

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

# **ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КАТАСТРОФЫ**

**Том II**

**ГЕОЛОГИЯ УРАНА,  
ГЕОЭКОЛОГИЯ, ГЛЯЦИОЛОГИЯ**

Москва  
2011

УДК 504.0  
ББК 26.2  
Г35

**Экстремальные природные явления и катастрофы** : в 2 т. / Отв. ред. А.О. Глико;  
ИФЗ РАН. – М. : ИФЗ РАН, 2010; 2011.

ISBN 978-5-91682-012-6

**Г35 Т. 2 : Геология урана, геоэкология, гляциология** / Отв. ред. В.М. Котляков, ИГ РАН;  
отв. сост. А.Л. Собисевич, ИФЗ РАН; – М. : ИФЗ РАН, 2011.

ISBN 978-5-91682-014-0

Во втором томе коллективной монографии изложены результаты теоретических и экспериментальных исследований, связанных с изучением актуальных проблем современной геологии урановых месторождений, геоэкологии и гляциологии, имеющих целью обеспечение безопасности населения и важных промышленных объектов на территории Российской Федерации. Анализируются основные промышленно-генетические типы урановых месторождений; рассмотрены новые прогрессивные технологии добычи радиоактивных материалов; изучено поведение актинидов в условиях долгосрочного хранения и захоронения отработанного ядерного топлива. Полученные научные результаты отражают современные проблемы безопасности атомной энергетики.

Приведены новые научные данные, связанные с изучением эволюции Антарктического и арктических ледниковых покровов, от состояния которых зависит уровень Мирового океана. Достаточно внимания уделено геоэкологическим проблемам Северного Кавказа. Анализируются уникальные данные, полученные при проведении глубокого кернового бурения ледника на Западном плато вулканической постройки Эльбруса.

Изучены наиболее опасные геоэкологические процессы на территории РФ, которые могут привести к гибели людей, ранению и потере здоровья, а также к значительным материальным ущербам; разработан специальный ГИС-проект, который является готовым к использованию продуктом со всеми элементами, присущими автоматизированной информационной системе специального назначения, содержащей развернутые базы данных.

Полученные новые научные результаты и разработанные технологии уже востребованы на практике.

Для специалистов в области наук о Земле, строительства и чрезвычайных ситуаций.

УДК 504.0  
ББК 26.2

The Volume II of the collective monograph presents the results of both theoretical and experimental studies of actual problems of modern geology of uranium deposits, geoecology and glaciology in order to mitigate issues on public safety and potentially hazardous industrial facilities and consequent risks on the territory of Russian Federation. Primary types of industrial uranium ore deposits are analysed, new progressive technologies of prospecting of radioactive materials are considered, the behaviour of actinides in long-time storages and nuclear waste burial sites are studied. The results obtained represent modern safety problems of nuclear power engineering.

New scientific data related to evolution of glaciers in Arctic and Antarctica governing the global level of world ocean are presented. Specific attention is paid to geoecological problems in Northern Caucasus. Genuine data gathered in the course of deep core drilling on the Western plateau of the Elbrus volcano.

Most significant hazardous geoecological processes on the territory of Russian Federation, threatening populated areas in terms of human health and injury, substantial property damage are studied. The specialized geographical information system (GIS) is the database driven product with high level of automation and it has been developed in frames of the actual research initiative.

The new fundamental scientific results obtained and the new technologies developed are of particular interest for practical applications.

The book will satisfy the needs of specialists in Earth sciences, industrial construction applications and hazard assessment.

ISBN 978-5-91682-014-0  
ISBN 978-5-91682-012-6

© Российская академия наук, 2011  
© Коллектив авторов, 2011

*В.И. Величкин<sup>1</sup>, В.И. Мальковский<sup>1,2</sup>, Н.Н. Тарасов<sup>1</sup>, Ю.П. Диков<sup>1</sup>*

# **АНАЛИЗ УСЛОВИЙ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ В РАЙОНЕ ОЗЕРА КАРАЧАЙ (ЧЕЛЯБИНСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

<sup>1</sup> Учреждение Российской академии наук Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

<sup>2</sup> Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева

Необходимость снижения выбросов парниковых газов, уменьшение невозобновляемых запасов углеводородного сырья наряду с ростом энергопотребления являются причиной того, что атомной энергетике отводится приоритетная роль в долгосрочных программах развития энергетики многих стран. Одним из наиболее существенных препятствий для развития атомной энергетики является накопление отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), представляющего серьезную угрозу для биосферы [Лаверов и др., 2008]. Поскольку в ОЯТ содержатся трансурановые изотопы с большими периодами полураспада, эта угроза сохраняется в течение сотен и тысяч лет. Анализ различных способов изоляции ОЯТ от биосферы показывает, что наиболее перспективным с точки зрения экологической безопасности и экономической целесообразности является размещение ОЯТ в подземных хранилищах на глубине нескольких сотен метров [Krauskopf, 1988]. В этом случае геологическая среда может рассматриваться как один из наиболее эффективных и долговременных барьеров, препятствующих выносу радионуклидов из хранилища ОЯТ в биосферу [Лаверов и др., 1994]. Надежность этого барьера определяется скоростью миграции радионуклидов в породах, в которых предполагается создать подземное хранилище ОЯТ. Оценка экологической безопасности необходима как для потенциальных, так и для уже существующих источников радиоактивного загрязнения подземной среды, представляющих собой, в основном, зоны относительно давних захоронений радиоактивных материалов. На ранних этапах развития атомной промышленности вопросам радиационной безопасности при обращении с радиоактивными отходами (РАО) не уделялось достаточное внимание и использовавшиеся тогда способы захоронения РАО не всегда обеспечивали надежную изоляцию РАО от биосферы. Вследствие этого радионуклиды из зон захоронения РАО загрязняли вмещающие породы и со-

держащиеся в них подземные воды, которые таким образом также становились источниками радиоактивного загрязнения подземной среды [Penrose *et al.*, 1990; Рыбальченко и др., 1994; McCarthy *et al.*, 1998; Алексахин и др., 2007; Gee *et al.*, 2007; Мальковский и др., 2009]. Исследование миграции радионуклидов на этих участках радиоактивного загрязнения имеет очень большое значение, поскольку оценка скорости миграции радионуклидов в подземной среде на основе только лишь теоретического моделирования или лабораторных экспериментов может привести к серьезным ошибкам. Это связано с тем, что теоретические модели или идеализированные условия лабораторного эксперимента могут не отражать специфических особенностей реальной геологической среды. Согласно данным натурных наблюдений, проведенных на многих участках радиоактивных загрязнений подземной среды, истинная скорость миграции радионуклидов может значительно превышать оценки, полученные из теоретического моделирования и лабораторных экспериментов, что объяснялось наличием коллоидной формы переноса радионуклидов подземными водами [Nyhan *et al.*, 1985; Penrose *et al.*, 1990; McCarthy *et al.*, 1998; Zachara *et al.*, 2002]. Специфика условий распространения радиоактивного загрязнения в геологической среде связана не только с формами переноса радионуклидов, но и с составом, гидрогеологическими характеристиками и структурой пород и составом и свойствами подземных вод. Поэтому представляется необходимым проведение комплексного исследования геологической среды на участках радиоактивного загрязнения. Результаты такого исследования имеют большое значение как для надежности прогнозов распространения загрязнения на конкретном участке, так и для определения общих закономерностей миграции радионуклидов в подземной среде. В статье приведены результаты комплексного геологического, геохимического и гидрогеологического исследования

условий миграции радионуклидов в подземном пространстве на участке значительного радиоактивного загрязнения подземной среды в районе оз. Карабай (Челябинская обл.).

## ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ

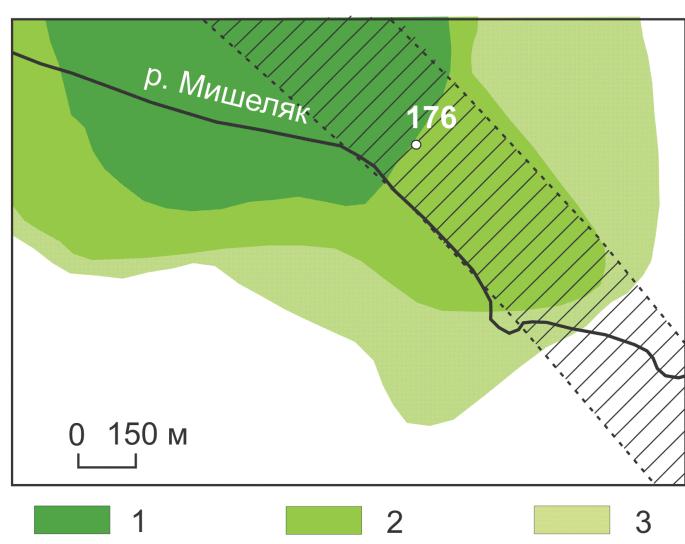
Бессточное озеро Карабай, расположенное на водоразделе рек Теча и Мишеляк, использовалось с 1951 г. в качестве открытого хранилища жидких радиоактивных отходов (ЖРО) Производственного объединения (ПО) «Маяк». ЖРО представляли собой высокоминерализованные водные растворы, плотность которых достигала  $1,08 \text{ г/см}^3$  [Дрожко и др., 1996]. Вследствие высокой плотности растворы под действием силы тяжести прошли через слой донных илов озера и растеклись вдоль нижней водоупорной границы верхнего водоносного горизонта.

По своему составу эти растворы являются преимущественно нитратно-натриевыми. Поэтому условная граница ореола загрязнения подземной среды в плановой проекции определяется как линия на горизонтальной плоскости, вдоль которой средняя по мощности водоносного горизонта концентрация нитрат-иона равна предельно допустимому значению ( $0,045 \text{ г/л}$ ). За период использования оз. Карабай в качестве хранилища ЖРО в подземные воды из озера поступило приблизительно  $3,5 \times 10^6 \text{ м}^3$  растворов, содержащих около  $1,4 \times 10^8 \text{ кг}$  нитрат-иона и радионуклиды, общая бета-активность которых имеет порядок  $9 \times 10^5 \text{ Ки}$  [Дрожко и др., 1996].

## ПОДЗЕМНАЯ СРЕДА

Санитарно-защитная зона ПО «Маяк», на территории которой находится оз. Карабай, расположена на массиве трещиноватых пород, вытянутом в меридиональном направлении на выплаживающейся части восточного склона Уральских гор. Радионуклиды в этих породах переносятся течением подземных вод в приповерхностной гидрогеологической системе, сформированной двумя комплексами пород. Нижний комплекс образован раннепалеозойскими вулканитами андезито-базальтового состава, метаморфизованными в условиях зеленосланцевой фации. Породы нижнего комплекса (андезито-базальтовые афировые и порфировидные лавы, туфолавы и туфы) имеют малую пористость (порядка десятых долей процента) и малую проницаемость при отсутствии разрывных нарушений [Величкин и др., 2008]. Верхний комплекс сформирован преимущественно среднемезозойской корой выветривания вулканитов андезито-базальтового состава, частично перекрытой кайнозойскими песчано-глинистыми осадками и почвенным слоем. Мощность коры выветривания на участке распространения

загрязнения подземной среды сильно колеблется (от 1 м до 100 м и более). В профиле выветривания можно выделить сверху вниз три зоны: зона глинистых минералов, образовавшихся в результате глубокой гипергенной переработки исходных вулканитов, зона начальных глинистых изменений, образованная выветрелыми пористыми и трещиноватыми останцами андезито-базальтов, смешанными с глинистыми минералами гипергенного происхождения, и зона дезинтегрированных вулканитов, разбитых сетью трещин гипергенного и тектонического происхождения. Проницаемость верхней зоны невелика, две нижние зоны, обладающие значительно большей проницаемостью, образуют водоносный горизонт, в котором в основном сосредоточено течение подземных вод, переносящих радиоактивное загрязнение в геологической среде в районе оз. Карабай. Средняя скорость течения по данным [Дрожко и др., 1996] составляет приблизительно 0,2 м/сут. Проницаемость пород водоносного горизонта (особенно в нижней его зоне) существенно зависит от наличия разрывных нарушений в виде трещин и вследствие этого неоднородна по вертикали с резкими локальными максимумами в интервалах повышенной трещиноватости. Снизу этот водоносный горизонт ограничен слабопроницаемыми плотными породами нижнего комплекса. Значительное влияние на течение подземных вод оказывают крупные тектонические швы и зоны трещиноватости в породах нижнего комплекса, образующие желобообразные впадины в нижней границе водоносного горизонта [Величкин и др., 2008]. Вдоль этих впадин за счет более высокой трещиноватости



**Рис. 1.** Распределение концентраций нитрат-иона в южной части ореола загрязнения в районе оз. Карабай в 2004 г. по [Алексахин и др., 2007]

Положение скважины № 176 показано кружком. Штриховкой, ограниченной пунктирными линиями, показана зона Мишелякского разлома. Концентрации нитрат-иона: 1 – от 4,5 до 20 г/л; 2 – от 0,45 до 4,5 г/л; 3 – от 0,045 до 0,45 г/л

возрастает проницаемость пород водоносного горизонта и одновременно существенно увеличивается его мощность. Вследствие этого такие впадины, связанные с тектоническими нарушениями пород нижнего комплекса, играют роль дополнительных дренирующих структур, вдоль которых подземные воды в водоносном горизонте движутся с повышенными скоростями, чем определяется наблюдаемая форма южной части ореола загрязнения [Величкин и др., 2008] (рис. 1).

## МОНИТОРИНГ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Распространение загрязненных подземных вод в районе оз. Карабай определяется преимущественно на основании гидрохимического каротажа в сети наблюдательных скважин, пробуренных на загрязненном участке и прилегающей территории, и анализа проб воды, отобранных в этих скважинах.

Одним из наиболее эффективных средств, применявшихся для гидрохимического каротажа в районе оз. Карабай, является разработанный с участием ИГЕМ РАН многоканальный зонд. Он представляет собой портативную автоматизированную измерительную систему, включающую скважинный прибор, наземный блок, регистратор каротажей и датчик перемещения кабель-троса (датчик глубины).

Скважинный прибор состоит из блока датчиков, микропроцессорного измерительного преобразователя с шифратором-передатчиком и блока тестирования измерительных каналов. Датчики расположены в нижней части блока и предназначены для преобразования измеряемых параметров в электрические сигналы, которые подаются на входы измерительных преобразователей. В комплект входят датчики для измерения электропроводности, температуры, давления, растворенного кислорода, а также пять сменных потенциометрических электродов для измерения pH, Eh, pNO<sub>3</sub>, pNa и других параметров, в зависимости от поставленных задач исследований.

Наземный электронный блок содержит микропроцессор, блок питания, устройство согласования, устройство сопряжения с компьютером. К электронному блоку подключен также датчик перемещения троса для измерения глубины положения зонда в скважине. Измерительные сигналы поступают в наземный блок каждые 2 секунды. При скорости спуска зонда менее 10 см/с это дает возможность производить измерения с шагом по глубине 20 см.

Использование подобных измерительных систем, позволяющих получать распределения параметров подземных вод по глубине, представляется весьма важным для исследования загрязнения в районе оз. Карабай. Это связано с тем, что загрязненные подземные воды стратифицированы под действием силы тяжести. Более плотные (и поэтому более загрязненные) растворы опускаются к нижней границе водоносного горизонта. Вследствие этого гидрохе-

мический каротаж (ГХК) с высоким разрешением по глубине позволяет определять условия миграции загрязнения на разных глубинах и установить пути миграции загрязнения.

