

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

И.Н. Солодов¹, А.К. Лисицин²

ПОЛИЭЛЕМЕНТНЫЕ ЭКЗОГЕННЫЕ ЭПИГЕНЕТИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ УРАНА: ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ТИПЫ И МЕТАЛЛЫ, ИЗВЛЕКАЕМЫЕ СЕРНОКИСЛОТНЫМ ПОДЗЕМНЫМ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЕМ

¹ Урановый холдинг «АРМЗ» (ОАО «Атомредметзолото»)

² Учреждение Российской академии наук Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

В ближайшие десятилетия в мире при разработке урановых месторождений будут преобладать геотехнологические методы добычи из руд экзогенных месторождений, широко распространенных в Казахстане, странах Южной Африки, России, Узбекистане, Монголии, США и Австралии. Подземный горный способ добычи отойдет на второй план.

Среди геотехнологических методов по масштабам применения, экологическим преимуществам и экономическим показателям центральное место занимает скважинное подземное выщелачивание (ПВ), ориентированное на отработку инфильтрационных экзогенных эпигенетических (гидрогенных) месторождений урана.

Теоретическим проблемам формирования и новым методам ПВ гидрогенных месторождений урана и сопутствующих элементов посвящена обширная литература. Однако по-прежнему остаются слабо разработанными механизмы рудоотложения на восстановительных геохимических барьерах в зонах кислородного пластового окисления осадочных отложений из инфильтрационных подземных вод. Главное внимание в статье уделено роли органических восстановителей в формировании рудоконцентрирующих геохимических барьеров. Выделены сингенетичные, смешанные и эпигенетичные по отношению к рудовмещающим породам восстановители, играющие важную роль в рудоотложении, при взаимодействии ураноносного раствора с породой. Рассмотрена роль в этом процессе кислотно-щелочных взаимодействий. Особое внимание уделено источникам рудообразующих веществ полиэлементных месторождений. Показана их полигенная природа. Выделено две группы элементов. Первую из них образует ассоциация по-

ливалентных элементов, концентрирующихся на восстановительных геохимических барьерах в виде нерастворимых соединений, где эти элементы находятся в низковалентном состоянии. Промышленные концентрации в этой ассоциации образуют селен, уран, рений, молибден, медь, ванадий. Ко второй группе отнесены моновалентные химические элементы, которые в природном интервале физико-химических условий инфильтрационного экзогенного рудообразования несущественно превышают кларковые концентрации и обычно относятся к диагенетическим и седиментационным по своему генезису. При сернокислотном ПВ они переводятся в технологические растворы в концентрациях, достаточных для рентабельной добычи методом ПВ. К этой группе относятся скандий, иттрий, лантаноиды и другие, редкие и рассеянные элементы, образующие в сернокислых технологических растворах прочные сульфатные комплексы.

ВВЕДЕНИЕ

На территории бывшего СССР в послевоенные годы выявлены крупнейшие в мире урановые ресурсы, общее количество запасов которых достигает 2 млн т [Лаверов и др., 1992]. Особое место среди них занимают урановые месторождения, пригодные для эксплуатации методом ПВ. Они в сырьевой базе урана занимают около 30 % всех запасов.

Выявление инфильтрационных экзогенных эпигенетических месторождений урана и сопутствующих химических элементов как нового генетического типа минерального сырья базируется на геолого-

геохимическом осознании явления глубокого (до 1 км) проникновения атмосферного кислорода в подземную гидросферу [Германов, 1955; Германов и др., 1990]. Открытие этого явления значительно расширило представления о взаимосвязи атмосферы с верхней частью земной коры и имело важнейшее значение в разработке теории экзогенных эпигенетических процессов. Выявление промышленных месторождений урана и других элементов (селена, молибдена, рения, ванадия, меди) стало блестящим воплощением научной идеи в геологическую практику.

Теоретическим разработкам эпигенетического формирования пластово-инфилтратационных месторождений урана в СССР посвящен ряд фундаментальных монографий [Экзогенные..., 1965; Гидрогенные..., 1980] и множество статей. К выводам о рудоконтролирующей роли зон пластового окисления для ряда месторождений США пришли и американские исследователи [Finch, 1967; Harshman, 1974].

Освоение месторождений этого типа методом ПВ исторически связано в первую очередь со сложными гидрогеологическими условиями их эксплуатации классическим горным способом. Сложные гидрогеологические условия их освоения оказались при применении скважинного ПВ дополнительным благоприятным фактором, который сделал высокорентабельной эксплуатацию даже бедных руд, вполне конкурирующую с разработкой уникально богатых руд урана традиционными методами.

В результате беспрецедентных для мировой практики широкомасштабных комплексных исследований, выполненных в 1950–1970 гг., была открыта и за короткое время освоена крупнейшая Притяньшаньская мегапровинция пластово-инфилтратационных экзогенных эпигенетических месторождений в мезозойских и кайнозойских водоносных горизонтах Туранской гидрогеологической области и в прилежащих к ней территориях юга Западно-Сибирской гидрогеологической области [Каримов и др., 1996; Петров и др., 1995]. Притяньшаньская рудная провинция включает месторождения Кызылкумов: Учкудук, Мейлысай, Бухалы, Сургала, Лявлякан, Бешкак, Северный и Южный Букинай, Канимех, Кетменчи, Сабырсай и др. В Сырдарынском артезианском бассейне расположены месторождения: Карамурун, Харасан, Заречное, Жауткан и др.; в Чу-Сарысуйской депрессии – месторождения Канжуган, Буденовское, Инкай, Мынкудук, Уванас, Жалпак, Торткудук и др.; в Западно-Илийском бассейне – месторождение Нижнеилийское, а в Восточно-Илийском – месторождения Кольджат и Сулучекинское. На юге Западно-Сибирской артезианской области и в Зауралье выявлены месторождения: Далматовское, Хохловское, Добровольное, Малиновское и др.

Сопоставление результатов химических анализов природных вод с данными термодинамических расчетов по характеристике восстановительного осаждения урана показало близкое соответствие измеренных и расчетных значений Eh-равновесия, растворенного

урана с оксидами ряда $\text{UO}_2 - \text{UO}_{2,25}$. Отсутствие урана (менее 10^{-6} г/л) в водах с Eh ниже $-50\ldots -150$ мВ в близнейтральной и слабощелочной среде свидетельствует о прекращении его миграции в восстановительной гидрохимической обстановке. Одновременно с ураном на восстановительном барьере могут накапливаться Se (при относительно высоких значениях Eh), Mo и Re (при тех же или более низких значениях Eh).

Особое место в теории формирования рассматриваемых месторождений занимает учение о геохимических барьерах [Перельман, 1989]. Авторы статьи считают, что важнейшую роль в концентрации урана и сопутствующих ему элементов, входящих в состав руд, играют восстановительные геохимические барьеры, включающие слабо окисленные органические вещества.

По этому признаку могут быть выделены месторождения трех типов:

- месторождения, в которых уран и сопутствующие элементы сформированы в рудах на выклинивании зон пластового окисления пород, содержащих сингенетичные им восстановители;
- месторождения, где важная роль в локализации инфильтрационных рудных концентраций принадлежит эпигенетичным по отношению к рудовмещающим породам восстановителям;
- месторождения, в которых присутствуют оба вида восстановителей.

Соответственно, рассматривая источники урана и сопутствующие ему другие компоненты комплексных руд следует различать: 1) элементы, привнесенные в зону рудоотложения; 2) элементы, заимствованные из вмещающих пород и перемещенные на небольшие расстояния в зоне рудоотложения; 3) элементы, сингенетичные рудовмещающим отложениям, не вовлеченные в инфильтрационный процесс при рудообразовании, но извлекаемые в технологические растворы при сернокислотном ПВ.

О РОЛИ ВОССТАНОВИТЕЛЕЙ – ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ – ПРИ ЭКЗОГЕННОМ ИНФИЛЬРАЦИОННОМ РУДООБРАЗОВАНИИ

Исследования, проведенные в 80–90-х гг., в особенности на месторождениях, разрабатываемых с методом ПВ, показывают, что в создании восстановительных геохимических барьеров большую роль играют природные органические вещества разного генезиса.

Среди них хорошо изучена роль сингенетичных вмещающим породам бурых углей и углеродных пород, эпигенетичных жидким и газообразным восстановителям, поступающих в зону рудоотложения по разломам и системам трещин, и смешанные восстановители – органические вещества разного происхождения.

