

УДК 621.039.7 : 543.544 : 539.16/17

© 2007

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ТЕХНЕЦИЕМ-99 В РАЙОНЕ РАЗМЕЩЕНИЯ ВОДОЕМОВ-ХРАНИЛИЩ ЖИДКИХ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ ОЗЕРО КАРАЧАЙ И СТАРОЕ БОЛОТО

*С.И. Ровный, И.А. Иванов, П.М. Стукалов, А.И. Алексахин, Г.А. Постовалова
Россия, г. Озерск, ФГУП "ПО "Маяк"*

И.Г. Тананаев

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

Приведены данные о наличии и структуре распределения концентраций ^{99}Tc в подземных водах района размещения промышленных водоемов – хранилищ ЖРО оз. Карачай и Старое болото. Оценен масштаб загрязнения подземных вод ^{99}Tc : площадь ореола ^{99}Tc вокруг В-9 в границах значения УВ (220 Бк/л) составляет 11,7 км², в границах распространения НАО – 2,9 км². Площадь ореола ^{99}Tc вокруг В-17 в границах значения УВ составляет 1,2 км².

Показано, что ^{99}Tc находится в загрязненных подземных водах в высоко подвижных, слабосорбируемых местными грунтами формах, и структура пространственного распределения его концентраций в водоносном горизонте аналогична определенной ранее для других радиоактивных и нерадиоактивных компонентов-загрязнителей.

Современная система обращения с радиоактивными отходами на ФГУП "ПО "Маяк" (РОСАТОМ, г. Озерск Челябинской обл.) сложилась в 1950–1960-х гг. при выполнении предприятием Государственной оборонной программой в условиях противостояния двух сверхдержав, гонки вооружения и жесточайшей секретности. Существующая технологическая схема предполагает сброс и хранение жидких среднеактивных отходов (САО), образующихся в процессе работы предприятия, в локализованных от открытой гидрографической сети промышленных водоемах В-9 (оз. Карачай) и В-17 (Старое Болото).

Решение о хранении жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в поверхностных водоемах диктовалось конкретным историческим временем – сжатыми сроками создания ядерного оружия, недостатком научных знаний о поведении радионуклидов в окружающей среде и отсутствием опыта обращения с ЖРО. В настоящее время ведутся работы по консервации водоемов-хранилищ, созданию на их месте

долговременных хранилищ радиоактивных отходов приповерхностного типа и радиационной реабилитации загрязненной территории.

В результате многолетней эксплуатации водоемов В-9 и В-17 произошло крупномасштабное загрязнение подземных вод района путем инфильтрации радиоактивных растворов через проницаемые ложа водоемов [1]. В течение многих лет проводились работы по изучению масштаба распространения и структуры распределения в подземном водоносном горизонте ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co , трития, а также долгоживущих альфа-излучающих радионуклидов. В то же время для ^{99}Tc , поступающего в водоемы с отходами, возникающими при переработке отработанного ядерного топлива на радиохимическом производстве, до настоящего времени имелись только единичные результаты измерений содержания этого изотопа в объектах окружающей среды.

Если для ^{90}Sr , изотопов урана и трансурановых элементов – важнейших техногенных радиоактивных компонентов загрязненных

подземных вод района – закономерности миграции в гидросфере довольно хорошо известны [1–3], то о поведении долгоживущего ($t_{1/2} = 2,11 \cdot 10^5$ лет) и в высокой степени способного к миграции ^{99}Tc в водных объектах района влияния ФГУП “ПО “Маяк” до сих пор практически нет достоверных данных. Известно, что миграционные способности технеция в водной среде тесно связаны с окислительно-восстановительными условиями среды и степенью его окисления [4, 5]. В целом, для природно-техногенных водных объектов района ФГУП “ПО “Маяк” характерны окислительные условия, в которых технеций находится в анионной форме (TcO_4^-), и, следовательно, может не сорбироваться донными отложениями промышленных водоемов и породами водоносного горизонта. В восстановительной среде технеций находится в форме Tc_4^{+} , и в таком виде может задерживаться грунтами и породами [6, 7]. Таким образом, большой практический интерес представляет изучение природных барьеров по отношению к ^{99}Tc , мигрирующему в потоке подземных вод района ФГУП “ПО “Маяк”.

Для решения этой важной задачи в 2006–2007 гг. был выполнен комплекс исследований, направленных на выявление масштаба распространения, структуры распределения и закономерностей миграции и накопления ^{99}Tc в приповерхностном водоносном горизонте района размещения водоемов-хранилищ оз. Карачай и Старое Болото. Работы были выполнены коллективом исследователей ИФХЭ РАН и ФГУП “ПО “Маяк” (измерения объемной активности ^{99}Tc выполнены на кафедре радиохимии МГУ, исполнители С.Н. Калмыков, Р.А. Алиев, Р.В. Христенко) и включали в себя: (1) разработку методики определения микроколичеств ^{99}Tc в пробах поверхностных и подземных вод, имеющих сложный химический и радионуклидный состав, и породах водоносного горизонта; (2) определение объемной активности ^{99}Tc в воде специальных промышленных водоемов Карачай и Старое Болото; (3) определение уровня активности и структуры распределения ^{99}Tc в подземных водах района; и (4) оценка сорбционных свойств грунтов района ФГУП “ПО “Маяк” по отношению к ^{99}Tc . Ниже приводятся результаты проведенного нами систематического исследования [8].

