

УДК 621.039.014 + 621.039.7

© 2008

**БИОСОРБЦИЯ РАДИОНУКЛИДОВ МИКРООРГАНИЗМАМИ,  
СУЩЕСТВУЮЩИМИ В ПОДЗЕМНЫХ ВОДАХ В РАЙОНЕ  
РАСПОЛОЖЕНИЯ ФГУП “ПО “МАЯК”**

*Т.Н. Назина, Е.А. Лукьянова*

*Россия, Москва, Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского РАН*

*И.Г. Тананаев*

*Россия, Москва, Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН*

*С.И. Ровный*

*Россия, г. Озерск, ФГУП “ПО “Маяк”*

Подземные системы населены микроорганизмами, субстратами которых могут служить органические и неорганические вещества, поступающие с отходами и присутствующие в этих условиях. Микробные популяции могут влиять на функционирование хранилищ РАО и миграции радионуклидов в подземных водах за счет их воздействия на геохимические параметры окружающих пород: влиянием микроорганизмов на состав и биогенную миграцию радионуклидов, биогенным газообразованием, формированием новых минеральных фаз, и т.д. Для разработки мер радиационной безопасности хранения РАО на полигонах их захоронения, а также реабилитации загрязненных радионуклидами территорий проведено исследование по техногенному влиянию на распространение, биоразнообразие и геохимическую деятельность микроорганизмов в подземных горизонтах в районе радиохимического предприятия Росатома ФГУП “ПО “Маяк”. Изучены закономерности биогенной миграции урана и трансурановых элементов. Определен состав микробного сообщества в подземных водах в районе оз. Карачай (ФГУП “ПО “Маяк”), влияние отходов на скорости процессов сульфатредукции и метаногенеза, а также роль микроорганизмов в миграции и концентрировании долгоживущих радионуклидов.

Развитие атомной промышленности тесно связано с решением проблемы обращения с радиоактивными отходами (РАО). Одним из наиболее экологически безопасных способов изоляции РАО от окружающей среды является их размещение в глубинные геологические формации – пласты-коллекторы [1]. В глубокозалегающие пласты-коллекторы в России удалено на сегодняшний день отходов с активностью  $\sim 10^9$  Ки объемом около  $\sim 46$  млн. м<sup>3</sup>, что привело к образованию подземных хранилищ [1]. При эксплуатации приповерхностных хранилищ происходит фильтрация радиоактивных нуклидов через проницаемые ложа водоемов, что приводит к нахождению в подземных водах.

Они поступают в окружающую среду, представляя весь спектр техногенных радионуклидов, в том числе долгоживущих, сохраняющих экологическую опасность в течение сотен и тысяч лет.

По данным многолетних наблюдений за эксплуатацией глубинных хранилищ и мониторинга водоносных горизонтов района радиохимических предприятий, установлено, что границы распространения радионуклидов значительно отстают от фронта движения нерадиоактивных компонентов отходов – продуктов коррозии (соединений железа, хрома, никеля и алюминия), нитрата натрия, а также компонентов техногенного растворения пород

(соединений кремния, щелочных и щелочно-земельных элементов). Было установлено, что при температурах и пластовом давлении, соответствующих существующим в подземных горизонтах, основное количество радионуклидов фиксируется твердой фазой за счет процессов сорбции и формирования минеральных новообразований [1–5].

Не перешедшие в твердую фазу долгоживущие радионуклиды (уран, трансурановые элементы, технеций) в незначительных количествах мигрируют в фильтраатах отходов, заполняющих поровое пространство пород. Прогнозирование их миграции в зоне фильтрации, являющееся важнейшим экологическим вопросом, требует достоверной информации о формах нахождения долгоживущих радионуклидов и закономерностях их распространения в глубинных геологических формациях. В настоящее время предложено большое количество моделей миграции радионуклидов в глубинных подземных горизонтах в зависимости от состава породы, величины температуры, пластового давления, pH и Eh. Однако имеющиеся модели мало соответствуют реальным данным по мониторингу распространения долгоживущих радионуклидов в грунтовых водах близ приповерхностных водоемов. Можно полагать, что при моделировании не учитывается еще один важный параметр – микробиологический, влияющий на поведение долгоживущих радионуклидов, находящихся в глубинных геологических формациях.