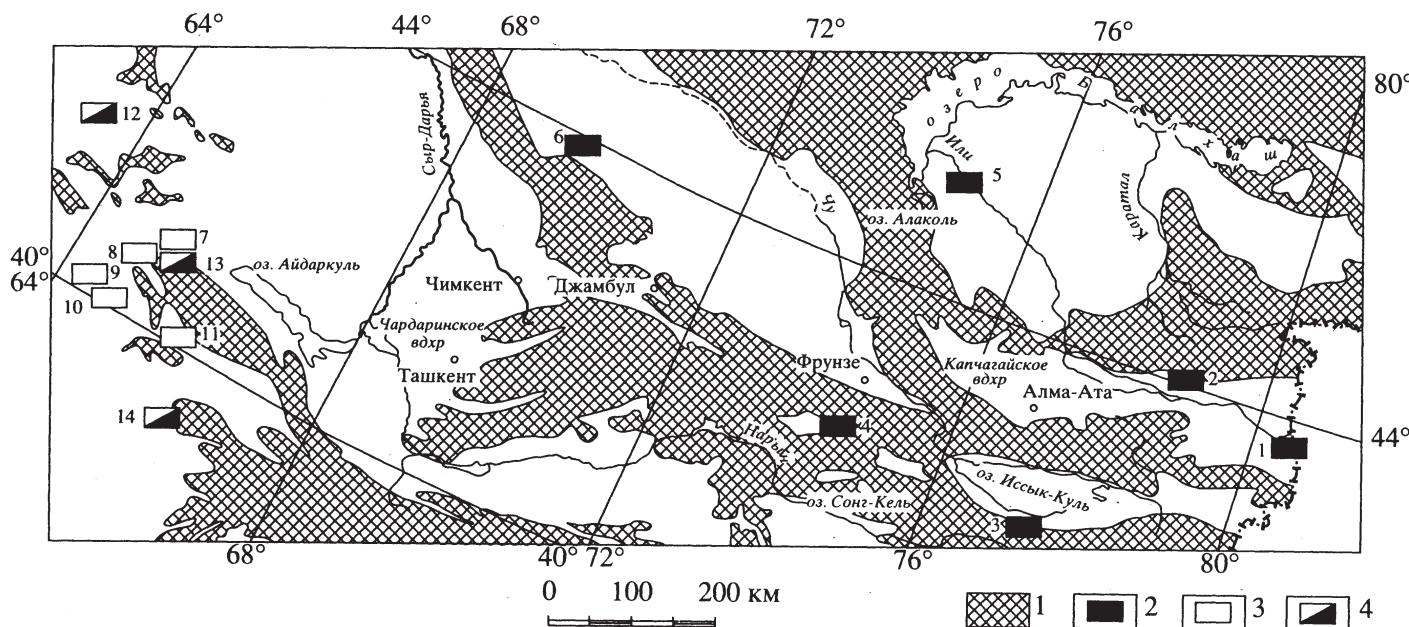


Рис. 1. Схема расположения наиболее типичных представителей полиэлементных пластово-инфилтратационных месторождений Притяньшаньской мегапровинции.

1 – выходы кристаллического фундамента; 2 – месторождения, образованные при участии сингенетических восстановителей: 1 – Кольджат, 2 – Сулучекинское, 3 – Джильское, 4 – Туракавак, 5 – Нижнеилицкое, 6 – Канжуган; 3 – месторождения, возникшие при воздействии эпигенетических восстановителей: 7 – Лявлякан, 8 – Бешкак, 9 – Северный Букинай, 10 – Южный Букинай, 11 – Канимех; 4 – месторождения, смешанного генезиса (совместное участие сингенетических и эпигенетических восстановителей): 12 – Учкудук, 13 – Сургали, 14 – Сабырай

Положение рассмотренных в статье месторождений показано на схеме (рис. 1).

Месторождения, образованные при участии сингенетических восстановителей

Эти месторождения располагаются в водоносных горизонтах на выклинивании зон окисления пород, содержащих углистые органические остатки, а также вдоль контактов этих зон с подстилающими или перекрывающими пластами бурых углей. Роль восстановительного геохимического барьера для них определяется биохимическим фактором, связанным с деятельностью сульфатредуцирующей и водородобазирующей микрофлоры. В этом случае, в зонах инфильтрационного рудоотложения, проявляется прямая зависимость концентрации урана от содержания C_{org} в породах. Неравномерность распределения углекислого вещества определяет изменчивость уранового оруденения вдоль фронта выклинивания зон окисления в плане и разрезе и предопределяет стратиформную пластово-линзовидную морфологию рудных тел. Породы, не содержащие органических компонентов, разделяют их и являются безрудными.

Характерными представителями этого типа месторождений являются: Нижнеилийское, Сулучекинское, Кольджат, Джильское, Туракавак и другие, где рудные

концентрации находятся в бурых углях и угленосных породах. Сопутствующие урану элементы – Mo, Ge – и слабо мигрантные в зоне гипергенеза Ti, Be, Y, TR, Sc [Кисляков, Щеточкин, 1993] пространственно совмещены. Рудные тела локализуются в прикровлевой части угольного пласта в зоне контактов с лимонитизированными песчаниками. В пластах, перекрытых алевролито-глинистыми отложениями, рудная минерализация отсутствует.

Связь оруденения с процессом пластового окисления водопроницаемых пород отражается в закономерном распределении в зависимости от зональности углей содержаний валентных форм урана и железа, а также молибденовой минерализации (рис. 2). Зональность угля резко возрастает на контакте с окисленным песчаником. Содержание молибдена достигает максимума на участке полного восстановления урана до U^{IV} .

Вблизи окисленной кровли угольного пласта изотопный состав сульфидной серы пиритов, выделенных из углей, отличается превышением доли легкой серы против метеоритного стандарта. На границе с пластово-окисленными рудовмещающими породами значения $\delta^{34}\text{S}$ близки к -40 , а в угольном пласте – $\delta^{34}\text{S} = +20\text{‰}$.

В песчаниках зональные изменения изотопного состава серы пиритов выражены ярче. Вблизи границы пластово-окисленных и неизмененных пород значения

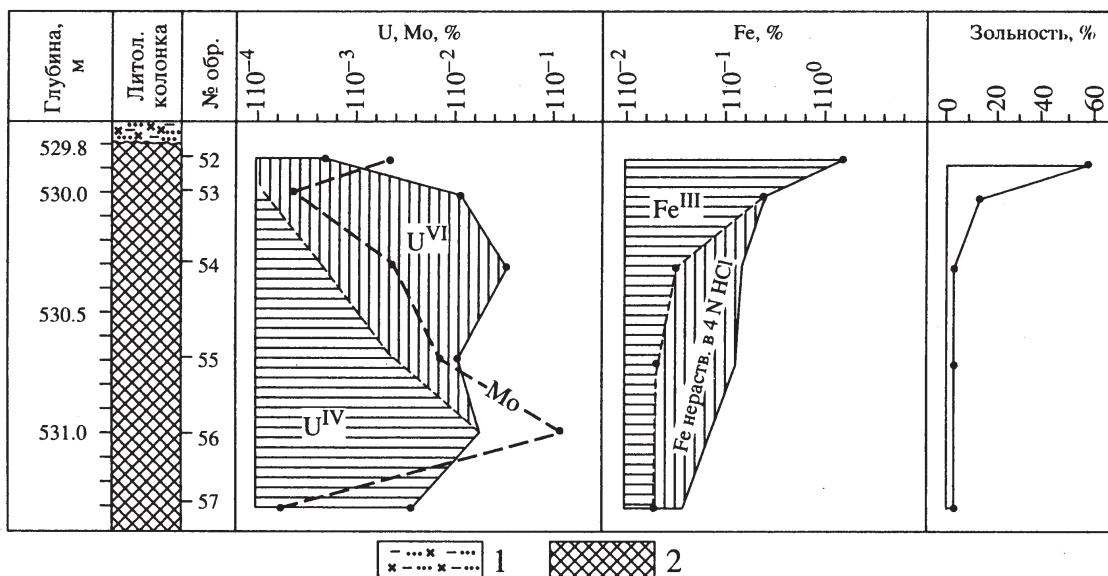


Рис. 2. Геохимическая зональность в угольном пласте под лимонитизированным песчаником.

1 – песчаник лимонитизированный; 2 – уголь бурый

$\delta^{34}\text{S}$ пиритов колеблются около $-40\text{ \textperthousand}$. С удалением от фронта окисления постепенно увеличивается доля тяжелой серы: $\delta^{34}\text{S}$ увеличивается при этом до $+70\text{ \textperthousand}$. Такое направленное изменение изотопного состава сульфидной серы однозначно свидетельствует о биохимической природе восстановления серы химически малоактивным восстановителем, которым является углистое вещество. Возможность такого уникального фракционирования изотопного состава сульфидной серы может реализоваться лишь при большой протяженности зоны биохимической сульфатредукции в потоке пластовых инфильтрационных вод. В районе месторождения Кольджат инфильтрационный водообмен, по имеющимся данным, происходил многие млн лет.

Характерным примером руд, сформированных при значительном влиянии сингенетичного рассеянного органического вещества, является месторождение Канжуган. Это месторождение располагается вблизи южного борта Чу-Сарысуйской депрессии в Сузакском артезианском бассейне. Рудные тела здесь приурочены к окончаниям зон пластового окисления палеоцен-эоценовых песков и располагаются в трех водоносных горизонтах: канжуганском, уюкском и иканском.

Степень окислительности урана в рудных залежах имеет широкие вариации. При этом отчетливо выявляются три максимума повышенной частотности проб: с 25 и 70 % U^{VI} . Крайние из модальных значений (25 и 70 % U^{VI}) объясняются преобладанием на фоне настурлан-коффинитового оруденения, соединений типа U_4O_9 (25 %) и U_3O_8 (70 %) наиболее устойчивых рентгеноаморфных оксидов урана. Согласно закону Оствальда, первый тип соединений урана может считаться продуктом первичного осаждения

урана из фоновых подземных вод, а второй – появляется в результате переотложения из обогащенных ураном растворов за счет ранее образованной рудной минерализации.

На приведенном разрезе через рудное тело (рис. 3) отчетливо видно, что степень окисленности урана в залежи убывает по мере удаления от лимонитизированных песков. В этом направлении руды с преобладанием U^{VI} довольно резко сменяются рудами, в которых преобладает U^{IV} . Появление U^{IV} связано с восстановительным осаждением урана при взаимодействии растворов с обугленными растительными остатками. Детальное их изучение позволило установить следующее.

Обугленные растительные остатки в рудоносном горизонте чаще всего встречаются в виде беспорядочно распределенных обрывков растительной ткани с сохранившейся структурой древесины. Лишь местами они превращены в сгустки аморфного органического вещества. Максимальные содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ – до 18 % установлены в прослоях бурого угля и в углистой глине (рис. 4). Пески, обогащенные растительными остатками, содержат 0,5–5 % $\text{C}_{\text{орг}}$. В породах, обедненных растительными остатками, количество $\text{C}_{\text{орг}}$ не превышает 0,1 %, при обычном содержании $>0,03\text{ \%}$.

