean // Environ. Sci. Technol. 2017. V 51. № 18. P. 10494–10502.

12. Novikov A.P. et al. Colloid Transport of Plutonium in the Far-Field of the Mayak Production Association, Russia // Science. 2006. V. 314. № 5799. P. 638–641.

13. McKinley J.P., Zachara J.M., Smith S.C., Liu C. Cation exchange reactions controlling desorption of Sr-90(2+) from coarse-grained contaminated sediments at the Hanford site // Geochimica et Cosmochimica Acta. – V. 71. – №2. – Washington. – 2007. – P. 305-325.

14. Отчет о научно-исследовательской работе по НТП "Развитие атомной энергетики в Республике Казахстан" по этапу 01.01.04 "Разработка системы водного мониторинга на радиационно-опасных объектах СИП" за 2014 г. /рук. С.Н. Лукашенко. № ГР 0112РКО0543. – 38 с.

15. Hou X. et al. Speciation Analysis of Radionuclides in the Environment // NSK-B SPECIATION project report. – Roskilde. – 2009. – 55 p.

16. Kretzschmar R., Schafer T. Metal Retention and Transport on Colloidal Particles in the Environment // Elements. 2005. V.1. P. 205–210.

17. Linnik V.G. et al. Radioactive contamination of the Balchug (Upper Yenisey) floodplain, Russia in relation to sedimentation processes and geomorphology// Sci. Total Environ. – 2005. – Vol. 339. – P. 233-251.

18. Ilina S., Lapitskiy S., Alekhin Y. et. al. Speciation, size fractionation and transport of trace elements in the continuum soil water – mire – humic lake –river –large oligotrophic lake of a Subarctic watershed // Aquatic Geochemistry. – 2016. – V. 22. – p. 65-95.

19. Novikov A.P. Migration and concentration of artificial radionuclides in environmental objects // Geochemistry Int. – 2010. – Vol. 48 (13). – P. 1263-1387.

20. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments: Technical Reports Series. – No. – 472. – Vienna: IAEA, 2010. – 76 p.

21. Kersting A. B. et al. Migration of plutonium in ground water at the Nevada Test Site // Nature. – 1999. – Vol. 397 (6714). – P. 56-59.

22. Поляков Е.В., Егоров Ю.В. Современные методы определения физико-химического состояния микроэлементов в природных водах // Успехи химии. – 2003. – Т. 72. – № 11. – С. 1103–1114.

23. Osmonics Pure Water Handbook / Osmonics Inc. – Minnetonka. – 2nd Edition. – 1997. – 145 p.

24. Паницкий А.В., Лукашенко С.Н., Магашева Р.Ю. Характерные особенности радиоактивного загрязнения компонентов природной среды экосистем водотоков штолен горного массива Дегелен // Акту-

альные вопросы радиоэкологии Казахстан. – Павлодар: Дом печати, 2010. – Вып. 2. – С. 57-102.

25. Subbotin S.B., Dubasov Y. V. Radioactive contamination of water of the Degelen mountain massif // *Radiochemistry*. 2013. V. 55. № 6. P. 647–654.

26. Научное решение черновыльских проблем: итоги 10-летия // Комитет по проблемам последствий катастрофы на Чернобыльской АЭС при Совете Министров Республики Беларусь. – Гомель: Институт радиологии. – 2006. – 103 с.

REFERENCES

1. Ilina S.M. Rol' organometallicheskih kompleksov i kolloidov v rechnom stoke boreal'noj klimaticheskoj zony (na primere Severnoj Karelii i Vladimirskoj Meshhory) (The role of organometallic complexes and colloids in the river runoff of the boreal climatic zone (on the example of North Karelia and Vladimir Meshchera)). дисс... канд геол.-минерал. наук. – МГУ. – Москва, 2011. – 186 с. diss ... Cand. Geol-mineral. sciences. MSU. – Moscow. 2011. - 186 p.

2. Kalmykov, S.N. Rol' kolloidnyh chastic v migracii aktinidov s podzemnymi vodami (The role of colloidal particles in the migration of actinides with groundwater) Diss. .. Doct. Chem. sciences. Moscow. 2008. - 49 p.

3. Novikov A.P., Kalmykov S.N., Tkachev V.V. Formy sushchestvovaniya i migratsii aktinoidov v okruzhayushchey srede [Speciations and migration forms of actinides in the environment]. *Ros. Khim. Zhurn.*, 2005, vol. XLIX, no. 2, pp. 119–126. In Rus.

4. Papina T.S. *Transport i osobennosti raspredeleniya tyazhelykh metallov v ryadu: voda –vzveshennoye veshchestvo – domnye otlozheniya rechnykh ekosistem* [Transport and features of the distribution of heavy metals in the series: water – suspended matter – bottom sediments of river ecosystems]. Analytical review. Novosibirsk, 2001. 58 p.

5. Programma celevogo finansirovaniya Ministerstva obrazovaniya i nauki Respubliki Kazahstan 0122/PCF-15. Razrabotka novykh funktsional'nykh materialov na osnove polijetilentereftalatnyh i polikarbonatnykh trekovykh membran, provedenie fundamental'nyh i opytно-konstruktorskih issledovaniy po primeneniju novykh tipov i vidov membrane (Targeted financing program of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan 0122 / TFP-15. Development of new functional materials based on polyethylene terephthalate and polycarbonate track membranes, conducting fundamental and experimental design studies on the use of new types and types of membranes) [Text]: report on R & D for 2015 - (inter) / hands. K.K. Kadyrzhanov. № NR 0115RKO2950. - 189 p.