Известно, что подземные системы населены микроорганизмами [6–12]. Субстратами для микроорганизмов могут служить органическое вещество, нитраты и сульфаты, поступающие с отходами, окисленные формы радионуклидов и других металлов ( $Fe^{3+}$ ), бикарбонат, исходно присутствующий в этой системе, а также молекулярный водород, который может образовываться в радиоактивных растворах за счет радиолитического распада воды. Микробные популяции могут влиять на функционирование хранилищ РАО за счет их воздействия на геохимические параметры окружающих пород. Это воздействие многообразно: (1) влияние микроорганизмов на состав и миграцию радионуклидов (диссимиляционное восстановление элементов, например,  $U^{VI}$ ,  $Se^{VI}$ ,  $Cr^{VI}$ ,  $Hg^{II}$ ,  $Tc^{VII}$ ,  $V^V$ ,  $Au^{III}$ ,  $Ag^I$  и др.

[13–15]; ускорение или замедление миграции радионуклидов при их транспорте совместно со свободноживущими микроорганизмами или концентрировании в биопленках, соответственно [13]); (2) образование процессов биогенного газообразования ( $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$ ,  $CO_2$ ), обусловленных жизнедеятельностью денитрифицирующих, броодильных, сульфатредуцирующих и метанобразующих бактерий [17]; (3) формирование доминирующих типов радионуклидов и минеральных фаз, в том числе новых минеральных образований [18]; (4) продуцирование комплексобразующих агентов; (5) изменение величин pH и Eh; и другие.

В связи с вышесказанным, изучение закономерностей биогенной миграции и концентрирования урана и трансурановых элементов, проведение исследований техногенного влияния на распространение, биоразнообразие и геохимическую деятельность микроорганизмов в глубинных хранилищах жидких РАО представляется актуальной и важной задачей. При этом для объяснения, количественного описания, прогноза и управления микробными процессами в подземных горизонтах глубинных хранилищ жидких РАО необходимы комплексные междисциплинарные физико-химические, радиохимические и микробиологические исследования. Первые систематические результаты по указанным выше вопросам приведены в настоящем сообщении.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### *Метод определения сорбции радионуклидов микробной биомассой*

Биомассу бактерий наращивали в жидкой питательной среде, содержащей (в г/л дистиллированной воды): бакто-триптон – 5,0, дрожжевой экстракт – 2,5, глюкозу – 1,0 и хлористый натрий – 5,0 (pH 6,5). Бактерии инкубировали при температуре 28 °С в течение трех суток. Биомассу собирали центрифугированием (9500 об/мин в течение 15 мин при температуре 5 °С), трижды промывали физраствором (0,9 % NaCl в дистиллированной воде, pH 6,5), затем получали густую суспензию, в которой определяли оптическую плотность.

В работе использовали растворы, содер-

жацие  $1 \cdot 10^{-9}$  М  $^{241}\text{Am}(\text{III})$ ,  $1 \cdot 10^{-7}$  М  $^{233}\text{U}(\text{VI})$ ,  $1,02 \cdot 10^{-6}$  М  $^{237}\text{Np}(\text{V})$ , которые нейтрализовали до величины рН 5–6 с помощью 0,2 М растворов HCl и NaOH. В физиологический раствор, содержащий радионуклид известной концентрации, вносили аликвоту суспензии бактерий с оптической плотностью OD600 1.0. Эксперименты выполняли в 15 мл тефлоновых пробирках при комнатной температуре и постоянном перемешивании на шейкере при 150 об/мин в течение двух часов. После этого биомассу отделяли центрифугированием (8000 об/мин, 15 мин).

Активность радионуклидов, оставшихся в жидкой фазе, определяли методом жидкостной сцинтилляционной (ЖС) спектрометрии (сцинтиллятор OptiFase "HiSafe" 3). Измерения проводили на ЖС спектрометре СКС-07П-Б11 (Россия), точность измерения составляла 3 %. Сорбцию радионуклидов биомассой бактерий выражали в процентах по отношению к исходной концентрации радионуклида в растворе (Бк/мл), которую принимали за 100 %.