На этот исходный фон накладываются процессы пластового окисления. В лимонитизированных породах содержание $\text{C}_{\text{орг}}$ не превышает 0,1 %, а в нижней части зоны пластового окисления породы практически лишены его полностью ($<0,03\text{ \%}$). Среди сероцветных пород наименьшие содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ установлены в прослоях, сопряженных с «языками» максимального развития лимонитизации. Эти прослои прослеживаются в верхней и нижней частях песчаной толщи, где

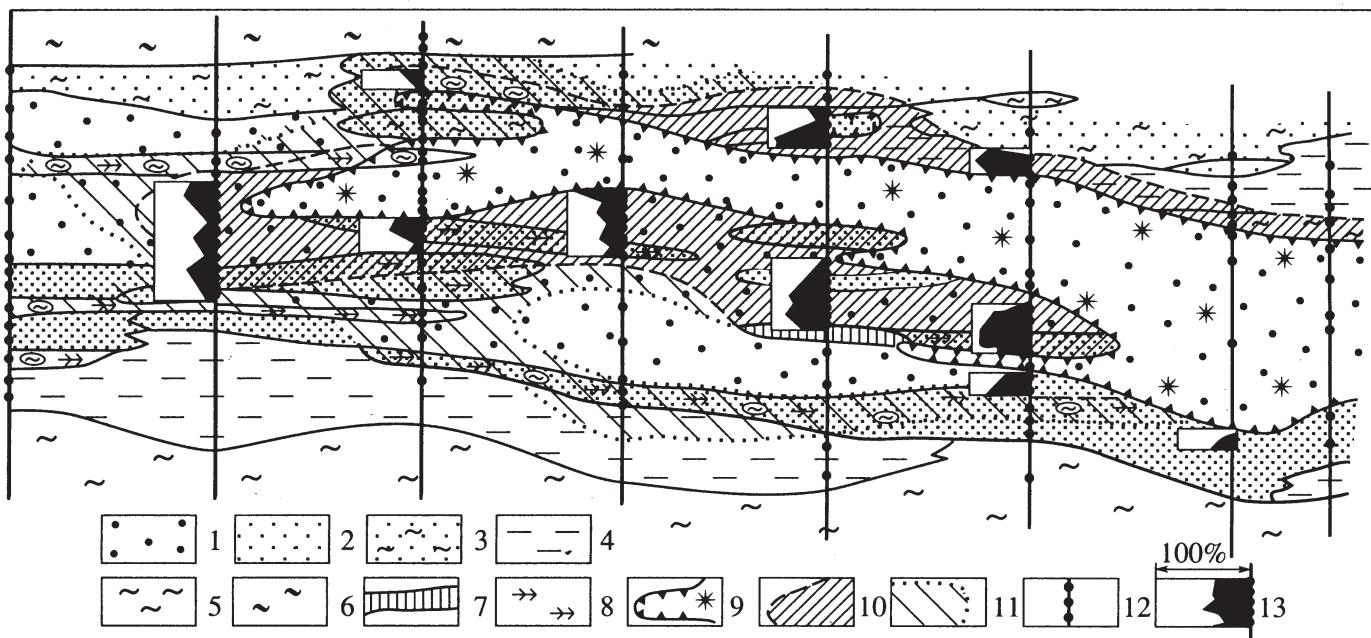


Рис. 3. Литолого-геохимический разрез рудоносного горизонта месторождения Канжуган.

1–3 – песок: 1 – среднезернистый, 2 – мелкозернистый, 3 – глинистый; 4 – алевролит; 5 – глина; 6 – углистая глина; 7 – уголь; 8 – обугленные растительные остатки; 9 – лимонитизированные породы; 10 – контур рудного тела; 11 – контур вышекларковых содержаний урана; 12 – места отбора проб; 13 – степень окисленности урана (залитая часть – доля U^{IV} в % от ΣU)

отсутствуют рудные тела. Степень окисленности органического вещества в рудоносных породах изменяется в весьма широких пределах. Характерно, что в отсортированных песках в безрудной фронтальной зоне пластового окисления установлена повышенная окисленность как железа, так и органического вещества.

Зональные изменения органического вещества в объеме рудной залежи установлены также по его гигроскопичности и ураноносности. Гигроскопичность закономерно увеличивается в направлении от неизмененных сероцветов к лимонитизированным породам и изменяется от 10 до 15 %. В этом же

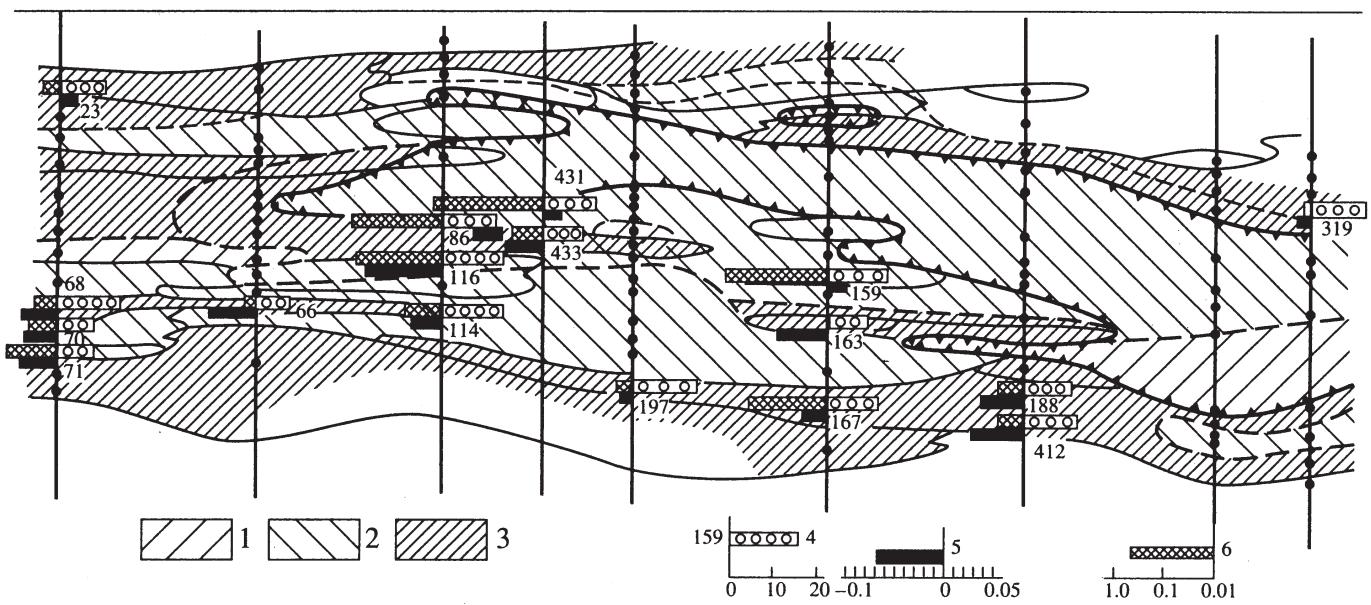


Рис. 4. Содержание и состав органического вещества в рудоносном горизонте.

1–3 – содержание Сорг в породе, масс. %: 1 – <0.03, 2 – 0.03–0.1, 3 – >0.1; 4 – гигроскопическая влажность органического вещества, масс. %; 5 – показатель окисленности органического вещества, отн. ед.; 6 – содержание урана в органическом веществе, масс. %.

направлении нарастает обогащение ураном органического вещества. Содержание урана в этом направлении возрастает почти в 1000 раз. Эти данные убедительно свидетельствуют об экзогенной эпигенетической природе урановой рудной минерализации, сформированной в значительной степени в процессе окисления углистого органического веществарудовмещающих пород.

По данным измерений Eh–рН равновесия водного раствора с породами рудоносного горизонта, установлен широкий интервал восстановительной способности среды (рис. 5). В диапазоне изменения pH от 6,5 до 8,1 значения Eh изменяются от +480 мВ в полностью лимонитизированных породах до –420 мВ в сероцветных породах, обогащенных обугленными растительными остатками.

На приведенном разрезе (рис. 5) отчетливо видна приуроченность скоплений урана к слоям пород с отрицательными значениями Eh и их отсутствие в сероцветных породах с положительными значениями Eh. Количество восстановителей в исходных породах (определенное по величине их перманганатной окисляемости) изменяется в широком диапазоне. Высокой окисляемостью (более 10 мг/г) обладают пески, обогащенные растительными остатками. Линзы бурого угля в них характеризуются максимальной окисляемостью – до 670 мг/г. Повышенную окисляемость (1–10 мг/г) имеют породы, обогащенные растительными остатками. Развитие пластовой лимонитизации приводит к полному исчезновению восстановителей в породах. Окисляемость лимонитизированных песков равна нулю.

Анализ показывает, что взаимосвязанные зональные изменения степени окисленности урана, железа,

углистого органического вещества, происходящие в процессе инфильтрации кислородсодержащих вод в породах с сингенетическими восстановителями, являются ярким свидетельством важной их роли как восстановительных геохимических барьеров. При этом протяженность и контрастность эпигенетических рудных тел целиком обусловлена восстановительными свойствамиrudовмещающих пород (рис. 5).

Уран и сопутствующие ему рудные элементы распределены неравномерно в пределах фронтальных окончаний зон пластового окисления. Относительно богатые руды локализуются в менее проницаемых песках, обогащенных растительными остатками, и отсутствуют в хорошо отсортированных песках, обедненных восстановителями. Из-за низкой водопроницаемости рудоносных пород этот генетический тип месторождений менее пригоден для отработки методом ПВ.