Гидрохимический мониторинг с помощью описанного выше многоканального зонда в южной части ореола загрязнения подземных вод, распространяющегося от оз. Карабай, проводился с 1993 г. по 2008 г. (рис. 2). Для анализа динамики загрязнения рассматривались два профиля, ориентированных вкрест друг к другу. Профиль А–А имеет преимущественно юго-восточную ориентацию и характеризует преобладающее движение южной части загрязненных подземных вод в направлении Мишелянского разлома. Этот разлом представляет собой линейную тектоническую зону юго-восточного направления шириной до 1000 метров, в пределах которой породы подвержены дроблению, рассланцеванию и рассечены субпараллельными тектоническими швами и полосами сближенных трещин. Профиль В–В ориентирован преимущественно в северо-западном направлении и характеризует расширение ореола загрязнения относительно преобладающего направления движения.

Анализ данных геологических и гидрохимических исследований за период 1993–1998 годов подтвердил, что направление перемещения загрязненных вод в южной части ореола загрязнения контролируется Мишеляским разломом. В 1994 году в скважине № 176 появились первые признаки загрязнения, которые выразились в незначительном увеличении электропроводности, появлении повышенных концентраций нитрата и натрия, снижении pH и возрастании окислительного потенциала в интервале глубин 60–75 м. К этому времени участок водоносного горизонта, вскрытый скважиной № 173, еще оставался не загрязненным. В 1998 году фронтальная часть загрязненного потока практически достигла реки Мишеляк. Об этом свидетельствует распределение нитрат-иона в разрезе А–А (рис. 3) с учетом того, что предельно допустимая концентрация NO<sub>3</sub> соответствует значение рNO<sub>3</sub> = 3,1. Граница загрязненного фронта четко прослеживается между скважинами № 176 и № 173, входящими в профиль А–А. Загрязненные воды в этой области характеризовались окислительными значениями Eh (до +280...+300 мВ), высокой электропроводностью (выше 1 См/м) и повышенным содержанием нитратов (до 3900 мг/л).

Профиль В–В расположен вкрест потока загрязненных подземных вод (рис. 2). Крайняя скважина восточной части профиля В–В (№ 175) располагается на северо-восточном крае серии разрывных нарушений, образующих Мишелянский разлом. В скважинах № 174 и 175, как и в скважине № 176, отмечается увеличение со временем электропроводности подземных вод, pH изменение из слабощелочного (8–8,1) до близнейтрального, увеличение окислительного потенциала и концентрации нитрата и натрия в подземных водах. В скважине № 174 по данным ГХК зафиксирована зона притока загрязненных подземных

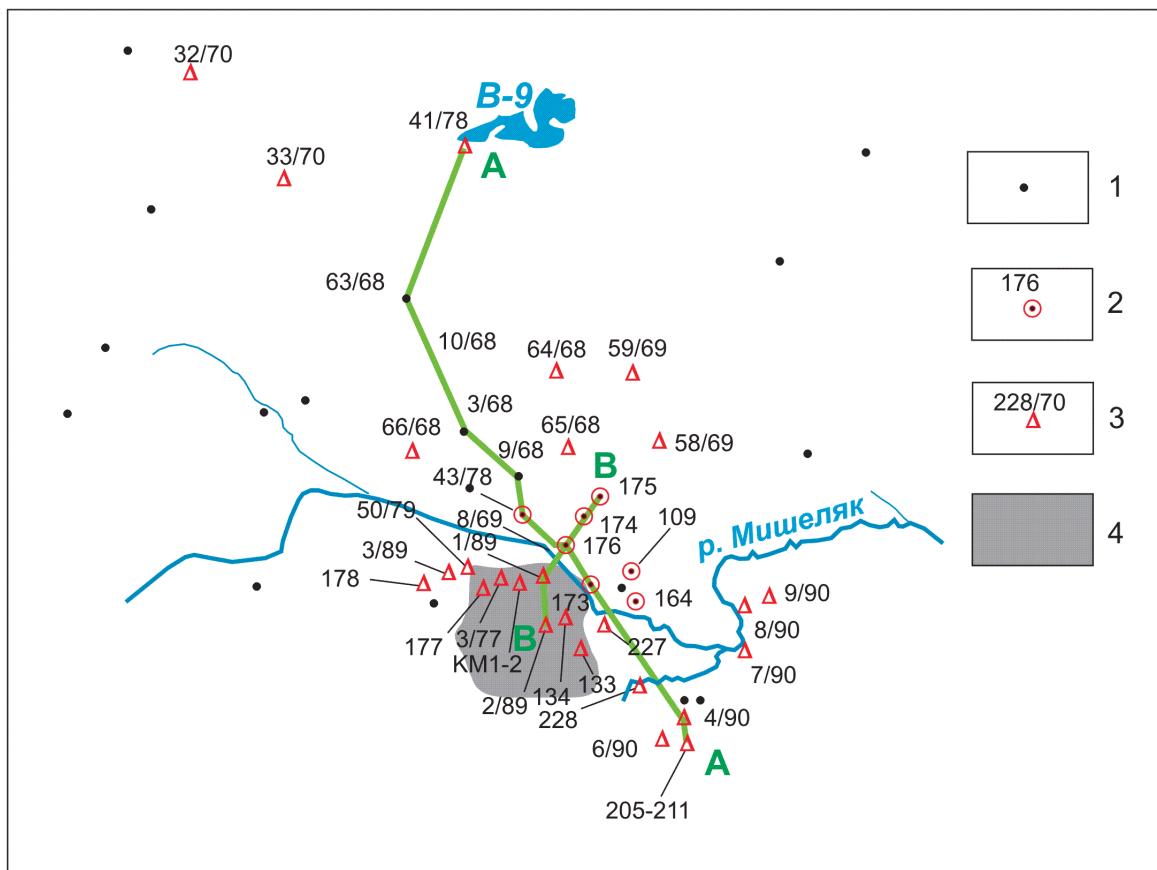


Рис. 2. Карта гидрогеохимического каротажа, проведенного в южной части ореола радиоактивного загрязнения в районе оз. Караачай.

1 – наблюдательные скважины; 2 – скважины, в которых проводился гидрогеохимический каротаж в 2006–2007 гг.; 3 – скважины, в которых проводился гидрогеохимический каротаж с 1993 г.; 4 – старый золоотвал