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящем разделе приведена общая характеристика геолого-геохимического строения района размещения водоемов оз. Карачай и Старое Болото, физико-химических свойств пород водоносного горизонта и загрязнения подземных вод. Эта информация представляется, на наш взгляд, важной в свете интерпретации полученных результатов, а также для создания в ФГУП “ПО “Маяк” модели поведения технеция в объектах окружающей среды.

Район размещения водоемов оз. Карачай и Старое Болото в геологическом отношении располагается в ядерной части Горненской синклинали, сложенной вулканогенно-осадочной толщей андезито-базальтового состава. Породы верхней части разреза, являющиеся вмещающей средой для загрязненных подземных вод, сильно метаморфизованы, претерпели интенсивные гипергенные преобразования вплоть до образования коры выветривания. В районе водоемов оз. Карачай и Старое Болото элювиальные отложения имеют мощность от 40–60 до 100–120 м и представлены, преимущественно, корой выветривания линейного типа, сформированной в пределах разломов, зон интенсивной трещиноватости, а также в приконтактных частях пород контрастного вещественного состава и физико-механических свойств. Установлено, что в существующих условиях линейные коры выветривания являются важнейшими элементами среды транспорта техногенно-загрязненных подземных вод. Их ориентировка и внутренне строение в значительной степени определяют направление и скорость продвижения фронта радиоактивного загрязнения в водоносном горизонте. Подошва кор выветривания представляет собой относительный водоупор, ограничивающий распространение загрязненных подземных вод в глубинные горизонты.

Изучение физико-химических свойств пород, слагающих водоносный горизонт в районе оз. Карачай [9], показало их невысокую восстановительную емкость (от 0,00 до 0,09 мг/г), не достаточную для существенного снижения окислительно-восстановительного потенциала подземных вод, при котором возможно осаждение урана и ТУЭ. Кислотоемкость (нейтрализационная емкость) вмещающих пород в целом

также проявлена слабо (от 0,00 до 0,5 мг/г). Емкость катионного обмена в максимальной степени (до 60–70 мг-экв./100 г) проявлена у элювиальных глин, причем в составе поглощенных катионов преобладает кальций. Сорбционная емкость пород определяется степенью их выветривания: гипергенные минералы (монтмориллонит, вермикулит, каолинит, гидроксиды и оксиды железа) обладают высокими сорбционными свойствами по отношению к радионуклидам.

Таким образом, в районе ФГУП “ПО “Маяк” в зоне гипергенеза (где происходит миграция техногенных растворов) нет условий, благоприятных для восстановительного осаждения радионуклидов, но при широком развитии процессов глинизации во вмещающих породах возможно образование сорбционных барьеров, ограничивающих дальнейшее распространение техници в подземной гидросфере.

Процесс загрязнения подземных вод вокруг оз. Карачай зафиксирован с самого начала его эксплуатации как хранилища среднеактивных ЖРО (октябрь 1951 г.), загрязнение подземных вод в районе водоема Старое Болото началось еще раньше, в 1949 г. Систематические режимные наблюдения за гидрогеохимическим состоянием подземных вод были организованы в 1952–1954 гг. По мере распространения загрязнения в подземных водах режимная сеть наблюдательных гидрогеологических скважин постоянно расширялась и в настоящее время состоит из более чем 150 скважин.

Загрязненные подземные воды представляют собой сложную многокомпонентную систему и по степени минерализации меняются от рассолов (с минерализацией до 80 г/л и плотностью до 1,06 г/см³) нитратно-натриевого состава в центральной части Карачаевского ореола (“область неразбавленных растворов”) до практически пресных вод во фронтальных частях. Основными компонентами-загрязнителями подземных вод являются нитрат-ион и радионуклиды техногенного происхождения – стронций-90, тритий, гамма-излучатели (кобальт-60, цезий-137), альфа-излучатели (изотопы урана, плутония и др.).

За все время эксплуатации в водоемы-хранилища поступило более $1,7 \cdot 10^{19}$ Бк (500 млн. Ки) бета-излучающих радионукли-

дов. В подземные воды профильтровалось около 4–5 млн. м³ загрязненных растворов общей активностью $\sim 2,2 \cdot 10^{16}$ Бк (600 тыс. Ки).