*Участие аэробных и анаэробных микроорганизмов, обитающих в подземных водах на территории ФГУП "ПО "Маяк", в трансформации и миграции радионуклидов*

Одна из важных задач настоящего исследования заключалась в изучении способности аэробных и анаэробных микроорганизмов, обитающих в подземных водах на территории ФГУП "ПО "Маяк", участвовать в преобразовании долгоживущих радионуклидов, в том числе технеция (VII). Известно, что современная система обращения с радиоактивными отходами на ФГУП "ПО "Маяк" сложилась в 1950–1960-х гг., и предполагает сброс и хранение жидких среднеактивных отходов (САО) в локализованных от открытой гидрографической сети промышленных водоемах В-9 (озеро Карачай) и В-17 (Старое Болото). В результате многолетней эксплуатации водоемов В-9 и В-17 произошло крупномасштабное загрязнение подземных вод района путем инфильтрации радиоактивных растворов через проницаемые ложа водоемов. В результате многолетнего мониторинга оценен масштаб распространения в подземном водоносном горизонте  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ , альфа-излучателей (U, Pu), тогда

как о поведении способного к миграции Tc-99 в объектах района влияния ФГУП "ПО "Маяк" данные были получены только недавно [19–21]. В ходе систематических исследований было обнаружено, что грунты (супеси, суглинки, глинисто-дресвяная кора выветривания, развитая по порфирирам андезито-базальтового состава) практически не удерживают Tc(VII), что привело к образованию существенных площадей с уровнем вмешательства по этому радионуклиду (220 Бк/л) в подземных водах вокруг В-9 и В-17 (11,7 км<sup>2</sup> и 1,2 км<sup>2</sup>, соответственно). Можно было полагать, что необходимым противомиграционным барьером проникновения Tc(VII) в гидросферу может стать биологический за счет биовосстановления технеция до четырехвалентного состояния с последующей фиксацией грунтами в нерастворимой в воде форме. Для этого в 2006 и 2007 гг. из наблюдательных гидрогеологических скважин режимной сети ФГУП "ПО "Маяк", расположенных на периферии ореолов загрязнения в районе водоемов В-9 и В-17, была отобрана 31 проба подземных вод и проведен поиск микробных сообществ в них. В ходе исследований было обнаружено, что во всех исследованных пробах подземных вод присутствовали как аэробные, так и анаэробные органотрофные микроорганизмы.

В ходе последовательных пересевов на среды соответствующего состава были получены активные накопительные культуры аэробных бактерий и сульфатредуцирующих бактерий. Накопительные культуры аэробных бактерий использовали для выделения чистых культур с целью дальнейшей оценки биосорбции технеция биомассой аэробных бактерий. Накопительные культуры сульфатредуцирующих бактерий планируется использовать в экспериментах по биосорбции и биотрансформации технеция в анаэробных условиях.

На первой стадии были выделены чистые культуры микроорганизмов из подземных вод, отобранных из глубинных горизонтов на территории ФГУП "ПО "Маяк". Первичные посевы пластовой воды на среду с триптоном и глюкозой послужили источником выделения 10-ти чистых культур аэробных бактерий. Девять штаммов были идентифицированы методом определения фрагмента последовательности гена 16S рРНК размером 300–450 нуклеоти-

дов, расположенного на 5'-конце последовательности гена 16S рРНК, где сосредоточены наиболее вариабельные участки. В результате сравнительного филогенетического анализа полученных последовательностей четыре штамма были отнесены к подразделению грамположительных бактерий. Среди них штамм 230/70-100 был близок бактериям рода *Paenibacillus* (99 % сходства с видом *P. odorifer*); штамм 50/79-57 – относился к роду *Microbacterium* (99 % сходства с видом *M. flavescens*). Штаммы 2/27-60з и 1/95-60 были наиболее близки к виду *Cellulomonas flavigena* (95 % и 96 % сходства, соответственно), возможно, что эти штаммы относятся к новому роду. Штаммы 1/95-60п, 2/04-80, 231/70-80 и 231/70-50 относились к роду *Pseudomonas*. Штамм 1/95-60п был близок к виду *P. synxantha* (99 %), штамм 231/70-50 – к *P. reactans* (99 %), а штаммы 2/04-80 и 231/70-80 – к виду *P. veronii* (99 % сходства). Штамм 2/04-50 относился к роду *Stenotrophomonas*, в котором был близок к виду *S. rhizophilla* (99 %). Некоторые морфологические признаки выделенных штаммов приведены в табл. 1.