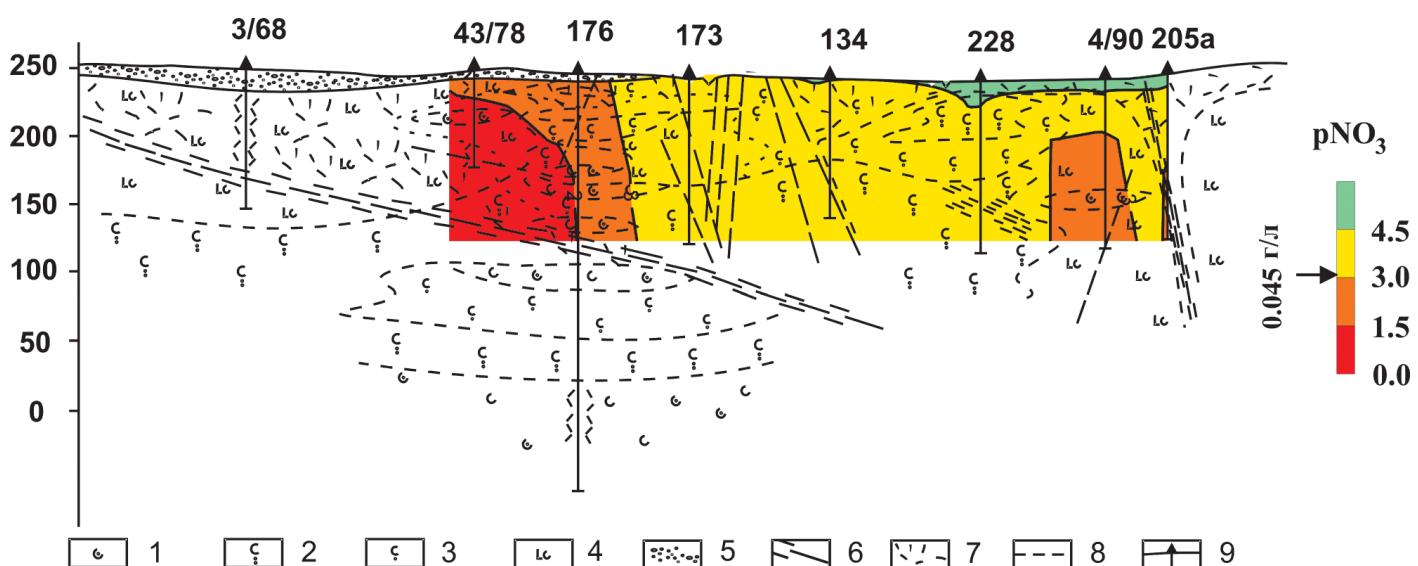


Рис. 3. Распределение нитрат-иона в профиле А-А в 1998 г. по данным гидрогеохимического каротажа.

1 – туфоалевролиты и туфопесчаники; 2 – туфы; 3 – псефитовые туфы; 4 – лавы и туфолавы; 5 – четвертичные отложения; 6 – разрывные нарушения; 7 – зоны повышенной трещиноватости; 8 – литологические границы; 9 – скважины

вод – на глубине от 35 до 60 м. Воды этой скважины на протяжении всего периода наблюдений характеризуются относительно низкой электропроводностью (до 1 См/м), которая однако возрастала со временем. Так в 1995 г. ее максимальные значения не превышали 0,2 См/м, в 1998 – уже достигали 0,3 См/м, а 2007 – 0,4 См/м. За период с 1995 по 2007 год pH снизился с 8,0 до 7,2. Окислительный потенциал за 12 лет изменился более чем 70 милливольт (с +170 до +247 мВ). Концентрация натрия на протяжении описываемого периода времени сначала повышалась (до 1998 г.), однако в 2007 г. снизилась до уровня 1995 г. (29,6 мг/л). Содержание нитрат-иона в подземных водах, вскрываемых скважиной № 174, значительно возросло (с 780 мг/л в 1998 г. до 1,98 г/л). В 2007 г. в скважине № 174 отмечается подъем к поверхности верхней границы проникновения загрязненных подземных вод относительно 1993 и 1998 гг. Так, в 1993–1998 гг. резкий скачок электропроводности проявлялся на глубине 60 метров, а в 2007 г. – уже на глубине 35 м.

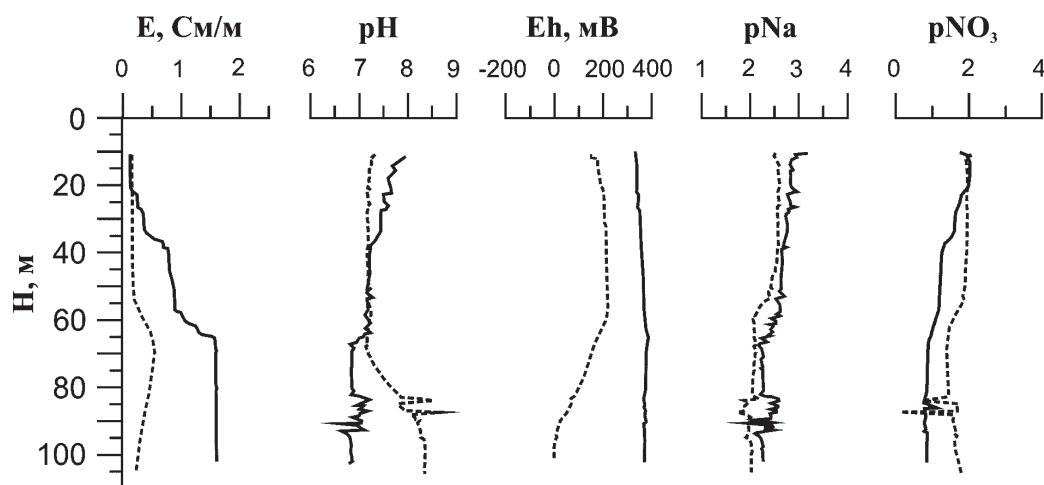
Подземные воды, вскрываемые скважиной № 175, являются наименее загрязненными по сравнению со скважинами № 174 и 176. Поскольку скважина № 175 располагается на периферии Мишелякского разлома, а скважины № 174 и 176 – в его пределах, это доказывает, что разлом в значительной степени контролирует движение южной части загрязненных подземных вод от оз. Карабай.

## ДИНАМИКА И ФОРМЫ ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЕНИЯ

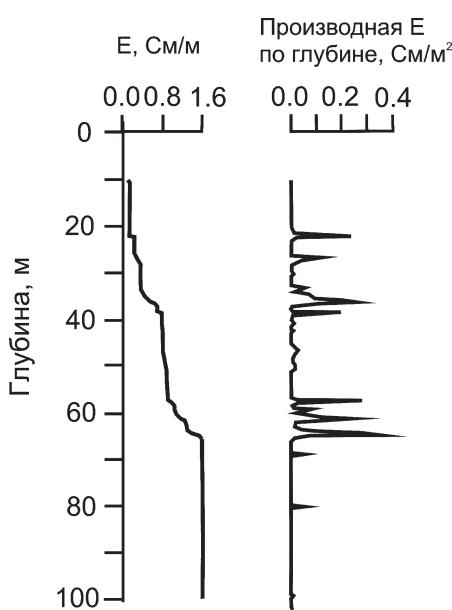
Скважина № 176 расположена практически в осевой зоне Мишелякского разлома, т. е. на одном из основных путей движения загрязненных подземных

вод. Вследствие этого изменения характеристик загрязнения подземных вод, вскрытых этой скважиной, вполне отражают общие закономерности динамики загрязнения подземной среды в районе оз. Карабай. В 2007 г. по сравнению с 1998 г. в подземных водах в скважине № 176 было отмечено увеличение электропроводности (с 0,9 до 1,7 См/м), снижение pH (с 7,1 до 6,8), рост окислительного потенциала (с +200 до +386 мВ) при незначительном изменении концентрации нитрат-иона и натрия (рис. 4).

Сравнительный анализ результатов ГХК за период 1998–2007 гг. позволил выявить существенную неоднородность транспортных свойств (главным образом, проницаемости) пород верхнего водоносного горизонта, по которому, в основном, распространяется загрязнение. Уже к 1998 году в этой скважине четко выделяются три интервала притока нитратно-натриевых растворов – на глубинах 20, 40 и 60 м. Об этом свидетельствуют резкие скачки электропроводности подземных вод, отмеченные при проведении ГХК в скважине № 176, наиболее наглядно иллюстрируемые пиками производной электропроводности по глубине (рис. 5). Данные ГХК о неоднородности пород водоносного горизонта в полной мере подтверждаются результатами ориентированной фотометрии в скважине № 176 (рис. 6), согласно которым глубины, на которых происходит резкое увеличение электропроводности, коррелируют с верхними границами интервалов повышенной трещиноватости пород горизонта. Как уже отмечалось, под действием силы тяжести происходит закономерная стратификация растворов, в результате которой более плотные и более загрязненные растворы располагаются у нижней водоупорной границы водоносного горизонта. Однако результаты фотометрии указывают на существенную неоднородность фильтрационных свойств пород, вследствие которой зависимость плотности и уровня загрязнений растворов от глубины имеет нерегулярный характер с чередованием резких скачков



**Рис. 4.** Изменение параметров загрязнения в скважине № 176 за период 1994–2007 г. по данным гидрогеохимического каротажа. Пунктирными линиями показаны результаты каротажа за 1994 г., сплошными – за 2007 г.