Для загрязненных вод характерно зональное строение: в плане – концентрация компонентов уменьшается к периферии, по мере удаления от источников загрязнения; по вертикали – возрастает с глубиной, достигая максимума на 50–100 метрах от дневной поверхности. Схема распространения техногенного загрязнения в подземных водах следующая: фильтрующиеся через ложе водоема растворы за счет повышенной плотности опускаются до относительного водоупора, сложенного монолитными слабопроницаемыми вулканогенными породами, и далее распространяются преимущественно в южном и северном направлениях, формируя слегка вытянутый в меридиональном направлении ореол.

Для описания характера распространения основных загрязняющих веществ в ореолах их можно условно разделить на две группы: (1) соединения, образованные анионогенными элементами и элементами – комплексообразователями (нитрат-ион, кобальт-60, уран, тритий), которые не сорбируются породами водоносного горизонта; скорость их миграции зависит только от фильтрационной дисперсии и величины периода полураспада (для радиоактивных веществ); (2) соединения, образованные катионогенными элементами (⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs), которые достаточно активно взаимодействуют с вмещающей средой, сорбируясь на горных породах или соосаждаясь с минеральными новообразованиями. Это приводит к снижению миграционной способности и отставанию фронта распространения ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs от фронта распространения, например, нитрат-иона.

Многолетние гидрогеохимические исследования и режимные наблюдения показали, что максимальной скоростью миграции в подземных водах из всех рассматриваемых загрязняющих веществ обладает нитрат-ион, из радиоактивных элементов – стронций-90 и изотопы урана.

На рис. 1 представлены некоторые современные результаты гидрогеохимического контроля подземных вод (ореолы для всех компонентов-загрязнителей даны в плоскости максимальных концентраций). Видно, что в границах ПДК для нитрат-иона и уровня вме-