Месторождения, образованные при участии эпигенетических восстановителей

В отсутствие углистого органического вещества окончание зон пластового окисления не всегда безрудно. Восстановительная обстановка для урана в таких водоносных горизонтах возникает на участках, где по латерали или по разломам, трещинным зонам и другим каналам гидравлической связи поступают жидкие или газообразные восстановители. Инфильтрационные месторождения на окончаниях зон пластового окисления пород, сформировавшихся при поступлении в эти зоны эпигенетических газообразных восстановителей, известны, например, в Центрально-Кызылкумской

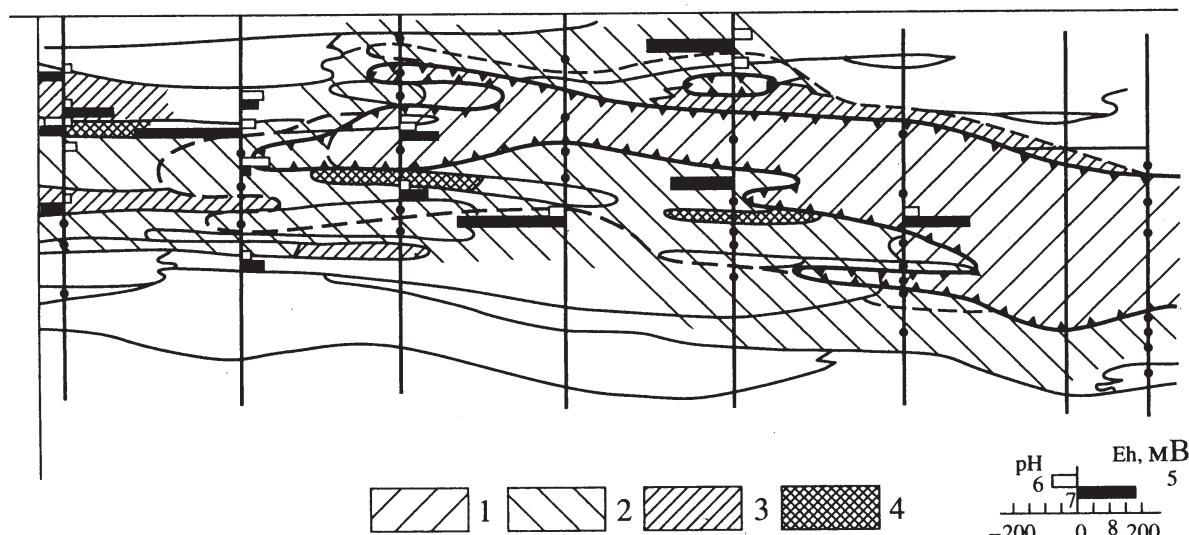


Рис. 5. Окислительно-восстановительные свойства пород уюкского рудоносного горизонта месторождения Канжуган.

1–4 – перманганатная окисляемость, мг/г: 1 – < 0,1; 2 – 0,1–1; 3 – 1–10; 4 – >10; 5 – масштабы численных значений Eh и pH стационарного химического равновесия водного раствора с породой

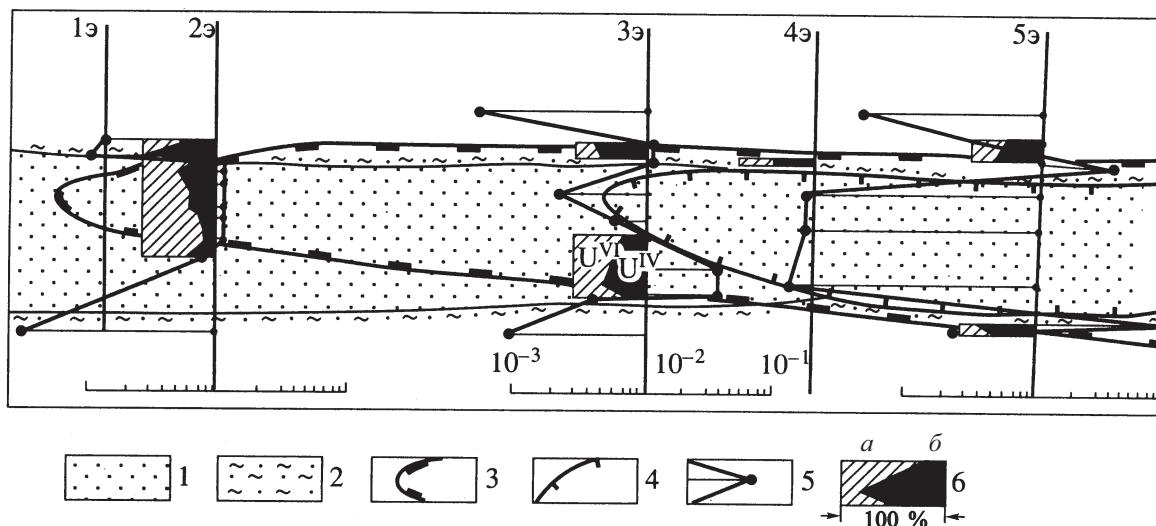


Рис. 6. Рудно-литологический разрез 2-й рудной залежи месторождения Бешкак.

1 – песок; 2 – песчаник глинистый; 3 – контур рудного тела; 4 – контур зоны пластового окисления; 5 – валовое содержание урана согласно масштабу, приведенному в основании оси скважины, мас. %; 6 – процентные соотношения U^{VI} (a) и U^{IV} (б) в руде

провинции и ее южном обрамлении (месторождения Бешкак, Южный и Северный Букинай и др.).

Месторождения Бешкак и Лявлекан находятся в пределах Каракатинского артезианского бассейна, на юго-востоке Центральных Кызылкумов (рис. 1). Рудные тела на этих месторождениях «облекают» окончание зоны пластового окончания в песчаном водоносном горизонте, сложенном позднеэоценовыми олигомиктовыми кварцевыми песками, залегающими между горизонтами водоупорных глин. Рудовмещающие пески настолько обеднены восстановителями, что их пластовое окисление визуально не всегда устанавливается. Оно выражено в очень слабом пожелтении глинистого цемента в участках, где он сохранился при перемыве морских песков. Глинистые песчаники кровли и подошвы рудоносного горизонта при пластовом окислении становятся ярко-желтыми в связи с появлением эпигенетических гидроксидов железа.

Рудные тела образуют хорошо выраженные и почти симметричные роллы с протяженными крыльями, «отжатыми» в подстилающие и перекрывающие глинистые песчаники. Уран в рудах имеет повышенную окисленность вследствие переотложения ранее накопленных концентраций при продвижении зоны пластового окисления. В крыльях рудного ролла, «отжатых» в глинистые песчаники и образующих узкие протяженные ленты, степень восстановленности урана наиболее высокая – преобладает U^{VI} (рис. 6).

Наличие газообразных эпигенетических восстановителей урана и сопутствующих ему химических элементов на месторождениях Бешкак и Лявлекан подтверждено атмогеохимическими исследованиями. Над рудными телами этих месторождений установлены положительные аномалии предельных углеводородов

в сорбированных газах перекрывающих пород [Перевозчиков, Натальченко, 1985].

Измерения Eh–pH пород в герметично упакованных образцах, а также определение их окисляемости показали резкое возрастание окисляемости и понижение Eh непосредственно за границей фронта окисленных пород (рис. 6).

Большой интерес представляют данные об изотопном составе сульфидной серы в образцах, отобранных в «мешковой» части рудного ролла, в его верхнем крыле и над ним. Исследовалась сера из крупных стяжений пирита, ассоциирующих с сажистыми тонкодисперсными выделениями мельникита и иордизита. Серы подавляющей части образцов пирита обогащена легким изотопом. Преобладают образцы δ³⁴S от –30 до –40 ‰ и несколько более, без закономерной зависимости от границы зоны пластового окисления. Эти данные свидетельствуют, что для урановых руд, сформированных при воздействии эпигенетических восстановителей, характерен однородный изотопный состав сульфидной серы (с преобладанием легкого изотопа вследствие сульфатредукции), обусловленный равномерным распределением эпигенетических газообразных восстановителей в проницаемых породах рудовмещающего горизонта песков и на их границе с глинами.

Урановое и сопутствующее оруденение Букинайского рудного поля (рис. 1) (месторождения Северный и Южный Букинай, Канимех) находятся на окончаниях зон пластового окисления песчаных водоносных горизонтов верхнемеловых отложений, представленных как континентальными аллювиальными и озерными осадками, так и прибрежно-морскими отложениями маастрихта. В сероцветных неокис-

ленных породах рудоносных горизонтов рассеяны седиментационно-диагенетические углистые органические остатки. При геохимических исследованиях приповерхностных отложений над рудными залежами установлены газообразные восстановители, поступающие по разломам и трещинным системам из нижних горизонтов в зону рудоотложения. Проведенные исследования свидетельствуют о том, что и в данном случае в присутствии сингенетических восстановителей эпигенетические восстановители играют главную роль в создании восстановительного геохимического барьера.

В качестве примера на рис. 7, а и 7, б приведены разрезы через залежь в кампанском рудоносном горизонте, сложенном морскими песками. На разрезах видно, что рудная залежь представляет собой асимметричный ролл с короткой «мешковой» частью, мощным нижним и тонким верхним крылом. Граница рудных залежей с лимонитизированными породами – резкая, а с сероцветными – постепенная: балансовые руды на расстоянии около 400 м сменяются забалансовыми с содержанием урана до $10^{-4}\%$.

Рудовмещающий горизонт сложен мелкозернистым песком. В кровле и подошве залегают карбонатные глинистые и глинисто-алевролитовые слои, служащие водоупорами. Рудоносные пески – кварц-полевошпатовые, с редкими чешуйками мусcovита и биотита, содержат органический фосфатный дегритус. Широко развит глауконит в форме округлых стяжений и ксеноморфных выделений в порах песка. Благодаря присутствию глауконита, цвет неокисленных пород зеленовато-серый, а лимонитизированных – зеленовато-желтый. Содержание CO_2 в песках рудоносного горизонта изменяется от 0,3 до 3 %. Во всех литологических разностях пород присутствует в небольшом количестве пирит, преимущественно в виде хорошо выраженных кубов и октаэдров размером 0,01–0,03 мм, а также их сростков. Содержание $\text{Fe}_{\text{пир}}$ не превышает 0,3–0,4 %.