На второй стадии исследований было проведено изучение способности аэробных микроорганизмов сорбировать наиболее опасные долгоживущие радионуклиды. Одним из простейших механизмов воздействия подземного микробного сообщества на радиоактивные компоненты отходов является биосорбция радионуклидов на микробной биомассе. Известно, что грамположительные и грамотрицательные бактерии различаются по структуре и химическому составу клеточных стенок, что может существенно влиять на процесс сорбции. Грамположительные бактерии образуют однослойную клеточную стенку, у грамотрицательных бактерий она состоит, по меньшей мере, из двух структурно-различных слоев [22]. Клеточные стенки грамположительных бактерий содержат в качестве главного полимера пептидогликан (обычно составляющий 50–80 % всей массы стенки), с которым связаны полисахариды и тейхоевые кислоты (линейные полимеры глицерин- и рибитфосфата). Белки встречаются не всегда, при этом они бывают связаны с внешней поверхностью клеточной стенки. Грамотрицательные бактерии содержат

относительно мало пептидогликана (1–10 % общего веса стенки), на его наружной поверхности присутствует внешний мембранный слой, содержащий белки, липополисахариды и липопротеиды.

В настоящей работе грамотрицательные бактерии родов *Pseudomonas* и *Stenotrophomonas* и грамположительные бактерии родов *Paenibacillus*, *Microbacterium* и *Cellulomonas* были использованы для изучения биосорбции радионуклидов – урана, нептуния, америция и технеция (табл. 1). В нейтральной среде максимум извлечения урана составлял 86 %, нептуния – 84 %, америция – 85 %. Ни один из выделенных штаммов не сорбировал технеций. Наибольшей сорбционной способностью обладали бактерии родов *Pseudomonas* и *Cellulomonas*. На примере штамма 2/27-60з была исследована зависимость биосорбции радионуклидов от величины рН раствора (рис. 1). В экспериментах с постоянными концентрациями радионуклидов и биомассы штамма 2/27-60з (OD600 0.3) максимум сорбции  $^{238}\text{Pu(IV)}$  и  $^{233}\text{U(VI)}$  наблюдали в слабо-кислой среде при рН 3–5, тогда как  $^{241}\text{Am(III)}$  сорбировался предпочтительнее в интервале рН 5–7.

Для выяснения характера взаимодействия радионуклидов с бактериальной клеткой были проведены эксперименты по десорбции  $^{238}\text{Pu(IV)}$ ,  $^{237}\text{Np(V)}$ ,  $^{233}\text{U(VI)}$  и  $^{241}\text{Am(III)}$  (рис. 2). В качестве десорбирующих растворов были использованы 0,1 М растворы соляной кислоты, натриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА) и карбоната натрия. Эти эксперименты выполняли на свежей суспензии штамма 2/27-60з, с оптической плотностью OD600 0.5. Растворы ЭДТА и карбоната натрия извлекали большую часть сорбированного америция, плутония и урана, тогда как раствор соляной кислоты был мало эффективен при десорбции этих радионуклидов с микробной биомассы. Результаты этих экспериментов свидетельствуют о различных механизмах взаимодействия бактериальных клеток с радионуклидами.