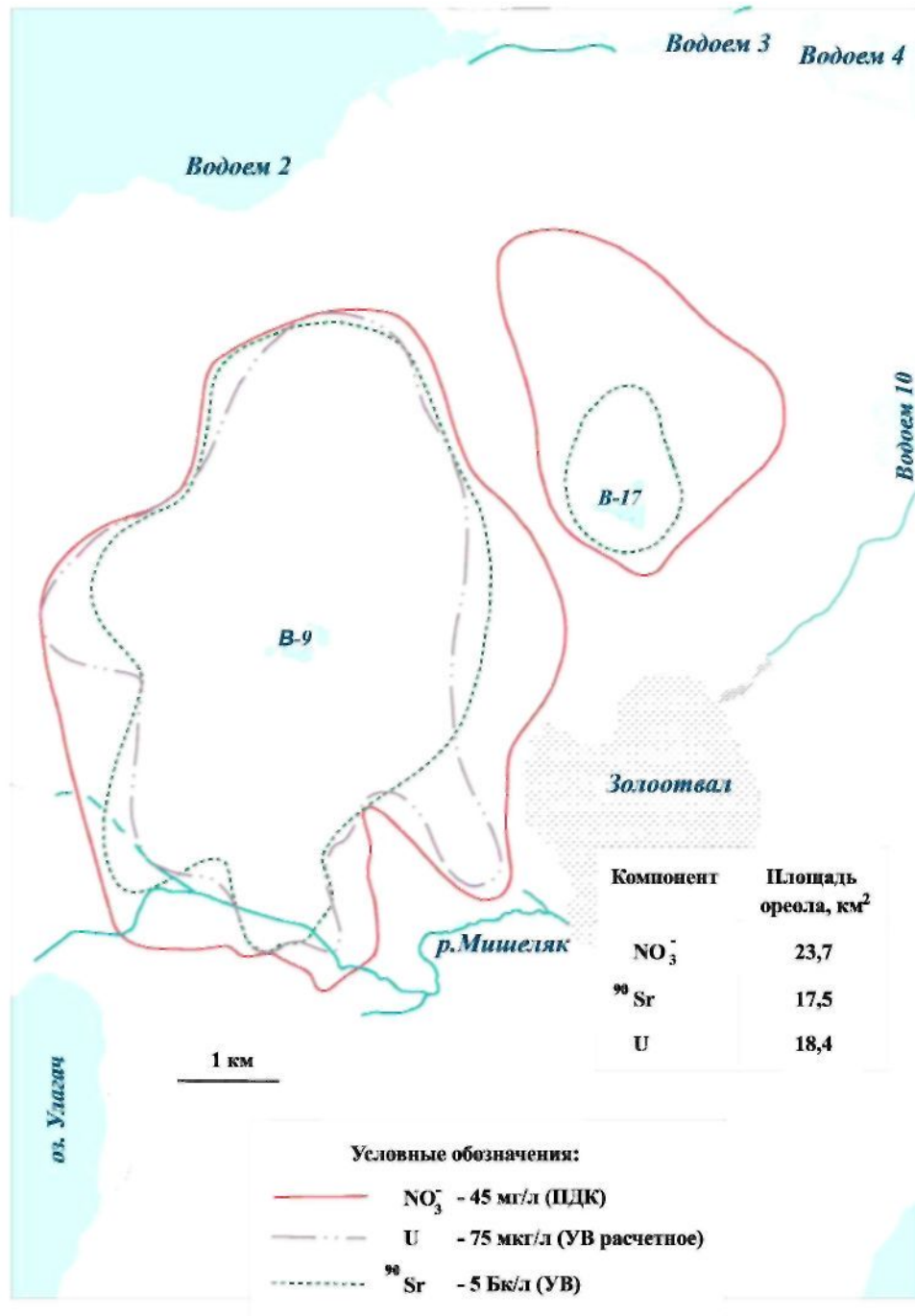


Рис. 1. Распространение основных компонентов-загрязнителей в подземных водах на начало 2000-х гг.

шательства (УВ по НРБ-99 [10]) для радионуклидов к настоящему времени сформировались два отдельных ореола загрязнения подземных вод, в значительной степени различающихся по масштабу проявления.

Гидрогеохимический мониторинг, проведенный в период 1990–2006 гг., показал, что в центральных частях ореолов содержание основных загрязняющих веществ в последние годы оставалось достаточно стабильным, в краевых частях ореолов миграционные процессы продолжают. Загрязненные подземные воды потенциально наиболее экологически опасной южной ветви Карачаевского ореола подошли к р. Мишеляк, после чего скорость их продвижения резко замедлилась, что обусловлено следующими геолого-гидрогеологическими факторами:

- противодавлением водного потока, разгружающегося в р. Мишеляк с юга;
- наличием объемных углублений на поверхности относительного водоупора в районе долины р. Мишеляк, приуроченных к зонам развития коры выветривания, которые являются ловушками для загрязненных подземных вод повышенной плотности до момента своего полного заполнения;
- высокой сорбционной способностью болотных отложений поймы р. Мишеляк по отношению к основным радионуклидам;
- разгрузкой верхней части загрязненных вод в долину реки и уводом их подрусловым потоком в сторону золоотвала, сооруженном на месте естественного болота, природно-техногенные отложения которого являются хорошим сорбентом для радионуклидов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ

В настоящей работе были использованы модифицированные эффективные методы выделения ^{99}Tc и определения его радиоак-

тивности с использованием низкофоновых методов β -спектрометрии, опубликованные в работе [8]. Авторы работы [8] для определения радиоактивности использовали метод жидкостно-сцинтилляционной спектрометрии (TriCarb-2700, Canberra Ind.) или низкофоновой β -спектрометрии (УМФ-2000). Для предварительного концентрирования ^{99}Tc были использованы анионообменные и осадительные методы, в которых Tc(VII) восстанавливали до Tc(IV) и выделяли на коллекторе гидроксида Fe(II) . Для определения химического выхода ^{99}Tc в процессе его концентрирования и выделения использовали метку $^{99\text{m}}\text{Tc}$. Для стандартизации раствора метки $^{99\text{m}}\text{Tc}$ и определения ее радиоактивности после проведения всех аналитических операций использовали гамма-спектрометрию с полупроводниковым детектором. Минимальная детектируемая активность (МДА) составляет 5 Бк/л, погрешность измерения $\pm 2\sigma = 0,05$.

Указанным выше методом было произведено определение концентрации ^{99}Tc в водных пробах водоемов оз. Карачай и Старое Болото, р. Мишеляк и 30 пробах, отобранных из наблюдательных гидрогеологических скважин с разных глубин.

Для оценки защитных свойств среды по отношению к технецию были произведены сорбционные эксперименты на различных грунтах, распространенных на участке долины р. Мишеляк, где происходит разгрузка подземных вод на дневную поверхность.

Химический состав раствора, моделирующего состав грунтовых вод, приведен в табл. 1. Раствор имел значения pH 5 и 8, которые корректировали аликвотами 1M HNO_3 или 1 M NaOH .

Исследование процесса сорбции проводилось в статических условиях. Навеска сорбента (100 мг) помещалась в коническую колбу с определенным объемом раствора, содержащего Tc(VII) (10 мл). Исходная концентрация Tc(VII) в растворе – 10^{-5} моль/л. Соотношение

Таблица 1

Состав растворов, моделирующий состав загрязненных подземных вод района ФГУП «ПО «Маяк»

Концентрация ионов, в мг/л										
Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Fe}^{\text{общий}}$	F^-	Cl^-	HCO_3^-	NO_3^-	NO_2^-	SO_4^{2-}
45	5,3	11,5	1,76	0,04	2,1	6,4	130	10,1	–	18,1

объема раствора к массе сорбента $V/m = 100 \text{ см}^3/\text{г}$. Реагенты в колбе перемешивались при помощи шейкера. Периодически отбирались пробы раствора, содержащего ^{99}Tc , объемом 0,05 мл. Концентрацию ^{99}Tc определяли радиометрически по β -активности с применением жидкостного сцинтилляционного спектрометра "Векман-4900". По данным радиометрического определения технеция в растворе до и после сорбции рассчитывали коэффициент распределения технеция (K_d):

$$K_d = [(I_o - I_n)/I_n] (V/m),$$

где I_o – активность исходного раствора технеция;

I_n – активность раствора после сорбции;

m – масса образца сорбента (г);

V – объем исследуемого раствора (см^3).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение загрязнения подземных вод.