Определения изотопного состава сульфидной серы выявили тенденцию к направленному изменению в сторону увеличения доли легкой серы по мере удаления от зоны пластового окисления – $\delta^{34}\text{S} = -25\ldots-60\%$. При низких концентрациях $\text{C}_{\text{орг}}$ органические вещества относятся к трудноокисляемому виду и поэтому сохраняются в лимонитизированных породах, вблизи фронта пластового окисления.

«Облегчение» изотопного состава сульфидной серы по мере удаления от фронта пластового окисления отражает уменьшение генерации сероводорода при практически неизменной сульфатности пластовых вод. Наблюдающееся отсутствие H_2S за фронтом пластовой лимонитизации согласуется с углеводородно-водородным составом сорбированных породами газов, создающих восстановительную обстановку в рассматриваемом пласте (рис. 7, б).

Урановое оруденение представлено тонкодисперсными оксидными формами урана, и, кроме того, методом f -радиографии установлена тонкодисперс-

ная сорбированная форма урана в фосфатизированных обломках, лейкоксене и разложенных обломках биотита. Вблизи фронта зоны пластового окисления в сероцветных и желтоцветных породах наблюдаются выделения самородного селена.

Радиоактивное равновесие в рудах и ореоле забалансовых содержаний урана смешено в сторону избытка урана над радием, что указывает на продолжающееся рудообразование. В зоне лимонитизации вблизи выклинивания наблюдается избыток Ra. Равновесие между U и Ra установлено только вдали от руд. О молодом возрасте оруденения свидетельствуют также низкие концентрации E_1 -центров в кварце обломочных зерен. Для исходных пород они характеризуются величинами от 1 до 0,8 отн. ед. В лимонитизированных породах в зоне забалансовых содержаний урана и в рудном теле составляют 5–9 отн. ед. Такое распределение радиационных дефектов фиксирует былое положение рудного тела в поле современной лимонитизации и указывает на его перемещение во времени.

Степень окисленности урана в рудных залежах колеблется в широких пределах – от 6 до 90 % U^{VI} и тесно связана с проницаемостью пород. Наименьшая степень окисленности урана установлена в алеврито-глинистом прослое. В песчаных отложениях отмечается повышенная степень окисленности урана, указывающая также на современное переотложение ранее образованных урановых руд по направлению движения пластовых вод рудоносного горизонта. Степень окисленности кислоторастворимого железа в рудоносных породах изменяется аналогично окисленности урана, подчеркивая сопряженность процесса их окисления.

Восстановительная способность пород колеблется в широких пределах. Сероцветные пески за пределами рудного тела обусловливают преимущественно отрицательные значения Eh (до -200 мВ). Восстановительная способность рудоносных пород находится в тех же пределах, что и в сероцветных песках, за фронтом окисленных пород. Лимонитизированные пески отличаются устойчиво положительными значениями Eh (до $+270$ мВ).

Количество активных восстановителей в породах определяется по их перманганатной окисляемости и измеряется первыми мг/г. В рудовмещающих породах отмечается повышенная окисляемость по сравнению с неизменными, расположеннымими за фронтом окисленных пород. Это можно интерпретировать как результат накопления в рудной залежи восстановленных рудных элементов (переменной валентности), в том числе и урана. Окисляемость пород резко понижена в зоне лимонитизированных пород – сотые доли мг/г.

Состав газов, растворенных в пластовой воде и сорбированных породами, значительно варьируется. В небольших количествах практически повсеместно обнаружен водород. Наиболее высокие его содержания ($\sim 19,5$ об. %) установлены в нижнем крыле залежи

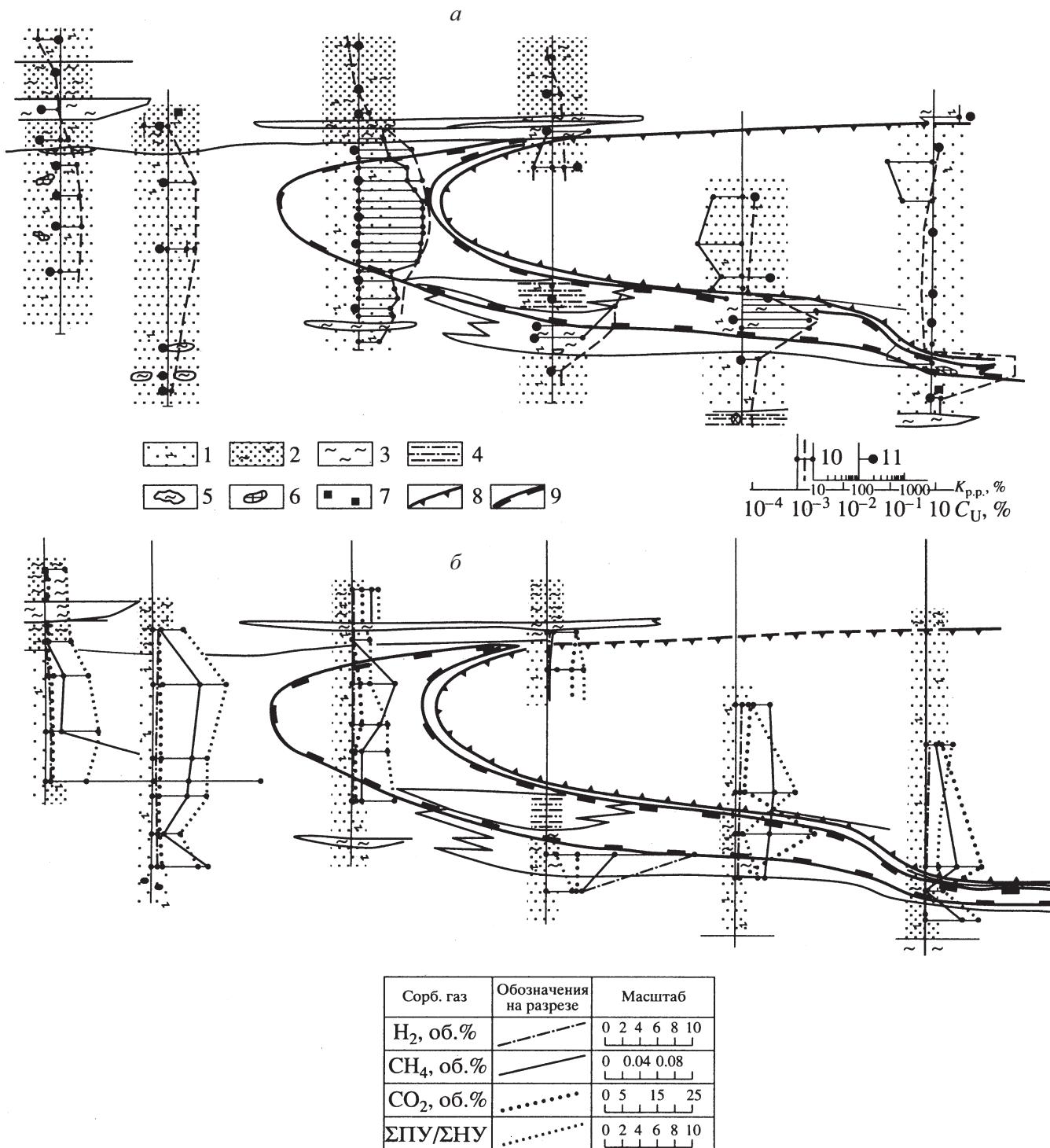


Рис. 7. Рудно-литологический разрез через залежь 43-2 месторождения Южный Букинай (а) и состав сорбированных породами газов (б).

1 – песок слабо карбонатизированный; 2 – песок тонкозернистый глинисто-карбонатный; 3 – глина песчанистая; 4 – алевролит песчанистый; 5 – глинистые окатыши; 6 – карбонатные стяжения; 7 – выделения мелкокристаллического пирита; 8 – контур зоны пластового окисления; 9 – контур рудного тела; 10 – содержания урана (пунктир – результаты химических анализов, сплошная линия – радиометрические измерения); 11 – коэффициент радиоактивного равновесия между ураном и радием, %

под линзой алевролитов. Там же обнаружен гелий в количестве 0,04 об. %. Повышенные содержания водорода обнаружены и в поле лимонитизированных пород, а также в породах кровли рудоносного горизонта за пределами рудной залежи. Метан присутствует в небольших количествах повсеместно (рис. 7, б). Более окисленные породы характеризуются пониженным отношением предельных углеводородов к непредельным. Углекислый газ в наибольшем количестве (до 26 об. %) концентрируется в нижней части рудоносного горизонта. Наблюдается тенденция к повышению его содержаний в пробах, обогащенных H_2 и CH_4 .

Таким образом, установленная геохимическая зональность в рудоносных горизонтах свидетельствует о существенном влиянии на процесс рудоотложения эпигенетических газообразных восстановителей. На это указывает обеднение исходных пород органическим углеродом, повышенная окисляемость оруденелых пород, часто большая, чем у исходных пород. Максимальная восстановленность и окисляемость именно рудоносных пород является типоморфным признаком руд, сформированных при участии эпигенетических газообразных восстановителей (H_2 , H_2S , CH_4 , тяжелые углеводороды).

Для данного генетического типа урановых месторождений типична приуроченность наиболее богатой ураном «мешковой» части рудных тел к песчаным отложениям рудоносных горизонтов с максимальной проницаемостью [Соловьев и др., 1993; Соловьев и др., 2004]. В этом отношении данный тип месторождений наиболее пригоден для отработки методом ПВ.

Месторождения смешанного генезиса

В рудоносных горизонтах Центральных Кызылкумов и других районов нередко наблюдается проявление влияния на рудоотложение как сингенетических, так и эпигенетических по отношению к породам восстановителей. При этом усложняется рудоконтролирующая эпигенетическая зональность изменений пород в рудоносных горизонтах, морфология рудных тел, в ряде случаев – состав руд. Месторождения Сабырсай, Сургали, Учкудук (рис. 1) и ряд других несут признаки тяготения рудной минерализации к слоям, обогащенным углистым органическим веществом. В них также проявлен и структурный контроль оруденения разломами, являющимися каналами поступления восстановителей, движущихся навстречу потокам инфильтрационных вод.