Полученные данные свидетельствуют о том, что биосорбция является сложным процессом, зависящим от ряда факторов (вида микроорганизма, состояния бактериальной клетки, величины рН). Биосорбция радио-

Таблица 1

Характеристика чистых культур микроорганизмов, выделенных из подземных вод на территории ФГУП «ПО «Маяк», и сорбция радионуклидов биомассой бактерий

№	Штамм	Форма клеток	Наличие спор	Подвижность	Сходство фрагментов 16S рРНК (%)	Ближайший вид согласно программе Sequence Match (RDP)	Количество сорбированного радионуклида, %			
							<sup>99</sup> Tc(VII)	<sup>237</sup> Np(V)	<sup>241</sup> Am(III)	<sup>233</sup> U(VI)
1	2/27-60з	Палочки	-	+	95	<i>Cellulomonas flavigena</i>	0	24	67	79
2	1/95-60	Палочки	-	+	96	<i>Cellulomonas flavigena</i>	0	40	84	86
3	50/79-57ж	Коккопалочки	-	-	99	<i>Microbacterium flavescens</i>	0	6	64	48
4	230/70-100	Палочки	+	+	99	<i>Paenibacillus odorifer</i>	0	11.9	Н.д.	Н.д.
5	231/70-50	Палочки	-	+	99	<i>Pseudomonas reactans</i>	0	31.5	82	79
6	1/95-60пр	Палочки	-	+	99	<i>Pseudomonas synxantha</i>	0	81	54	48
7	2/04-80м	Палочки	-	+	99	<i>Pseudomonas veronii</i>	0	76	40	54
8	231/70-80	Палочки	-	+	99	<i>Pseudomonas veronii</i>	0	84	85	79
9	2/04-50	Палочки	-	+	99	<i>Stenotrophomonas rhizophilla</i>	0	79	83	83
10	1/95-60ср	Палочки	Н.д.	Н.д.	Н.д.	Н.д.	0	77	48	65

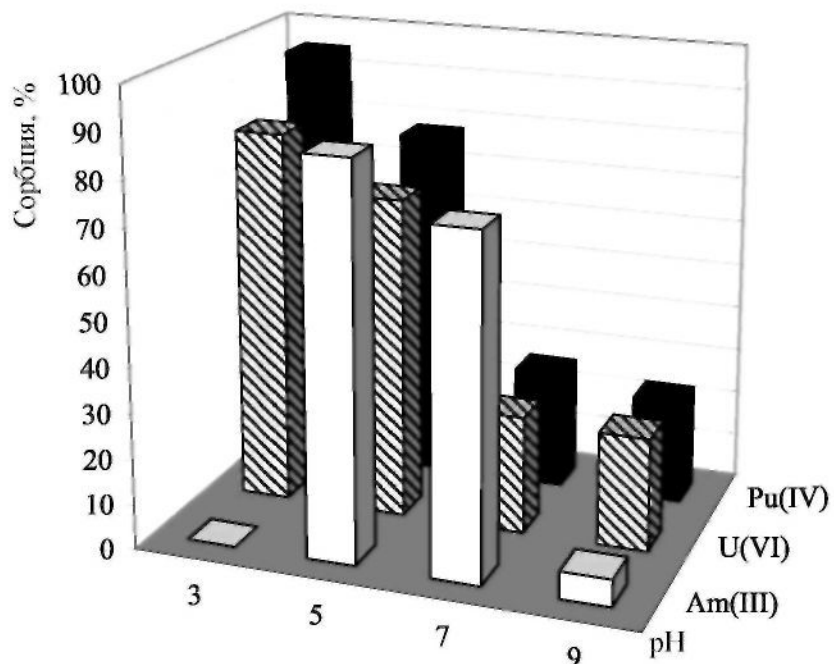


Рис. 1. Сорбция радионуклидов биомассой штамма 2/27-60з в зависимости от величины pH раствора