Точки отбора проб подземных и поверхностных вод и результаты измерения в них объемной активности ^{99}Tc показаны на рис. 2. В источниках загрязнения (водоемы оз. Карачай и Старое Болото) объемная активность ^{99}Tc составляет, соответственно, 20500 Бк/л (В-9) и 5700 Бк/л (В-17) [11]. Уровни загрязнения подземных вод изменяются от $\sim 10^4$ Бк/л (для нижних интервалов "области неразбавленных растворов") до фоновых на периферии ореола загрязнения. Яркое выражено возрастание в более глубоких интервалах подземных вод. Для области разгрузки – воды р. Мишеляк - значения измеренной объемной активности изменяются от предела обнаружения используемой методики анализа до 50 Бк/л.

Оконтуренный ореол загрязнения по ^{99}Tc вокруг В-9 в границах УВ (220 Бк/л) имеет площадь 11,7 км², область распространения низкоактивных отходов по ^{99}Tc (10УВ, или 2200 Бк/л) – 2,9 км²; вокруг В-17 образовался менее контрастный ореол площадью 1,2 км². Ввиду относительно малого количества полученных данных о пространственном распределении ^{99}Tc в подземных водах приведенную схему следует рассматривать как предварительную и требующую дальнейшей детализации.

Для выбора компонента-аналога ^{99}Tc по

миграционным свойствам в физико-химических условиях водоносного горизонта района размещения водоемов оз. Карачай и Старое Болото рассмотрены зависимости объемной активности ^{99}Tc в пробах подземных вод от соответствующих концентраций самых миграционно способных техногенных загрязнителей подземных вод – нитрат-иона и урана.

В соответствии с предложенной Б.Г. и Л.М. Самсоновыми классификацией [12], связь ^{99}Tc с нитрат-ионом и ураном определяется как "связь между парой устойчивых в растворе стабильных индикаторов, мигрирующих в анионной форме или в форме нейтральных комплексов" исходя из того, что для ^{99}Tc и изотопов урана период полураспада составляет сотни тысяч и более лет и может не учитываться. Исходя из вышесказанного, искомые зависимости между рассматриваемыми компонентами должны иметь линейную зависимость вида $C_{^{99}\text{Tc}} = aC_{\text{NO}_3^-} + b$ или $C_{^{99}\text{Tc}} = aC_{\text{U}} + b$, где под $C_{^{99}\text{Tc}}$, C_{U} и $C_{\text{NO}_3^-}$ понимаются соответствующие объемные активности/концентрации ^{99}Tc , U и нитрат-ионов, отнесенные к исходной концентрации загрязняющих веществ (под исходной концентрацией понимается максимальная концентрация этих веществ в области неразбавленных растворов, сформировавшейся в водоносном горизонте под ложем оз. Карачай: NO_3^- – 52900 мг/л, U – 62 мг/л, ^{99}Tc – 37700 Бк/л). Использование коэффициента b в линейном уравнении позволяет оценить погрешность и отклонение от пропорциональности полученной оценки (по отношению к максимальной концентрации).

Уравнения линейной зависимости определялись методом наименьших квадратов с помощью программы Statgraphics Plus 5.1. Полученные результаты представлены в табл. 2 и на рис. 3 и 4.

Таблица 2

Уравнения линейной зависимости и коэффициенты корреляции между концентрациями ^{99}Tc , урана и нитрат-иона

Вид зависимости	Коэффициент корреляции r
$^{99}\text{Tc} = 1,193 \cdot \text{NO}_3^- - 0,0046$	0,91
$^{99}\text{Tc} = 0,749 \cdot \text{U} + 0,021$	0,65



Рис. 2. Схема распространения ^{99}Tc в подземных водах района размещения В-9 и В-17