О ПОЛИГЕННОЙ ПРИРОДЕ ЭЛЕМЕНТОВ КОМПЛЕКСНЫХ РУД

В пластовых инфильтрационных месторождениях урана выявлен ряд сопутствующих химических элементов, часть из которых может быть вовлечена

в рентабельную эксплуатацию методом подземного выщелачивания [Подземное..., 1998].

Генетическая связь накопления вместе с ураном на восстановительных геохимических барьерах вначале была установлена для селена, молибдена и герmania [Экзогенные..., 1965; Лисицин, 1969]. Эти элементы образуют совмещенные или последовательно расположенные зоны эпигенетической концентрации в пределах фронта понижения окислительно-восстановительного потенциала подземных вод от положительных до отрицательных значений. В работе Э.Н. Харшмана [Harshman, 1974] перечень совместно образованных рудных элементов был пополнен ванадием и медью, а М.Ф. Максимовой с соавторами [1983] – рением.

Ориентировочный список химических элементов, участвующих в экзогенном эпигенетическом процессе перераспределения в водоносных породах, можно получить также на основе сравнения их среднего содержания в инфильтрационных подземных водах зоны гипергенеза с содержанием в океанической воде. Отношение концентраций отдельных химических элементов в океанической воде к их содержанию в подземных и грунтовых водах зоны гипергенеза весьма информативно для суждений об источниках различных полезных компонентов комплексных урановых руд инфильтрационных месторождений.

Из таблицы видны весьма существенные различия в их содержаниях в океанической воде, в подземных и грунтовых водах зоны гипергенеза. Соответственно элементы руд можно разделить на накапливающиеся в океанической воде, мигрирующие в подземных водах и накапливающиеся в корах выветривания. Коэффициент гидрофильности (КГ) первых >10, а последних <0,1. Промежуточную группу (КГ = 0,1–10) составляют элементы с переменной, но небольшой концентрацией в подземных водах.

К элементам, накапливающимся преимущественно в корах выветривания, относятся Th, Sc, La, Al, Fe, Mn, Y, Pb, Nb, Zr, Ga, Ge, $C_{\text{опр}}$, Ra, Ti, к мигрирующим в подземных водах – Se, Cr, Sb, Cd, Si, Zn, Au, V, Co, Ba, Ag, U, W, Cs, P, As, Sn, Ni, F, $C_{\text{мин}}$, I, Mo, Ca. В группе водных мигрантов катионогенными являются только Ca, Ba и Cs, тогда как большая их часть принадлежит к анионогенным элементам: Mo, (Re), Se, I, W, As, Cr, V, F, P, Si. Из элементов комплексообразователей к этой группе относятся Ni, Co, Au, U, Sn, Cu, Zn. Следовательно, в инфильтрационном переносе и формировании рудных концентраций участвуют химические элементы, образующие в водном растворе отрицательно заряженные простые и комплексные ионы, не выпадающие в осадок в процессе гидролиза и сорбции на природных сорбентах – катионах.

Анализ накопленных данных по перераспределению минеральных и органических веществ инфильтрационными подземными водами позволяет рассматривать их вместе с вмещающей средой – коллекторами этих вод, в качестве единой рудообразующей системы,

Таблица. Коэффициенты гидрофильтности химических элементов

Накапливающиеся в океане		Мигрирующие в подземных водах		Накапливающие в коре выветривания	
КГ > 10		0,1 < КГ < 10		КГ < 0,1	
100n	10n	n	0,n	0,0n	0,00n
Cl	K	Ca	U	Ni	Mn
Br	Mg	I	Ag	Ra	Fe
Na	Rb	C _{мин}	Da	Ge	Al
B	Sr	F	Co	C _{опр}	La
	S	Ni	Cu	Ga	Sc
	Li	Sn	V	Zr	Th
		As	Au	Nb	
		P	Si	Pb	
		Cs	Sb	Y	
		W	Cr		
			Se		

в которой формируются экзогенные эпигенетические месторождения многих химических элементов. К настоящему времени достаточно глубоко разработана гидрохимическая модель процесса формирования урановых и сопутствующих руд в этой системе [Лисицин, 1996]. Важнейшими элементами ее являются две зоны: верхняя – зона выноса и перераспределения минеральных веществ и нижняя – зона их концентрирования. В первой – верхней – преобладают процессы кислотно-щелочного разложения пород в зоне аэрации и в верхней части зоны развития грунтовых и подземных вод, а во второй – нижней – проявлено окислительно-восстановительное перераспределение, эпигенетический привнос и отложение рудных компонентов на геохимическом восстановительном барьере.

Приведенные в статье [Лаверов и др., 2000] данные о масштабах кислотно-щелочного перераспределения отдельных химических элементов в процессах окислительно-восстановительных взаимодействий на окончаниях зон пластового окисления определенно свидетельствуют о необходимости быть осторожными в прогнозах возможного накопления в этих зонах элементов, не изменяющих валентного состояния в природных окислительно-восстановительных условиях среды. При объяснении причин появления в ассоциации с ураном других химических элементов, извлекаемых в процессе кислотного подземного выщелачивания через скважины, следует учитывать их конвергентную природу. Не все они имеют одинаковый генезис. Уран и извлекаемые вместе с ним методами ПВ сопутствующие редкие и рассеянные химические элементы, по меньшей мере, имеют инфильтрационное эпигенетическое, диагенетическое и седиментационное происхождение.

Рассмотрим это положение на примере скандия. Скандий относится к редким элементам не потому, что его мало в земной коре, а потому, что он не образует собственных месторождений. Кларк скандия в осадочных породах, по А.П. Виноградову [1962], – 10 г/т. По данным А.А. Беуса и С.В. Григоряна [1975], среднее содержание скандия в глинистых

сланцах составляет 13 г/т, в песчаниках и карбонатных породах – до 1 г/т. По данным [Иванов и др., 1989], кларк скандия для земной коры составляет 16,6 г/т. В осадочных породах средние содержания скандия распределяются следующим образом (г/т): глины – 11,3, глубоководные глины – 23,2, известняки – 1, песчаники – 6,8. Среди песчаников наиболее богаты скандием разности, содержащие ильменит, рутил, монацит, циркон. Зрелые песчаные породы, в которых резко преобладает кварц, обеднены скандием (до 1–2 г/т).

Обращает на себя внимание концентрирование скандия в основных магматических породах, в осадках, возникших за счет их разрушения, и в корах выветривания. Л.Ф. Борисенко [1988] выделяет следующие главные минералы-концентраторы скандия (в %): ферримусковит – до 0,4, вольфрамит – до 0,25, кассiterит и берилл – до 0,13, циркон – до 0,12, слюды – до 0,05, монацит – до 0,03, ильменит и фторапатит – до 0,02.

Ураноносные пески рассматриваемых месторождений обогащены скандием до 5–6 г/т, против 2–4 г/т в исходных сероцветных разностях. Отмечается, что его сингенетические концентрации в глинах на указанных месторождениях находятся на уровне 10–15 г/т. Следовательно, кроме экзогенных эпигенетических концентраций, скандий существует в песках в составе обломочных минералов и диагенетических накоплений в фосфатных остатках и в глинистом цементе. Реальное соотношение масштабов близкларкового эпигенетического перераспределения и доли скандия в составе аллотигенных и аутигенных минералов, содержащих скандий, а также сорбионного глинистым цементом, может быть определено только в результате соответствующего детального анализа, без которого невозможно определить долю скандия, накопленную в ураноносных породах эпигенетического инфильтрационного происхождения.

Накопление скандия в ураноносных песках в результате его кислотно-щелочного перераспределения

некоторые авторы [Шмарович и др., 1989] связывают с процессами гидролиза. Гидролиз солей скандия начинается, как известно, при рН 4,8–4,9 и достигает максимума при рН 8,5. В этой работе проведены специальные эксперименты, согласно которым минимум растворимости оксида скандия установлен при рН 9,5–10 – 10^{-7} г/л. Увеличение кислотности приводит к увеличению растворимости оксида скандия. Правда, в карбонатном растворе, при рН около 5, наблюдается некоторое уменьшение растворимости оксида скандия – от $n \cdot 10^{-2}$ до $n \cdot 10^{-3}$ г/л, вызванное исчезновением из раствора карбонатов и разрушением комплексного иона. Физико-химические данные, плохо согласуются с представлением о существенном перераспределении скандия в профиле рудоконтролирующей зональности пластовых инфильтрационных месторождений урана. Как было показано в [Лаверов и др., 2000], измерения рН здесь находятся в интервале, неблагоприятном для его перевода в раствор.

Сернокислотное подземное выщелачивание урановых руд пластовых инфильтрационных месторождений во всех случаях сопровождается поступлением в продуктивный раствор концентраций скандия, измеряемых долями мг/л. На месторождениях, прилегающих к областям сноса обломочного материала из районов с широким развитием основных пород (например, месторождение Далматовское в Зауралье), его содержание достигает целых мг/л. Имеющееся в литературе утверждение [Натальченко и др., 1988; Шмарович и др., 1989] о возможном подземном выщелачивания скандия по бикарбонатной схеме противоречит реальности [Соловьев и др., 1993].

Скандий, а также иттрий и лантан обнаруживаются в продуктивных растворах участков сернокислотного подземного выщелачивания и при их близкларковых концентрациях в породах. В качестве иллюстраций такой возможности на рис. 8 приведен геохимический разрез скважины, вскрывшей урановорудные интервалы водопроницаемых пород. Здесь отчетливо виден контроль урановых руд верхней и нижней границами зон пластовой лимонитизации, вдоль которых они локализуются в неокисленных породах. Содержания скандия, иттрия и лантана в прямой коррелятивной связи с распределением урана не обнаруживают. Для скандия видна связь с содержанием глинистого материала в песчаных отложениях. Иттрий обнаруживает тяготение к породам, обогащенным растительными остатками, а лантан – распределен более монотонно, хотя и повторяет в сглаженном виде кривую распределения иттрия. Лантаноиды в песках в основном встречаются в составе акцессорных фосфатов – апатит, монацит и ксенотит.