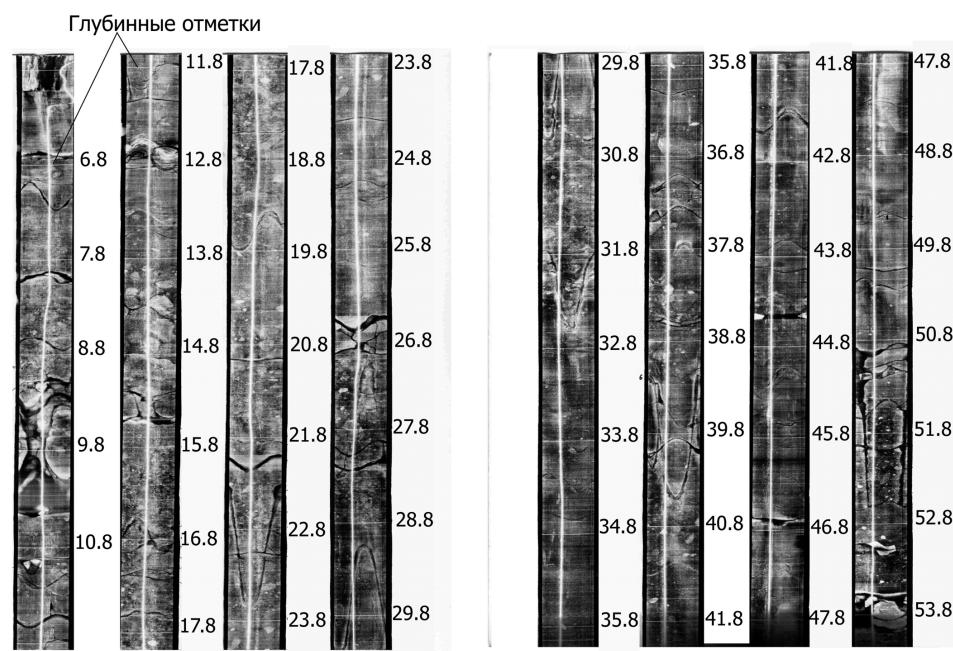


**Рис. 5.** Зависимость проводимости подземных вод в скважине № 176 и ее производной от глубины по данным гидрогеохимического каротажа за 2007 г.

и относительно пологих участков. Этим участкам соответствуют зоны с приблизительно однородными, но отличающимися друг от друга геохимическими условиями, в частности концентрациями нерадиоактивных и радиоактивных компонент растворов. Установление этой зональности представляется важным не только для оценки общего уровня загрязнения по всей толщине водонасыщенного слоя пород, но и для

определения специфических условий и форм переноса загрязнения в каждой зоне.

Исследования, проведенные на участках значительных радиоактивных загрязнений подземной среды показали, что существенная часть как осколочных, так и трансурановых радионуклидов может переноситься подземными водами в коллоидной форме [Penrose *et al.*, 1990; Kersting *et al.*, 1999]. Наиболее значительной частью коллоидных частиц, содержащих радионуклиды, (радиоколлоида) является псевдоколлоид, состоящий из коллоидных частиц естественного происхождения, загрязненный радионуклидами в результате контакта с радиоактивными материалами [Buck, Bates, 1999; Мальковский, Пэк, 2009]. Поскольку практически идентичные по составу нерадиоактивные коллоидные частицы в подземных водах взаимодействовали со вмещающими породами задолго до возникновения радиоактивного загрязнения, распределение частиц между подземными водами и породами близко к равновесному. Вследствие этого частицы псевдоколлоида слабо осаждаются на вмещающих породах, что существенно уменьшает защитные свойства геологической среды. Это может существенно увеличить скорость миграции радионуклидов в подземной среде. Такое предположение было сделано для объяснения того, что реальные скорости распространения радиоактивного загрязнения подземной среды значительно превышают прогнозируемые теоретически без учета коллоидной формы переноса радионуклидов [Nyhan *et al.*, 1985; Penrose *et al.*, 1990; McCarthy, 1998a,b; Zachara *et al.*, 2002].



**Рис. 6.** Данные ориентированной фотометрии, проведенной в скважине №176.

Белая вертикальная линия соответствует направлению на север. Цифрами показана глубина в метрах от земной поверхности

**Таблица.** Результаты фильтрации и  $\gamma$ -спектрометрии

Глубина отбора пробы, м →	20		40	60
Активность, Бк/кг ↓	$^{40}\text{K}+^{60}\text{Co}$	$^{238}\text{U}$	$^{40}\text{K}+^{60}\text{Co}+^{238}\text{U}$	$^{40}\text{K}+^{60}\text{Co}+^{238}\text{U}$
Исходная			440	890
После фильтра 0,45 мкм	65	10	420	650
После фильтра 200 нм	57	1,4	430	610
После фильтра 100 нм	61	0	440	

Осаждение радиоколлоида на вмещающих породах (с ранее осажденными на них нерадиоактивными частицами, аналогичными по составу частицам радиоколлоида) определяется кулоновским взаимодействием частиц и поверхности каналов фильтрации, по которым осуществляется движение подземных вод. Это взаимодействие зависит от значений  $\zeta$ -потенциалов частиц и поверхности каналов фильтрации. Если  $\zeta$ -потенциалы частиц и пород имеют один и тот же знак, возникает барьер отталкивания и частицы слабо осаждаются на породах. Поскольку концентрация раствора влияет на значение  $\zeta$ -потенциала твердой фазы [Адамсон, 1979], изменение концентрации приводит к изменению интенсивности осаждения коллоидных частиц из раствора на вмещающих породах [Gregory, Wishart, 1980; Shonnard *et al.*, 1994]. Вследствие этого исследование роли коллоидной формы переноса радионуклидов целесообразно проводить в каждой из выделенных зон водоносного горизонта. Для этого в скважине № 176 осуществлялся отбор проб воды с глубины 20, 40 и 60 м. Коллоидная форма переноса радионуклидов исследовалась на этих пробах путем последовательных повторяющихся экспериментов. В каждом опыте сначала определялся  $\gamma$ -спектр воды, затем она пропускалась через мембрану с определенным размером пор, после чего снова определялся  $\gamma$ -спектр воды. В результате определялась доля различных  $\gamma$ -активных радионуклидов, содержащихся в пробе в коллоидной форме. Эти эксперименты повторялись при последовательном уменьшении размеров пор мембранны (0,45 мкм, 200 нм и 100 нм). Согласно данным спектроскопии  $\gamma$ -активность проб обусловлена тремя радионуклидами:  $^{40}\text{K}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и  $^{238}\text{U}$ . Результаты экспериментов приведены в таблице.

Согласно данным спектроскопии,  $\gamma$ -активность воды определяется (в пределах чувствительности анализа) тремя радионуклидами:  $^{40}\text{K}$ ,  $^{60}\text{Co}$  и  $^{238}\text{U}$ . Уровень  $\gamma$ -активности во всех пробах воды обусловлен преимущественно радионуклидом  $^{60}\text{Co}$ . Это вполне согласуется с данными о плановом распределении различных радионуклидов на рассматриваемом участке, приведенными в [Алексахин и др., 2007]. Вследствие стратификации растворов под действием силы тяжести концентрация радиоактивного и не-радиоактивного загрязнения подземных вод возрастает с глубиной. По-видимому, высокое содержание  $^{60}\text{Co}$  в пробах, отобранных на глубине 40 м и 60 м, не позволяет выделить из спектров составляющие,

соответствующие  $^{238}\text{U}$ , с достаточной точностью. Более низкий уровень  $\gamma$ -активности пробы, отобранный с глубины 20 м, позволил определить компоненту, соответствующую  $^{238}\text{U}$ .