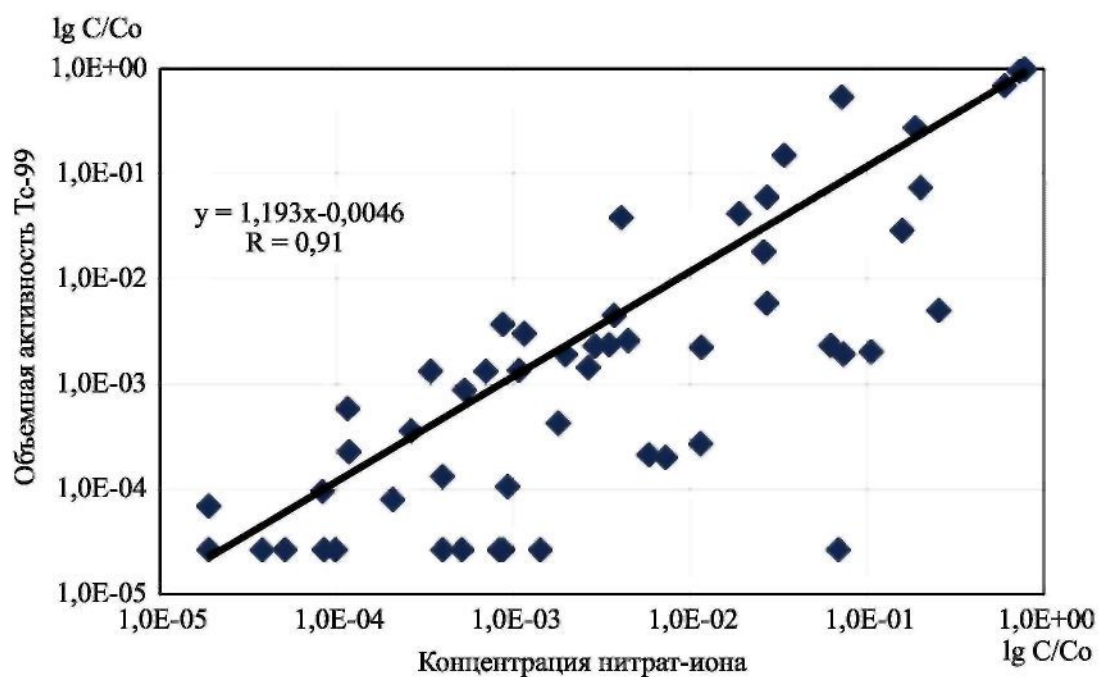


Рис. 3. Зависимость между концентрацией нитрат-иона и объемной активностью технеция-99 в подземных водах

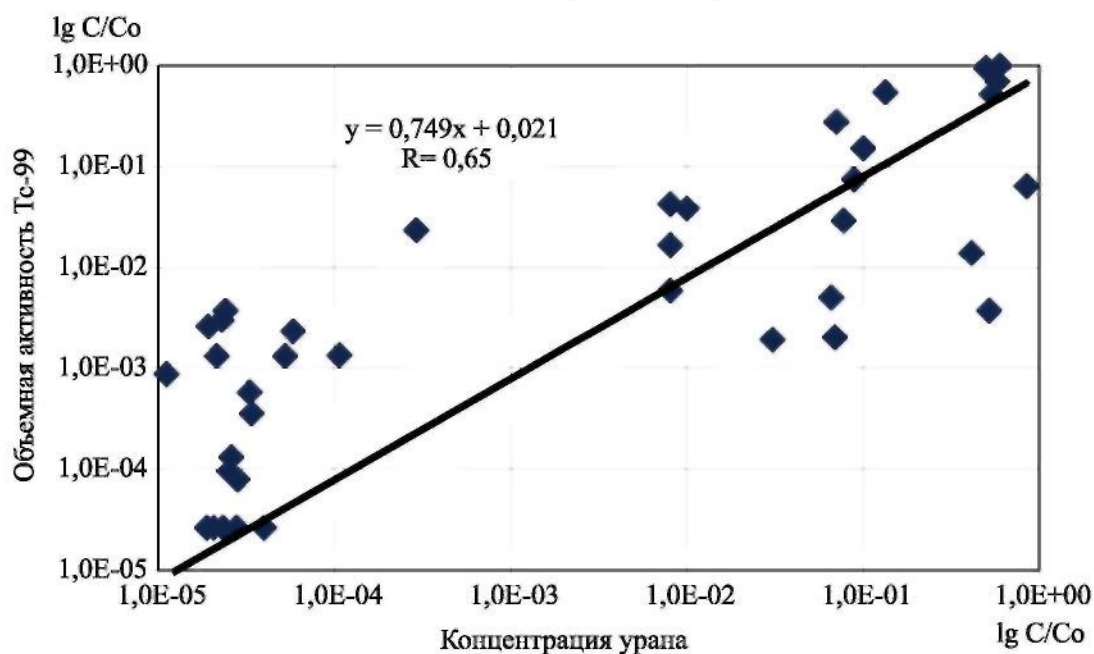


Рис. 4. Зависимость между концентрацией урана и объемной активностью технеция-99 в подземных водах

Обобщая результаты корреляционного анализа, можно сделать следующие выводы:

1. Между концентрациями ^{99}Tc , урана и нитрат-иона в подземных водах существует корреляционная связь, высокие коэффициенты корреляции подтверждают правомерность использования линейной зависимости.

2. Наибольшее сродство выявлено у пары ^{99}Tc -нитрат-ион, это позволяет сделать вывод,

что изменение содержания ^{99}Tc в подземных водах при удалении от источника загрязнения определяется фильтрационной дисперсией, а само его распространение обусловлено, главным образом, несорбируемыми формами.