6. Turner N.B., Ryan J.N., Saiers J.E. Effect of desorption kinetics on colloid-facilitated transport of contaminants: Cesium, strontium, and illite colloids // *Water Resour. Res.* 2006. V. 42. № 12. P. 1-17.

7. Izuchenie sovremennogo sostojaniya i posledstvij dejatel'nosti ob#ektov atomnoj jenergetiki Semipalatinskogo poligona na okruzhajushhuju sredu (Study of the current state and consequences of the activities of nuclear power facilities of the Semipalatinsk test site on the environment). Research report for 2009-2011. (concluded) / ed by S.N. Lukashenko. № NR 0109RK01414. - 216 p.

8. Aarkrog A. Input of anthropogenic radionuclides into the World Ocean // *Deep. Res. Part II Top. Stud. Oceanogr.* 2003. V. 50. № 17–21. P. 2597–2606.

9. Lelieveld J., Kunkel D., Lawrence M.G. Global risk of radioactive fallout after major nuclear reactor accidents // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12. № 9. P. 4245–4258.

10. Castrillejo M. et al. Reassessment of ⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, and ¹³⁴Cs in the Coast off Japan Derived from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Accident // *Environ. Sci. Technol.* 2016. V. 50. № 1. P. 173–180.

11. Smith J.N. et al. Recent Transport History of Fukushima Radioactivity in the Northeast Pacific Ocean // *Environ. Sci. Technol.* 2017. V 51. № 18. P. 10494–10502.

12. Novikov A.P. et al. Colloid Transport of Plutonium in the Far-Field of the Mayak Production Association, Russia // *Science*. 2006. V. 314. № 5799. P. 638–641.

13. McKinley J.P., Zachara J.M., Smith S.C., Liu C. Cation exchange reactions controlling desorption of Sr-90(2+) from coarse-grained contaminated sediments at the Hanford site // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – V. 71. – №2. – Washington. – 2007. – P. 305-325.

14. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote po NTP "Razvitie atomnoj jenergetiki v Respublike Kazahstan" po jetapu 01.01.04 "Razrabotka sistemy vodnogo monitoringa na radiacionno-opasnyh ob#ektah SIP" za 2014 g. (Report on scientific research work on the NTP "Development of nuclear energy in the Republic of Kazakhstan" for the stage 01.01.04 "Development of a water monitoring system at radiation-hazardous facilities of SIP" for 2014). Ed by S.N. Lukashenko. No. NR 0112RK00543. - 38 p.
15. Hou X. et al. Speciation Analysis of Radionuclides in the Environment // NSK-B SPECIATION project report. – Roskilde. – 2009. – 55 p.
16. Kretzschmar R., Schafer T. Metal Retention and Transport on Colloidal Particles in the Environment // Elements. 2005. V.1. P. 205–210.
17. Linnik V.G. et al. Radioactive contamination of the Balchug (Upper Yenisey) floodplain, Russia in relation to sedimentation processes and geomorphology// Sci. Total Environ. – 2005. – Vol. 339. – P. 233-251.
18. Ilina S., Lapitskiy S., Alekhin Y. et. al. Speciation, size fractionation and transport of trace elements in the continuum soil water – mire – humic lake –river –large oligotrophic lake of a Subarctic watershed // Aquatic Geochemistry. – 2016. – V. 22. – p. 65-95.
19. Novikov A.P. Migration and concentration of artificial radionuclides in environmental objects // Geochemistry Int. – 2010. – Vol. 48 (13). – P. 1263-1387.
20. Handbook of Parameter Values for the Prediction of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments: Technical Reports Series. – No. – 472. – Vienna: IAEA, 2010. – 76 p.
21. Kersting A. B. et al. Migration of plutonium in ground water at the Nevada Test Site // Nature. – 1999. – Vol. 397 (6714). – P. 56-59.
22. Poljakov E.V., Egorov Ju.V. Uspehi himii (Russian Chemical Reviews) 2003. V. 72. No. 11. P. 1103-1114. In Rus.
23. Osmonics Pure Water Handbook / Osmonics Inc. – Minnetonka. – 2nd Edition. – 1997. – 145 p.
24. Panickij A.V., Lukashenko S.N., Magasheva R.Ju. Aktual'nye voprosy radiojekologii Kazahstan (Actual issues of radioecology of Kazakhstan). – Pavlodar: Dom pechati, 2010. – Vyp. 2. – P. 57-102.
25. Subbotin S.B., Dubasov Y. V. Radioactive contamination of water of the Degelen mountain massif // Radiochemistry. 2013. V. 55. № 6. P. 647–654.
26. Nauchnoe reshenie chernobyl'skih problem: itogi 10-letija (The scientific solution of the Chernobyl problems: the results of the 10th anniversary / Committee on the Problems of the Consequences of the Chernobyl Disaster at the Council of Ministers of the Republic of Belarus. – Gomel, Institute of Radiology, 2006. - 103 p.

Поступило в редакцию 14.02.2018

Received 14.02.2018