Из таблицы следует, что при последовательной фильтрации проб, отобранных с глубины 40 и 60 м, через мембранны с уменьшающимся диаметром пор уровень  $\gamma$ -активности не меняется или меняется незначительно. Это позволяет утверждать, что в этих пробах радионуклиды содержатся либо в ионной форме, либо в виде комплексов или частиц, размеры которых меньше 100 нм. Вместе с тем в пробе, отобранный с глубины 20 м, содержание  $^{238}\text{U}$  значительно снижается, а после пропускания через мембрану с диаметром пор 100 нм этот радионуклид в фильтрате практически отсутствует. Тем самым,  $^{238}\text{U}$  в подземных водах на этих глубинах, по-видимому, преимущественно связан с частицами, размеры которых превышают 100 нм.

Элементный состава коллоидных частиц исследовался методом Оже-спектроскопии на установке PHI 660 (Perkin/Elmer). Существенным достоинством метода является то, что он позволяет определять элементный состав в локальной точке поверхности отдельных частиц. Вполне достоверным можно считать уровень разрешения метода, приблизительно равный 0,5 мкм. В связи с этим для анализа использовались только частицы, осажденные на мембране с самым большим диаметром пор (0,45 мкм). Для проведения анализа частицы с фильтра переносились на индийскую подложку, затем на их поверхности выбирались точки для определения элементного состава. Согласно результатам Оже-спектроскопии, основными элементами в составе поверхности частиц являются С, О, Ca, N, Na, Al, S с явным преобладанием С и заметным содержанием S. Наличие на поверхности частиц большого количества углерода с примесью серы вполне объясняется тем, что скважина № 176, в которой осуществлялся отбор проб, находится практически на границе одного из золоотвалов Аргаяшской угольной ТЭЦ (рис. 2) [Соловьев и др., 2005]. Поскольку, согласно [Алексахин и др., 2007], на рассматриваемой территории заметную площадь занимают и другие золоотвалы, наличие в элементном составе псевдоколлоидов существенного количества углерода и примесей серы может быть распространенным в районе оз. Карабай. Суммирование процентных содержаний каждого элемента по всем исследованным частицам

из проб воды, отобранных с каждого уровня, показало, что значительные изменения в содержаниях большей части элементов при изменении глубины отбора пробы отсутствуют. Данные Оже-спектроскопии показывают, что соотношение элементов таково, что они не являются составными частями какого-либо одного соединения или минерала. Это означает, что поверхность каждой частицы неоднородна по составу. По-видимому, это является следствием того, что каждая частица сформирована из более однородных по составу и более мелких частиц в результате их коагуляции [Buffle *et al.*, 1998].

Помимо элементного состава поверхности коллоидных частиц определялся ее химический состав методом рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии на установке ESCA-5950 B (Hewlett-Packard) с энергетическим разрешением 0,7 эВ. Согласно результатам анализа, поверхность частиц содержит как органические, так и неорганические компоненты. Неорганические компоненты поверхности представлены преимущественно слоистыми гидросиликатами (хлорит) с незначительными количествами  $\text{CaCO}_3$ , гидроксидов железа и таких глинистых минералов, как иллит, каолинит и монтмориллонит. Отмечено, что при увеличении глубины отбора проб содержание органической составляющей на поверхности частиц существенно уменьшается. После анализа поверхностного состава частиц с каждого фильтра проводилось их ионное травление на глубину приблизительно 100 Å. Затем анализ химического состава новой поверхности частиц проводился еще раз. Результаты этого анализа показали, что после травления на новой поверхности частиц значительно уменьшается содержание органических веществ и увеличивается содержание гидроксидов железа. Особенно отчетливо эта тенденция проявляется на коллоидных частицах из проб, отобранных с малых глубин. Отсюда следует, что органические вещества образуют оболочку на поверхности неорганических частиц. Как показывают данные элементного и химического анализа поверхности частиц, эта оболочка не является сплошной.

Полученные данные позволяют объяснить результаты опытов по фильтрации и  $\gamma$ -спектрометрии. Известно, что уран хорошо сорбируется органическими веществами, в частности, гуминовыми и фульвиновыми кислотами [Czerwinski *et al.*, 1994]. Размеры молекул этих кислот относительно невелики, вследствие чего они не могут задерживаться фильтрами с диаметром пор не менее 100 нм. Однако гуминовые и фульвиновые кислоты могут образовывать оболочку на неорганических коллоидных частицах большего размера. Это, по-видимому, привело к тому, что после фильтрации через мембранию с размерами пор 100 нм  $^{238}\text{U}$  в пробе, отобранный с глубины 20 м, практически отсутствовал. Вместе с тем, в пробах, отобранных с глубины 40 и 60 м, фильтрация не привела к существенному уменьшению  $\gamma$ -активности. Для объяснения этого следует иметь в виду, что концентрация гуминовых и фульвиновых кислот в под-

земных водах уменьшается с увеличением глубины. Таким образом, количество относительно крупных неорганических коллоидных частиц с органической оболочкой с ростом глубины уменьшается. Вместе с тем, концентрация урана в подземных водах на рассматриваемом участке значительно увеличивается с глубиной, а в [Иванов, Постовалова, 2003] отмечаются сравнительно высокие скорости миграции техногенного урана в подземной среде в районе оз. Карачай. Это означает, что в более глубоких зонах водоносного горизонта уран переносится подземными водами в виде слабо сорбируемых комплексов, размеры которых существенно меньше 100 нм. Поскольку анализ подземных вод на рассматриваемом участке методом гидрогеохимического каротажа показал наличие в них повышенных концентраций  $\text{CO}_2$  [Solodov *et al.*, 1998], уран в глубоких зонах исследуемого водоносного горизонта может формировать относительно высокоподвижные комплексы с карбонат-ионом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Движение загрязненных подземных вод в юго-западном направлении от оз. Карачай осуществляется преимущественно по верхнему водоносному горизонту, образованному дезинтегрированными вулканитами, разбитыми сетью трещин гипергенного и тектонического происхождения. Снизу горизонт ограничен слабопроницаемыми плотными породами основания. Это течение подземных вод в значительной степени контролируется Мишелякским разломом, представляющим собой субвертикальную зону сближенных тектонических нарушений. Фильтрационные свойства пород горизонта существенно неоднородны по вертикали, его водопроводимость определяется главным образом несколькими зонами повышенной трещиноватости, расположенными на разных интервалах глубин.

Высокая концентрация растворенных веществ в загрязненных подземных водах приводит к их стратификации под действием силы тяжести, вследствие чего более плотные и более загрязненные растворы спускаются к нижней границе водоносного горизонта. Наличие интервалов трещиноватости в породах водоносного горизонта приводит к сосредоточенному характеру течения. Вследствие этого в стратифицированных загрязненных подземных водах формируется несколько зон, в пределах которых уровень загрязнения близок к однородному, а на границе с расположенным ниже зонами увеличивается скачком.

Радионуклиды переносятся подземными водами как в виде растворенной компоненты (в ионной или комплексной форме), так и в коллоидной форме. Псевдоколлоиды в подземных водах в южной части ореола загрязнения в районе оз. Карачай имеют неоднородный состав вследствие коагуляции более мелких частиц однородного состава. Частицы псевдоколлоида содержат значительное количество техногенных компонентов

(в частности, углерода), происхождение которых не связано с источником радиоактивного загрязнения.