Сорбция $^{99}\text{Tc(VII)}$ на образцах грунтов.
Для изучения сорбционной способности грунтов, распространенных в долине р. Мишеляк – области разгрузки подземных вод (рис. 5), по

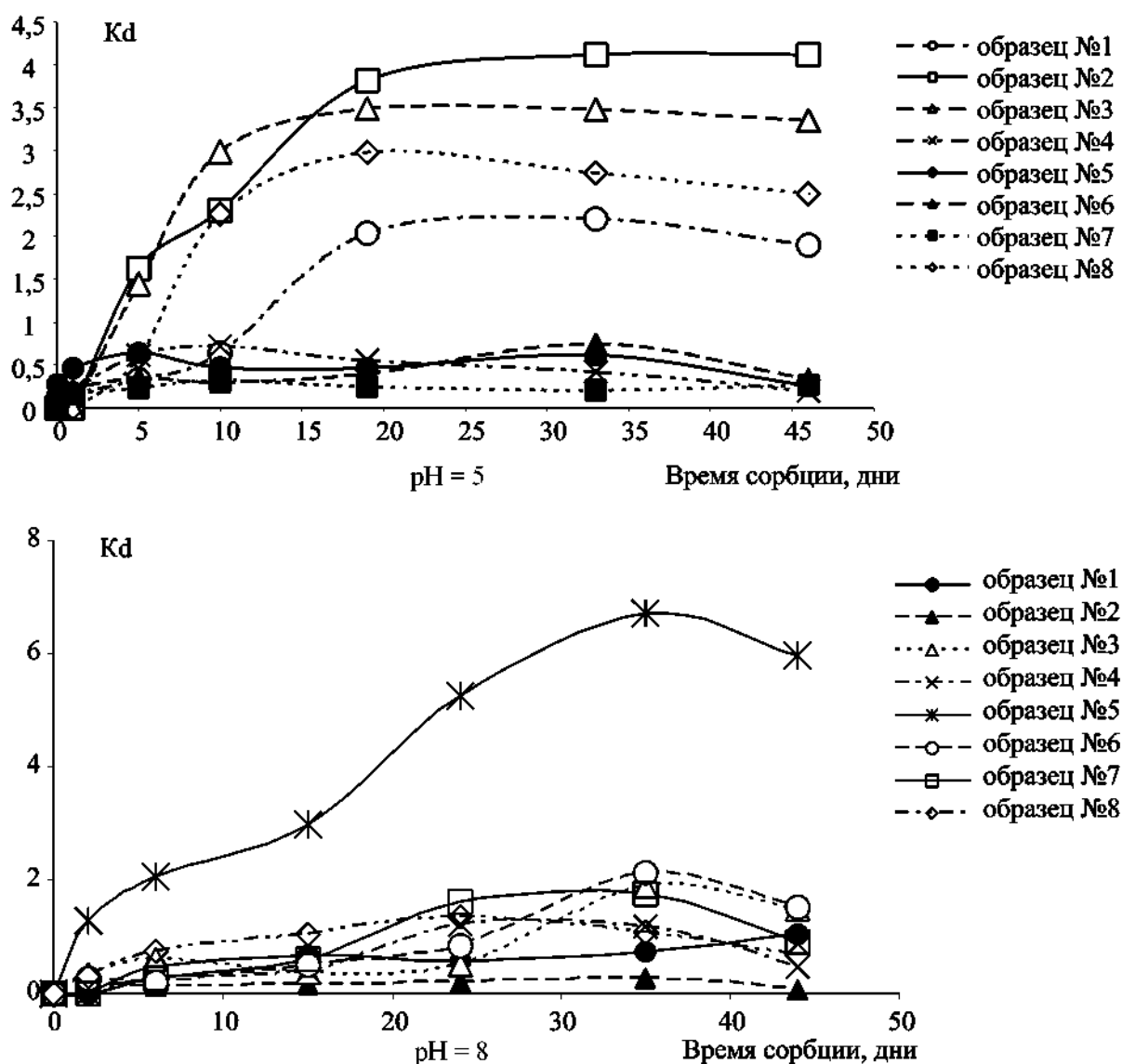


Рис. 5. Сорбция $^{99}\text{Tc(VII)}$ из модельных растворов на образцах грунтов

отношению к ^{99}Tc были приготовлены растворы, моделирующие техногенно измененные природные воды, развитые в районе оз. Карачай, с различными рН (рН = 5 и 8; состав раствора приведен в табл. 1).

Исследованные грунты представлены суглинистым богатым органикой почвенно-растительным слоем (образцы № 1, 2, 4–6), супесями и суглинками (образцы № 7, 8) и глинисто-дресвяной корой выветривания, развитой по порфиритам андезито-базальтового состава (образец № 3). Результаты сорбционных экспериментов представлены на рис. 3.