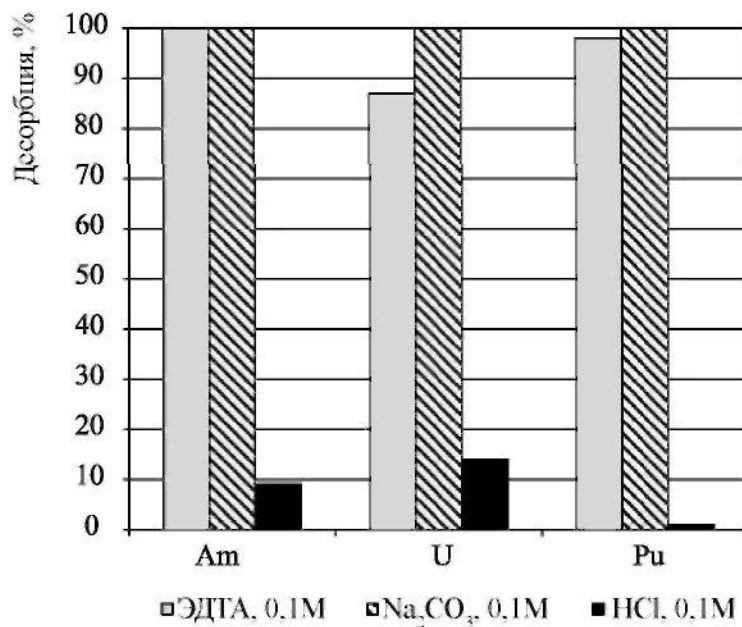


Рис. 2. Десорбция радионуклидов 0,1 М растворами соляной кислоты, ЭДТА и карбоната натрия с биомассы штамма 2/27-60з

нуклидов микроорганизмами обусловлена наличием в клеточной стенке различных функциональных групп, таких как карбоксильные, гидроксильные, фосфатные, сульфгидрильные и аминокислотные группы [23]. Необходимы специальные исследования для уточнения механизма сорбции радионуклидов компонентами клеточной стенки.

## ВЫВОДЫ

1. Воды подземных горизонтов и наземных хранилищ, расположенных на территории ФГУП "ПО "Маяк" населены микроорганизмами разнообразных физиологических групп – аэробными органотрофами, анаэробными бродильными, денитрифицирующими, железоредуцирующими, сульфатвосстанавливающими и метанобразующими микроорганизмами, близких известным представителям родов *Paenibacillus*, *Microbacterium*, *Pseudomonas* и *Stenotrophomonas*, а также два штамма, принадлежащих к новому роду, филогенетически близкому роду *Cellulomonas*. Микроорганизмы, выделенные из подземных вод, способны сорбировать радионуклиды (уран, плутоний и америций), уровень сорбции зависит от биологических особенностей микроорганизма. Ни один из 10 выделенных штаммов не сорбировал технеций. Видимо из-за малочисленности и малой сорбционной способности микроорганизмов по отношению к Tc(VII), обитающие в подземных водах микроорганизмы не смогут стать биологическим барьером на пути миграции пертехнетат-ионов в подземных горизонтах.

2. Полученные результаты позволяют подойти к выяснению воздействия микробных сообществ на эффективность сорбции и биотрансформации технеция и других радионуклидов в глубинных хранилищах жидких РАО. Проведенные исследования выявили перспективность поиска микроорганизмов и подбора условий для удаления радионуклидов из среднеактивных отходов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Rybal'chenko A.I., Pimenov M.K., Kostin P.P. et al. Deep injection disposal of liquid radioactive

waste in Russia. – USA, Columbus, Richland, Battelle Press, 1998. – 206 p.

2. Лаверов Н.Н., Величкин В.И., Омеляненко Б.И. Новые подходы к подземного захоронения высокоактивных отходов // Геоэкология. – 2000. – Т. 1. – С. 3–12.

3. Zakharova E.V., Kaimin E.P., Mikerin E.I. et al. Behavior of radionuclides in geologic formations used for underground disposal of underground disposal of liquid nuclear wastes / In: Deep injection disposal of hazardous and industrial waste. Scientific and engineering aspects. Academic Press. – 1996. – P. 663–668.

4. Zakharova E.V., Kaimin E.P., Rybal'chenko A.I. et al. Prediction of distribution and migration of radionuclides in geologic medium during deep well injection of liquid radioactive wastes / In: Proceeding of the International Topical Meeting on Nuclear and Hazardous Waste Management (SPECTRUM'96), August 18–23, 1996 Seattle, Washington, American Nuclear Society, Inc. – 1996. – P. 933–937.

5. Захарова Е.В., Каймин Е.П., Дарская Е.Н. и др. Part played by the physicochemical processes during the long-term storage of liquid radioactive wastes in the deep collector layers // Радиохимия. – 2001. – Т. 43. – С. 378–380.