Неорганические частицы псевдоколлоида покрыты оболочкой органических веществ и углерода. Эта оболочка на частицах, по-видимому, не является сплошной. Количество органических веществ в составе псевдоколлоида уменьшается с увеличением глубины. Неорганическая составляющая псевдоколлоида представлена преимущественно хлоритом, в меньшей степени гидроксидами железа и незначительным количеством глинистых минералов: иллита, каолинита и монтмориллонита.

В верхней части водоносного горизонта уран переносится подземными водами в колloidной форме частицами с размерами более 100 нм. В нижней части водоносного горизонта уран переносится либо в виде комплексов, либо колloidными частицами, размер которых меньше 100 нм.

*Работа проводилась при финансовой поддержке Программы № 4 фундаментальных исследований Президиума РАН, направление № 5.*

## ЛИТЕРАТУРА

Адамсон А. Физическая химия поверхностей. М.: Мир, 1979. 568 с.

Алексахин А.И., Глаголев А.В., Дрожжко Е.Г. и др. Водоем-9 – хранилище жидких радиоактивных отходов и воздействие его на геологическую среду. М.; Озерск: Росатом, 2007. 250 с.

Величкин В.И., Соловьев И.Н., Петров В.А. и др. Геологические, геохимические и гидрогеохимические факторы, определяющие миграцию радиоактивных подземных вод в районе оз. Карабай (ПО «Маяк», Челябинская обл.) // Геоэкология. 2008. № 5. С. 1–12.

Дрожжко Е.Г., Иванов И.А., Алексахин А.И. Современное состояние подземной гидросферы в районе ПО «Маяк» // Вопросы радиационной безопасности. 1996. № 1. С. 11–19.

Иванов И.А., Постовалова Г.А. Миграция техногенного урана в подземных водах района озера Карабай // Вопросы радиационной безопасности. 2003. № 1. С. 44–52.

Лаверов Н.П., Величкин В.И., Омельяненко Б.И., Юдинцев С.В., Петров В.А., Бычков А.В. Изоляция отработавших ядерных материалов: геолого-геохимические основы. М.: ИГЕМ РАН, 2008. 254 с.

Лаверов Н.П., Омельяненко Б.И., Величкин В.И. Геоэкологические аспекты проблемы захоронения радиоактивных отходов // Геоэкология. 1994. № 6. С. 3–20.

Мальковский В.И., Величкин В.И., Горлинский Ю.Е., Владимирова Е.И. Моделирование переноса радионуклидов подземными водами на территории Российского научного центра «Курчатовский институт» // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51. № 4. С. 308–324.

Мальковский В.И., Пэк А.А. Влияние коллоидов на перенос радионуклидов подземными водами // Геология рудных месторождений. 2009. Т. 51. № 2. С. 91–106.

Рыбальченко А.И., Пименов М.К., Костин П.П. и др. Глубинное захоронение жидких радиоактивных отходов. М.: ИздАТ, 1994. 256 с.

Соловьев И.Н., Величкин В.И., Рубцов М.Г. и др. Гидрогеохимический каротаж: теория и практика. М.: Едиториал УРСС, 2005. 320 с.

Buck E.C., Bates J.K. Microanalysis of colloids and suspended particles from nuclear waste glass alteration // Applied Geochemistry. 1999. V. 14. P. 635–659.

Buffe J., Wilkinson K.J., Stoll S., Fifella M., Zhang J. A generalized description of aquatic colloidal interactions: the three-colloidal component approach // Environmental Science & Technology. 1998. V. 32. N 19. P. 2887–2899.

Czerwinski K.R., Buckau G., Scherbaum F., Kim J.I. Complexation of the uranyl ion with aquatic humic acid // Radiochimica Acta. 1994. V. 65. N 2. P. 111–119.

Gee G.W., Oostrom M., Freshley M.D. et al. Hanford site vadose zone studies: an overview // Vadose Zone Journal. 2007. V. 6. N 4. P. 899–905.

Gregory J., Wishart A.J. Deposition of latex particles on alumina fibers // Colloids and Surfaces. 1980. V. 1. N 3/4. P. 313–334.

Kersting A.B., Efurd D.W., Finnegan D.L., et al. Migration of plutonium in ground water at the Nevada Test Site // Nature. 1999. V. 397. 7 January. P. 56–59.

Krauskopf K.B. Geology of high-level nuclear waste disposal // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. V. 16. 1988. P. 173–200.

McCarthy J.F., Czerwinski K.R., Sanford W.E., Jardine P.M., Marsh J.D. Mobilization of transuranic radionuclides from disposal trenches by natural organic matter // Journal of Contaminant Hydrology. 1998 a. V. 30. N 1. P. 49–77.

McCarthy J.F., Sanford W.E., Stafford P.L. Lanthanide field tracers demonstrate enhanced transport of transuranic radionuclides by natural organic matter // Environmental Science & Technology. 1998 b. V. 32, N 24. P. 3901–3906.

Nyhan J.W., Drennon B.J., Abbele W.V., Wheeler M.L., Purtyman W.D., Trujillo G., Herrera W.J., Booth J.W. Distribution of plutonium and americium beneath a 33-yr-old liquid waste disposal site // Journal of Environment Quality. 1985. V. 14. N 4. P. 501–509.

Penrose W.R., Polzer W.L., Essington E.H., Nelson D.M., Orlandini K.A. Mobility of plutonium and americium through a shallow aquifer in a semiarid region // Environmental Science & Technology. 1990. V. 24. N 2. P. 228–234.

Shonnard D.R., Taylor R.T., Hanna M.L., Boro C.O., Duba A.G. Injection-attachment of Methylosinus trichosporium OB3b in a two-dimensional miniature sand-filled aquifer simulator // Water Resources Research. 1994. V. 30. N 1. P. 25–35.

Solodov I.N., Zotov A.V., Khotyev A.D., Mukhamet-Galeev A.P., Tagirov B.R., Apps J.A. Geochemistry of natural and contaminated waters in fissured bed rocks of the Lake Karachai area, Southern, Urals, Russia // Applied Geochemistry. V. 13. N 8. 1998. P. 921–939.

Zachara J.M., Smith S.C., Liu Ch., McKinley J.P., Serne R.J., Gassman P.L. Sorption of Cs<sup>+</sup> to micaceous subsurface sediments from the Hanford site, USA // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2002. V. 66. N 2. P. 199–211.

# СОДЕРЖАНИЕ

<i>Ю.Г. Гатинский, Д.В. Рундквист, Г.Л. Владова, Т.В. Прохорова</i> СЕЙСМО-ГЕОДИНАМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ГЛАВНЕЙШИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ РОССИИ И БЛИЖНЕГО ЗАРУБЕЖЬЯ . . . . .	13
<i>В.И. Осипов, Н.И. Фролова, С.П. Сущев, В.И. Ларионов</i> ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОГО И ПРИРОДНОГО РИСКА ДЛЯ НАСЕЛЕНИЯ И ТЕРРИТОРИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ . . . . .	28
<i>В.И. Величкин, Б.П. Власов, М.В. Шумилин</i> ОСНОВНЫЕ ПРОМЫШЛЕННО-ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ БЫВШЕГО СССР И РОССИИ . . . . .	49
<i>С.А. Дмитриев, В.И. Величкин, Б.И. Омельяненко</i> ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЖИДКИХ ОТХОДОВ НИЗКОГО И СРЕДНЕГО УРОВНЕЙ РАДИОАКТИВНОСТИ . . . . .	64
<i>В.И. Величкин, В.И. Мальковский, Н.Н. Тарасов, Ю.П. Диков</i> АНАЛИЗ УСЛОВИЙ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЕ В РАЙОНЕ ОЗЕРА КАРАЧАЙ (ЧЕЛЯБИНСКАЯ ОБЛАСТЬ) . . . . .	77
<i>Б.И. Омельяненко, В.И. Величкин, С.В. Юдинцев</i> ПОВЕДЕНИЕ АКТИНИДОВ В УСЛОВИЯХ ДОЛГОСРОЧНОГО ХРАНЕНИЯ И ЗАХОРОНЕНИЯ ОТРАБОТАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА . . . . .	86
<i>С.В. Юдинцев, Б.И. Омельяненко</i> ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ИЗОЛЯЦИИ ТЕХНЕЦИЯ . . . . .	99
<i>И.Н. Солодов, А.К. Лисицын</i> ПОЛИЭЛЕМЕНТНЫЕ ЭКЗОГЕННЫЕ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА: ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ И МЕТАЛЛЫ, ИЗВЛЕКАЕМЫЕ СЕРНОКИСЛОТНЫМ ПОДЗЕМНЫМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ . . . . .	109
<i>В.А. Петров, В.В. Полуэктов, Р.М. Насимов, А.А. Бурмистров, С.И. Щукин, Й. Хаммер</i> ИЗУЧЕНИЕ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА УРАНОВОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ В ГРАНИТАХ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛИТЕЛЬНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ОЯТ . . . . .	124
<i>В.М. Котляков, Л.Н. Васильев, М.Ю. Москалевский</i> БАЛАНС МАССЫ АНТАРКТИЧЕСКОГО ЛЁДНИКОВОГО ПОКРОВА . . . . .	139