Полученные результаты показывают невысокий уровень сорбции ^{99}Tc (VII) на исследованных грунтах: значение коэффициента распределения ^{99}Tc изменяется в диапазоне 0,5–6 см³/г и не зависит от литологической разновидности (минералогического состава) грунта.

ВЫВОДЫ

1. Впервые получены данные о наличии значимых концентраций ^{99}Tc в подземных водах района размещения промышленных водохранилищ ЖРО оз. Карачай и Старое Болото.

2. Оценен масштаб загрязнения подземных вод ^{99}Tc . Площадь ореола ^{99}Tc вокруг В-9 в границах значения УВ (220 Бк/л) составляет 11,7 км², в границах распространения НАО – 2,9 км². Площадь ореола ^{99}Tc вокруг В-17 в границах значения УВ составляет 1,2 км². Структура вертикального распределения концентраций ^{99}Tc в подземных водах аналогична определенной ранее для других радиоактивных и нерадиоактивных компонентов-загрязнителей.

3. Изменение содержания ^{99}Tc в подземных водах при удалении от источника загрязнения определяется фильтрационной дисперсией, а само его распространение обусловлено, главным образом, несорбируемыми формами.

4. Грунты, слагающие долину р. Мишеляк, не обладают значимой сорбционной способностью по отношению к ^{99}Tc и поэтому не являются защитным барьером на пути его разгрузки в открытую гидрографическую сеть.

5. Исходя из полученных результатов, которые должны рассматриваться как оценочные, необходимо продолжить натурные и лабора-

торные работы по изучению радиоактивного загрязнения поверхностных и подземных вод района ФГУП “ПО “Маяк” ^{99}Tc с целью получения полной картины о современном уровне загрязнения, путях миграции, формах нахождения и потенциальной опасности ^{99}Tc для жителей ближайших населенных пунктов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект 06-03-33193-а.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дрожко Е.Г., Иванов И.А., Алексахин А.И. и др. Современное состояние подземной гидросферы в районе ПО “Маяк” // Вопросы радиационной безопасности. – 1996. – № 1. – С. 11–19.
2. Иванов И.А., Постовалова Г.А. Миграция техногенного урана в подземных водах района оз. Карачай // Вопросы радиационной безопасности. – 2003. – № 1. – С. 44–52.
3. Radioactive contamination in the environment of the nuclear enterprise “Mayak” PA. Results from the joint Russian-Norwegian field work in 1994 / G.S. Christensen, G.N. Romanov, P. Strand et al. // The Science of The Total Environment, 25 August 1997. – V. 202. – No. 1–3. – P. 237–248.
4. Попова Н.Н., Тананаев И.Г., Ровный С.И., Мясоедов Б.Ф. Технеций: поведение в процессах переработки облученного ядерного топлива и в объектах окружающей среды // Успехи химии. – 2003. – Т. 72. – № 2. – С. 115–137.
5. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля: Пер с англ. / Под ред. Ф.Уорнера и Р.Харрисона – М.: Мир, 1999. – 512 с.
6. Герман К.Э., Фирсова Е.В., Перетрухин В.Ф. и др. Биоаккумуляция Тс, Рн и Нр донными осадками двух типов пресноводных озер Московского региона // Радиохимия. – 2003. – Т. 45. – № 3. – С. 229–235.
7. Трапезников А.В., Позолотина В.Н., Молчанова И.В. и др. Радиоэкологическая характеристика речной системы Теча-Исеть // Экология. – 2000. – № 4. – С. 248–256.
8. Алиев Р.А., Калмыков С.Н., Христенко Р.В., Тананаев И.Г. Разработка методов определения ^{99}Tc в природных объектах // Пятая Российская конференция по радиохимии: Тезисы докладов,

Дубна, 23–27 октября 2006 г. – Озерск: ФГУП “ПО “Маяк”, 2006. – 354 с. – С. 144–145.

9. Лисицин А.К., Мыскин В.И., Ганина Н.И. и др. Защитные геохимические свойства геологической среды района оз. Карачай (методы измерений и интерпретация результатов) // Вопросы рад. безопасности. – 2001. – № 4. – С. 9–23.

10. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99): Гигиенические нормативы. – М.: Центр санитарно-эпидемиологического нормирования, гигиенической сертификации и экс-

пертизы Минздрава России, 1999. – 116 с.

11. Загрязнение подземных вод в районе промышленных водоемов ФГУП “ПО “Маяк” техницием-99 / С.И. Ровный, И.А. Иванов, П.М. Стукалов, И.Г. Тананаев // Пятая Российская конференция по радиохимии: Тезисы докладов, Дубна, 23–27 октября 2006 г. – Озерск: ФГУП “ПО “Маяк”, 2006. – 354 с. – С. 284.

12. Самсонов Б.Г., Самсонова Л.М. Миграция вещества и решение гидрогеологических задач. – М.: Недра, 1987. – 118 с.