Более изменчиво распределение в породах кислоторастворимой части рассматриваемых химических элементов. При этом в отличие от урана, который полностью выщелачивается из пород серной кислотой с перманганатом калия, скандий, иттрий и лантан в таких условиях поступают в растворы в малой степени. Содержания их кислоторастворимой части

на порядок меньше валового содержания в породах. Повторяя в более контрастном виде кривые распределения в разрезе валовых содержаний, вблизи окислительно-восстановительной границы железа наблюдается всплеск увеличения кислоторастворимых форм скандия и особенно иттрия при неоднозначном поведении лантана. Возможно, что указанные повышения концентраций кислоторастворимых форм скандия и иттрия связаны с рассмотренной выше микрозональной кислотно-щелочной неоднородностью, приводящей к некоторому преобразованию форм нахождения рассеянных элементов в менее устойчивые формы.

Возможность сернокислотного выщелачивания скандия, иттрия и лантаноидов из пород с близкларковыми содержаниями этих элементов подтверждается и по данным о природных кислых растворах.

Наиболее широко такие растворы развиты в областях современного вулканизма. По данным А.З. Миклишанского и др. [1987], в кислой воде (рН 1,25) истока р. Юрьева, стекающей с вулкана Эбеко на о-ве Парамушир Курильской вулканической гряды, содержания скандия и церия составляют соответственно 0,13 и 0,19 мг/л. В концентрациях, измеряемых сотыми долями мг/л, в этой воде обнаружены Ga, La, Pr, Sm, Dy, Er, Yb. По данным Е.А. Баскова и С.Н. Сурикова [1975], в кислой среде вулкана Эбеко (рН 0,8) содержание скандия составляет 0,15–0,37 мг/кг, иттрия – 0,15 мг/кг. На о-ве Кунашир в Нижнеменделеевском источнике, на склоне вулкана Менделеева, при рН 1,75 содержания скандия и иттрия составляют 0,16 мг/кг. Характерно, что скандий обнаруживается в кислых водах и отсутствует в близнейтральных и слабощелочных.

На этом примере видна близкая степень обогащенности скандием, иттрием и лантаноидами кислых источников вулканических областей и продуктивных растворов сернокислотного подземного выщелачивания урановых руд. В целом несколько меньшая степень обогащения вод источниками объясняется, очевидно, тем, что в трещинных коллекторах вулканических построек растворы «находятся дальше» от равновесия с породами, чем в поровых коллекторах песков рудоносных горизонтов на участках подземного выщелачивания.

В близнейтральных и щелочных подземных водах скандий из пород практически не выщелачивается. В пластовых близнейтральных водах рудоносных горизонтов, по данным инструментального нейтронно-активационного анализа (НАА), содержания скандия находятся на уровне десятых долей мкг/л. В океанической воде его среднее содержание составляет 0,0008 мкг/л, в подземных водах зоны гипергенеза – в среднем около 0,1 мкг/л, в термальных водах – 0,003–0,02 мкг/л. Иттрий и лантан в отличие от скандия интенсивно выщелачиваются и в щелочной гидрогеохимической среде. Так, по данным С.Р. Крайнова [1973], в агпайтовых сиенитах вода с рН 9–10 содержит десятки мкг/л иттрия и сотни мкг/л церия и лантана. В то же время менее щелоч-

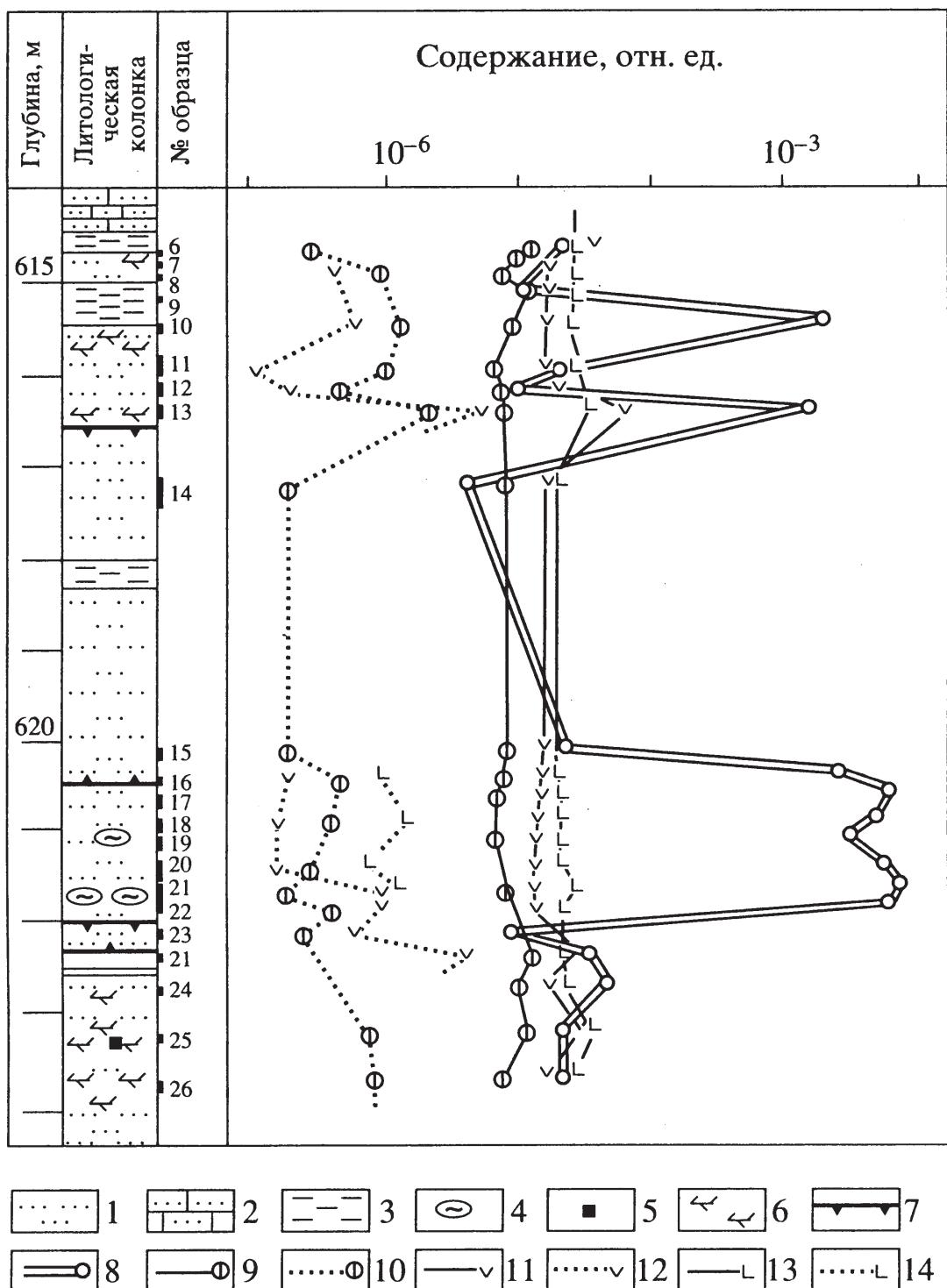


Рис. 8. Распределение урана, скандия, иттрия и лантана в разрезе рудоносного горизонта (месторождение Харасан. Скв. 7503).

1 – песок мелкозернистый; 2 – песчаник карбонатный; 3 – алевролит; 4 – глинистый окатыш; 5 – выделение дисульфидов железа; 6 – обугленный растительный остаток; 7 – граница зоны пластового окисления; 8 – содержание в породах урана; содержания скандия, иттрия и лантана: 9, 11, 13 – валовое, 10, 12, 14 – кислоторастворимое.

Уран в породах и в сернокислотных вытяжках определен колориметрическим методом с арсеназо III (аналитик – Л.С. Шулик, ИГЕМ РАН). Скандий, иттрий, церий и лантан определены количественным спектральным методом (аналитики: А.И. Галудзина – в породах, Г.Е. Белоусов – в растворах, ИГЕМ РАН)

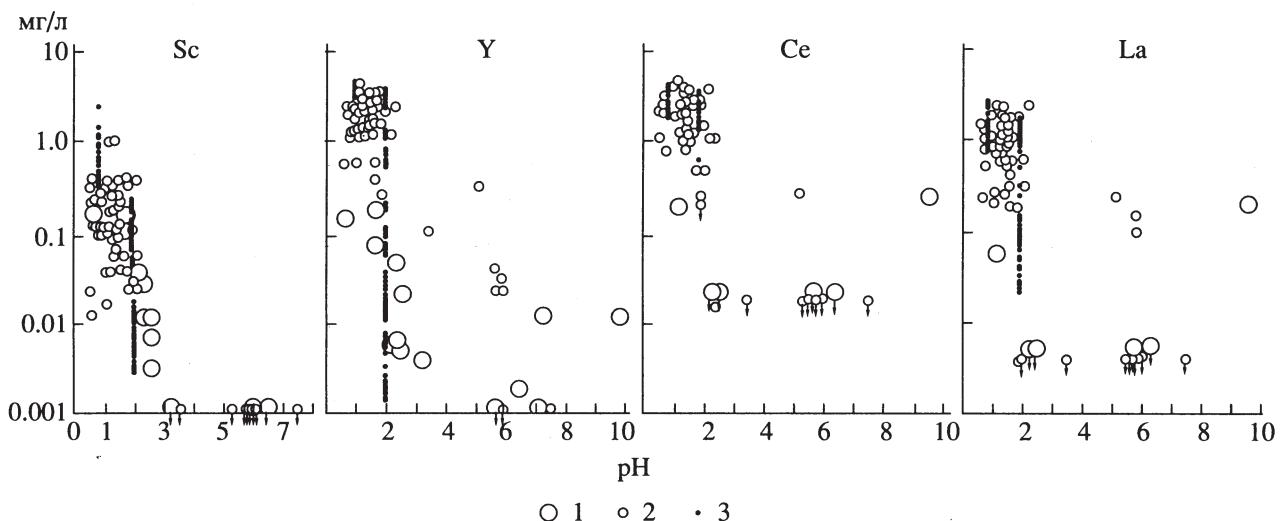


Рис. 9. Зависимость содержаний скандия, иттрия, церия и лантана в растворах от значений pH.