<i>Ю.Я. Мачерет, А.Ф. Глазовский, И.И. Лаврентьев</i> ВОДА В ПОЛИТЕРМИЧЕСКИХ И ТЕПЛЫХ ЛЕДНИКАХ . . . . .	152
<i>В.Н. Михаленко, С.С. Кутузов, О.В. Нагорнов, С.А. Тюфлин, И.И. Лаврентьев, С.А. Марченко, В.И. Окопный</i> СТРАТИГРАФИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ФИРНОВО-ЛЕДЯНОЙ ТОЛЩИ НА ЗАПАДНОМ ПЛАТО ЭЛЬБРУСА . . . . .	180
<i>Ю.П. Масуренков, А.Л. Собисевич</i> ЭЛЬБРУССКОЕ ОЛЕДЕНЕНИЕ – ИНДИКАТОР ГЕОТЕРМИЧЕСКОГО И ФЛЮИДНОГО СОСТОЯНИЯ ВУЛКАНА . . . . .	189
<i>А.Н. Хименков, Г.З. Перльштейн, Д.О. Сергеев, А.Н. Власов, В.П. Мерзляков, Ю.В. Халилова</i> ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОЦЕНКИ РИСКА ОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ В КРИОЛИТОЗОНЕ . . . . .	205
<i>Е.В. Коротеева, Е.И. Вейсберг, Н.Б. Куянцева, С.А. Лесина</i> ВЛИЯНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ДИНАМИКУ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА ВОСТОЧНЫХ ПРЕДГОРИЙ ЮЖНОГО УРАЛА . . . . .	213
<i>А.Ю. Кудеярова</i> ТРАНСФОРМАЦИЯ ПРИРОДНЫХ СОРБЦИОННЫХ БАРЬЕРОВ ПРИ ЗАФОСФАЧИВАНИИ КИСЛЫХ ПОЧВ . . . . .	223
<i>И.В. Галицкая, И.А. Позднякова, Л.С. Томс</i> МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДИКА ПРОГНОЗА И УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОПРИРОДНЫМ ГЕОХИМИЧЕСКИМ РИСКОМ НА УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЯХ . . . . .	239
<i>Л.С. Кучмент, А.Н. Гельфан</i> СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ И ДЕТЕРМИНИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ МАШТАБОВ И РИСКА КАТАСТРОФИЧЕСКИХ НАВОДНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА . . . . .	252
<i>В.В. Адушкин, П.П. Фирстов</i> ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛОЗИВНЫХ ПРОЦЕССОВ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ИЗВЕРЖЕНИЙ И ИХ ПРОЯВЛЕНИЕ В ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ В АТМОСФЕРЕ . . . . .	264
<i>А.Ю. Озеров</i> МЕХАНИЗМ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ФОНТАНИРОВАНИЯ БАЗАЛЬТОВЫХ ВУЛКАНОВ (ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ И ПРИРОДНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ) . . . . .	279
<i>О.В. Руденко, А.Л. Собисевич, Л.Е. Собисевич</i> О ФИЗИКЕ АКУСТИЧЕСКИХ НЕЛИНЕЙНОСТЕЙ И МЕДЛЕННЫХ ВОЛНАХ В ГРАНУЛИРОВАННОЙ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ . . . . .	299
<i>В.Н. Николаевский</i> ОЧАГ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ – СОБЫТИЯ И ПРЕДВЕСТИКИ УДАРА . . . . .	316
<i>Б.В. Левин, Г.В. Шевченко, В.М. Кайстренко, Т.Н. Ивельская, Т.К. Пинегина, Н.Г. Разжигаева</i> ПРОБЛЕМА ЦУНАМИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ (ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ АСПЕКТ) . . . . .	332
<i>В.А. Семенов, И.И. Мохов, М. Латиф</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В РЕГИОНАХ СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ ЗА ПОСЛЕДНИЕ ДЕСЯТИЛЕТИЯ . . . . .	355

---

<i>Ю.Н. Авсюк, А.Л. Собисевич</i>	
ПРИЛИВНАЯ ЭВОЛЮЦИЯ СИСТЕМЫ ЗЕМЛЯ – ЛУНА – СОЛНЦЕ	
И ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЗЕМЛИ . . . . .	373
<i>В.Ч. Хон, И.И. Мохов</i>	
ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ГИДРОЛОГИЧЕСКОГО ЦИКЛА К ИЗМЕНЕНИЮ ОРБИТАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ	
И КОНЦЕНТРАЦИИ АНТРОПОГЕННЫХ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ . . . . .	392
<i>В.М. Григорьев, Л.В. Ермакова, А.В. Мордвинов, Ю.А. Наговицын, А.Г. Тлатов,</i>	
<i>В.Г. Иванов, Е.В. Милецкий, Е.Ю. Наговицына, А.И. Хлыстова, С.А. Язев</i>	
ВОЗНИКНОВЕНИЕ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА СОЛНЦЕ, ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО ГЛОБАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ	
В 11-ЛЕТНЕМ ЦИКЛЕ И НА ДЛИТЕЛЬНОЙ ШКАЛЕ ВРЕМЕНИ . . . . .	399
<i>С.И. Сороко, В.П. Рожков, Е.Г. Сергеева, С.С. Бекшаев, С.С. Андреева, И.В. Николаев</i>	
ОСОБЕННОСТИ МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ НЕРВНОЙ СИСТЕМЫ	
И ГЕМОДИНАМИКИ МОЗГА У ДЕТЕЙ И ПОДРОСТКОВ	
В УСЛОВИЯХ ЕВРОПЕЙСКОГО И ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО СЕВЕРА . . . . .	413

Научное издание

# ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ПРИРОДНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И КАТАСТРОФЫ

В 2 томах

Том 2

## ГЕОЛОГИЯ УРАНА, ГЕОЭКОЛОГИЯ, ГЛЯЦИОЛОГИЯ

*Печатается по решению Научного совета Программы  
фундаментальных исследований президиума РАН № 4*

Ответственный составитель д.ф.-м.н. Собисевич Алексей Леонидович

Технический редактор В.И. Горбенко  
Компьютерная верстка К.А. Мордвинцев  
Корректор С.Б. Суслова

Подписано в печать 05.09.11. Формат 60×90/8  
Гарнитура Таймс. Бумага мелованная. Печать офсетная  
Усл. печ. л. 54. Тираж 200 экз.

ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН  
123995 ГСП-5, Д-242, Москва, ул. Б. Грузинская, 10

Отпечатано в типографии издательства «ПРОБЕЛ 2000»  
109544 Москва, ул. Рабочая, 91