6. West J.M., McKinley I.G., Grogan H.A., Arne S.C. Laboratory and Modelling Studies of Microbial Activity in the Near Field of the HLW Repository, Mater // Res. Soc. Symp. Proc. – 1985. – V. 50. – P. 533–538.

7. McKinley I.G., Hagenlocher I., Alexander W.R., Schwyn B. Microbiology, in Nuclear Waste Disposal: Interfaces and Reaction Fronts, FEMS Microbiol. Rev. – 1997. – V. 20. – No 3/4. – P. 545–556.

8. Pedersen K. Investigation of subterranean bacteria in deep crystalline bedrock and their importance for the disposal of nuclear waste // Can. J. Microbiol. – 1996. – V. 42. – P. 382–391.

9. Stroes-Gascoyne S. and West J.M. Microbial studies in the Canadian nuclear fuel waste management program // FEMS Microbiol. Revs. – 1997. – V. 20. – P. 573–590.

10. Domingo J.W.S., Berry C.J., Summer M., Fliermans C.B. Microbiology of spent nuclear fuel storage basins // Curr. Microbiol. – 1998. V. 37. – P. 387–394.

11. Francis A.J., Gillow J.B., Dodge C.J. et al.

- Role of bacteria as biocolloids in the transport of actinides from a deep underground radioactive waste repository // *Radiochim. Acta.* – 1998. – V. 82. – P. 347–354.
12. Humphreys P., McGarry R., Hoffmann A., Binks P. DRINK: a biogeochemical source term model for low level radioactive waste disposal sites // *FEMS Microbiol. Rev.* – 1997. – V. 20. – P. 557–572.
13. Pedersen K. Subterranean microorganisms and radioactive waste disposal in Sweden // *Engineering Geology.* – 1999. – V. 52. – P. 163–176.
14. Lovley D.R., Anderson R.T. Influence of dissimilatory metal reduction on fate of organic and metal contaminants in the subsurface // *Hydrogeol. J.* – 2000. – V. 8. – P. 77–88.
15. Lovley D.R. Dissimilatory metal reduction // *Annu. Rev. Microbiol.* – 1993. – V. 47. – P. 263–290.
16. Nealson K.H., Saffarini D. Iron and manganese in anaerobic respiration: environmental significance, physiology, and regulation // *Annu. Rev. Microbiol.* – 1994. – V. 48. – P. 311–343.
17. Nazina T.N., Kosareva I.M., Petrunyaka V.V. et al. Microbiology of formation waters from the deep repository of liquid radioactive wastes Severnyi // *FEMS Microbiol. Ecol.* – 2004. – V. 49. – P. 97–107.
18. Nazina T.N., Kosareva I.M., Davidov A.S. et al. Physicochemical and microbiological characteristics of groundwater from observation wells of a deep radioactive liquid waste repository // *Microbiology (English translation of Mikrobiologiya).* – 2000. – V. 69. – P. 89–95.
19. Алиев Р.А., Калмыков С.Н., Хрестенко Р.В., Тананаев И.Г. Определение  $^{99}\text{Tc}$  в загрязненных природных водах // *Вопросы радиац. безопасности.* – 2007. – Т. 3. – С. 10–17.
20. Ровный С.И., Иванов И.А., Стукалов П.М. и др. Загрязнение подземных вод технецием-99 в районе размещения водоемов-хранилищ жидких радиоактивных отходов озера Карачай и Старое Болото // *Вопросы радиац. безопасности.* – 2007. – Т. 3. – С. 17–28.
21. Ровный С.И., Иванов И.А., Постовалова Г.А. и др. Загрязнение подземных вод технецием-99 в районе размещения водоемов-хранилищ жидких радиоактивных отходов Карачая и Старого болота / 1-й Уральский экологический конгресс “Экологическая безопасность горнопромышленных районов”, г. Екатеринбург, 12–14 октября 2007. – Т. 1. – С. 201–205.
22. Стейниер Р., Эдельберг Э., Ингрэм Дж. Мир микробов. Т. 1. – М.: Мир, 1979. – С. 168–173.
23. Lloyd J.R., Macaskie L.E. In: D.R. Lovley (ed.). *Environmental Microbe-Metal Interactions* // American Society for Microbiology Press, Washington, D.C. – 2000. – 277 p.