1 – подземные воды (по литературным данным с дополнениями); 2 – технологические растворы на участках сернокислотного подземного выщелачивания урана, пластовых инфильтрационных месторождений; 3 – сернокислотные вытяжки из терригенных пород рудоносных горизонтов пластовых инфильтрационных месторождений урана.

Анализы технологических растворов и сернокислых вытяжек выполнены количественным спектрохимическим методом (аналитик – Г.Е. Белоусов, ИГЕМ РАН)

ные воды типа азотных терм лишены аналитически определяемых концентраций этих элементов. В пластовых водах районов рассматриваемых месторождений содержания лантана и церия, по данным НАА, не превышают долей мкг/л.

На рис. 9 показана зависимость содержаний скандия, иттрия, церия и лантана от pH выщелачивающих растворов и подземных вод. Здесь видно, что в подземных водах, в сернокислых растворах на участках подземного выщелачивания и в сернокислых вытяжках из образцов пород аналитически определимые концентрации скандия появляются при pH меньше 3. Дальнейшее увеличение кислотности приводит к увеличению содержаний скандия до долей и даже целых мг/л. Иттрий, церий и лантан в таких сильно кислых средах также переходят в раствор. В технологических растворах и в сернокислых вытяжках они достигают более высоких концентраций, чем скандий. Их обычные концентрации в таких растворах измеряются целыми мг/л.

Поскольку концентрации сопровождающих уран редких и рассеянных элементов в рудах на несколько порядков меньше концентрации урана, но только большие масштабы производства позволяют рассчитывать на вполне приемлемые количества попутных рудных компонентов, получаемых при ПВ урана. При их обычных содержаниях в технологических растворах 0,1–10 г/м³ и средней производительности откачных скважин 100–300 м³/сут содовая добыча таких элементов из одной скважины может составлять от 3 до 1000 кг. Ориентируясь на эти величины, можно утверждать, что извлечение редких и рассеянных элементов (попутно с ураном) из технологических растворов может быть вполне рентабельным.

По мнению авторов, в рудах пластовых инфильтрационных месторождений урана, эксплуатируемых методом ПВ, следует выделять две группы элементов, сопутствующих основному оруденению. Первая группа – это элементы комплексных урановых руд, сформированные в едином эпигенетическом, инфильтрационном рудообразующем процессе. Кроме урана в нее входят селен, молибден, рений, медь и ванадий, т. е. элементы переменной валентности, образующие нерастворимые соединения (в низковалентном состоянии) во фронтальной зоне пластового окисления пород. Вторая группа – это сопутствующие элементы, имеющие иной генезис, которые могут селективно выщелачиваться из пород с достижением таких концентраций в откачных растворах, которые позволяют вести рентабельную их эксплуатацию. При сернокислом подземном выщелачивании к этой группе можно отнести скандий, вероятно, иттрий, лантаноиды и другие, редкие и рассеянные элементы, не изменяющие валентного состояния в природном интервале физико-химических параметров инфильтрационной рудообразующей системы. Потенциально к этой группе могут быть отнесены все те редкие и рассеянные химические элементы, соединения которых растворимы в сернокислой среде, особенно образующие устойчивые сульфатные комплексные ионы. Прочные сульфатные комплексы с константами устойчивости больше 10³ образуют Ba, Be, Bi, Cd, Ce, Cr, Dy, Er, Eu, Gd, Hf, Hg, Ho, In, La, Lu, Ni, Pb, Pt, Sc, Sm, Tb, Th, Ti, Tm, U, Y, Yb и Zr. Из них наиболее прочные комплексы с контактами устойчивости более 10⁶ образуют Zr, U, Tm, Th, Sc.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненных исследований позволяют выдвинуть, как весьма актуальную задачу, постановки широкомасштабных специальных исследований по выбору литогенетических типов осадочных отложений и их фациальных и геохимических разновидностей, а также эффективных реагентов для обоснования рентабельного извлечения методами ПВ редких и рассеянных химических элементов из водопроницаемых пород. По существу появились реальные возможности выхода на принципиально новый вид минерального сырья, отличающийся от привычных рудных концентраций, и организацию его добычи с помощью весьма прогрессивных, экологически безопасных технологий ПВ.

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

ЛИТЕРАТУРА

- Басков Е.А., Суриков С.Н. Гидротермы тихоокеанского сегмента земли. М.: Недра, 1975.
- Беус А.А., Григорян С.В. Геохимические методы поисков месторождений твердых полезных ископаемых. М., 1975.
- Борисенко Л.Ф. Генетические типы месторождений скандия // Литология и полез. ископаемые. 1988. № 4. С. 82–90.
- Виноградов А.П. Среднее содержание элементов в главных типах изверженных горных пород // Геохимия. 1962. № 7. С. 15–32.
- Германов А.И. Кислород подземных вод и его геологическое значение // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1955. № 6. С. 70–81.
- Германов А.И., Лисицын А.К., Волков Г.А., Серебренников В.С. Явление глубокого проникновения атмосферного кислорода в гидросферу // Открытия СССР в 1989 г. М.: ВИНИТИ, 1990. С. 19–20.
- Гидрогенные месторождения урана (основы теории рудообразования) / Под ред. Перельмана А.И. М.: Атомиздат, 1980. 256 с.
- Иванов В.В., Юшко-Захарова О.Е., Борисенко Л.П. и др. Геологический справочник по сидерофильным и халькофильным редким металлам. М.: Недра, 1989.
- Каримов Х.К., Бобоноров Н.Ц., Бровин К.Г. и др. Учкудуцкий тип урановых месторождений Республики Узбекистан. Ташкент: Фан, 1996.
- Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н. Экзогенно-эпигенетические урановые месторождения Кызылкумов и сопредельных районов // Геология руд. месторождений. 1993. Т. 35. № 3. С. 222–245.
- Крайнов С.Р. Геохимия редких элементов в подземных водах. М.: Недра, 1973.
- Лаверов Н.П., Величкин В.И., Шумилин М.В. Урановые месторождения стран Содружества: Основные промышленно-генетические типы и их размещение // Геология руд. месторождений. 1992. № 2. С. 3–18.
- Лаверов Н.П., Лисицын А.К., Соловьев И.Н. Уранодержащие полиметаллические экзогенные эпигенетические месторождения: условия образования и источники металлов, извлекаемых методами ПВ. // Геология рудных месторождений, 2000. № 1. С. 3–26.
- Лисицын А.К. Метод определения Eh-pH химического равновесия водного раствора с горными породами и минералами // Геохимия. 1967. № 8. С. 994–1000.
- Лисицын А.К. Об условиях осаждения молибдена и селена в экзогенных эпигенетических месторождениях // Литология и полез. ископаемые. 1969. № 5. С. 27–35.
- Лисицын А.К. Гидрохимическая модель инфильтрационной рудообразующей системы // Геохимия. 1996. № 3. С. 294–304.
- Максимова М.Ф., Шмариевич Е.М., Рехарская В.М. Рений – сопутствующий компонент инфильтрационных урановых месторождений // Разведка и охрана недр. 1983. № 8. С. 12–16.
- Михлишанский А.З., Колотов В.П., Яковлев В.Н. Нейтронно-активационный анализ геотермальных вод и продуктов их взаимодействия с морскими водами // Геохимия. 1987. № 1. С. 142–146.
- Натальченко Б.И., Брович К.Г., Калинкин В.И., Синенький Л.А., Наумов Г.Б. Сопутствующие элементы в экзогенных эпигенетических месторождениях урана // Докл. АН СССР. 1988. Т. 302. № 6. С. 1476–1480.
- Перевозчиков Г.В., Натальченко Б.И. Зона выклинивания пластового окисления экзогенных эпигенетических месторождений урана – источник локального газообразования // Изв. вузов. Геология и разведка. 1985. № 6. С. 67–70.
- Перельман А.И. Геохимия. М.: Высшая школа. 1989.
- Петров Н.П., Язиков В.Г., Аубакиров Х.Б. и др. Урановые месторождения Казахстана (экзогенные). Алматы: Гылым, 1995.
- Подземное выщелачивание полиметаллических руд / Под ред. Лаверова Н.П. М.: Изд-во Акад. горн. наук, 1998.
- Соловьев И.Н., Киреев А.М., Зеленова О.И. Техногенные окислительные изменения восстановленных ураноносных песчаных отложений морского генезиса // Литология и полезные ископаемые. 1993. № 6. С. 84–86.
- Соловьев И.Н., Величкин В.И., Рубцов М.Г. и др. Гидрохимический каротаж: теория и практика / Под ред. В.И. Величкина. М.: Едиториал УРСС, 2005. 320 с.
- Шмариевич Е.М., Полупанова Л.И., Натальченко Б.И., Бровин К.Г. Поведение скандия в пластово-инфилтратационном рудообразующем процессе // Литология и полез. ископаемые. 1989. № 1. С. 83–92.
- Экзогенные эпигенетические месторождения урана. Условия образования. М.: Атомиздат, 1965.
- Finch W.I. Geology of epigenetic uranium deposits in sandstones in the United States // US Geol. Survey Prof. Paper. 1967.
- Harshman E.N. Distribution of elements in some roll-type uranium deposits // Proceeding of Simposium Athens 6–10 May 1974. Vienna, 1974. P. 169–183.

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