

УДК 553.07

## ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ НОВООБРАЗОВАНИЯ НА ЭКЗОГЕННЫХ ИНФИЛЬТРАЦИОННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УРАНА И ИХ СВЯЗЬ С ВОСХОДЯЩИМИ ПОДЗЕМНЫМИ ВОДАМИ

© 2020 г. Б. Т. Кочкин\*

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Москва, Россия*

*\*e-mail: btk@igem.ru*

Поступила в редакцию 29.11.2018 г.

После доработки 19.09.2019 г.

Принята к публикации 23.09.2019 г.

Рассмотрены примеры урановых месторождений геолого-промышленного типа, получившего название “гидрогенные”, а в англоязычной литературе “песчаниковые”, на которых обнаружены т.н. “восстановительные новообразования”. В дополнение к тому случаю, когда такие новообразования на месторождении отсутствуют, выделены несколько характерных типов новообразований, включающих в разных соотношениях осветление пород и перераспределение железа, аргиллизацию, карбонатизацию, битуминизацию, сульфидизацию и другие изменения вмещающих пород. Показано, что характер этих новообразований меняется от региона к региону и их состав зависит, главным образом, от состава и условий формирования подземных вод данного региона. Наиболее ярко проявляются новообразования, связанные с водами нефтегазоносных бассейнов, а также с углекислыми водами фундамента, имеющими глубинную природу. На месторождениях, связанных с разгрузкой “азотных терм”, новообразования менее существенны.

*Ключевые слова:* экзогенные урановые месторождения, песчаниковый тип, восстановительные новообразования, подземные воды

**DOI:** 10.31857/S0016777020010049

### ВВЕДЕНИЕ

Теория экзогенного инфильтрационного уранового рудообразования создавалась в 60-е гг. XX века практически одновременно в СССР и в США (Экзогенные..., 1965; Finch, 1967). Благодаря четкой формулировке поисковых критериев разного масштаба, в короткий срок по всему миру были открыты сотни месторождений данного типа с запасами от тысяч до миллиона тонн урана. Песчаниковые месторождения составляют четверть ресурсной базы этого важного энергетического сырья. В 2015 г. числилось 662 действующих месторождений (World..., 2018).

Формирование песчаниковых урановых месторождений обычно связывают с развитием процесса поступления урана с инфильтрационными кислородными водами метеорного происхождения в проницаемые отложения осадочного чехла. Важную роль в урановом рудообразовании на выклинивании зон окисления играет тип восстановителя этого металла: сингенетический или эпигенетический относительно вмещающих пород или оба типа. В отсутствие сингенетических восстановителей (углистое органическое вещество) условия для осаждения урана задают жидкие или

газообразные вещества (битумы, нефть, сероводород, метан, водород и другие) (Лаверов и др., 2000). Нахождение последних в рудовмещающих породах связывают с проникновением в пластовую гидродинамическую систему «глубинных» восходящих вод. Последствия такого проникновения фиксируются в виде восстановительных новообразований по минералогическим и литолого-геохимическим признакам. Явление встречается в разных регионах планеты. Признание этого факта отражено в классификации МАГАТЭ через разделение песчаниковых месторождений на подтипы, например, такие как пластовые и ролловые месторождения с сингенетическими (intrinsic) и эпигенетическими (extrinsic) восстановителями (World..., 2018). В российской литературе устоялось деление месторождений урана в породах осадочного чехла на два генетических класса: “окислительного” и “восстановительного” эпигенеза (Шмариович, Лисицин, 1982). Последний класс руд формируется внутри пластовой системы на участках “гидравлических завес” (Кисляков, Щеточкин, 2000). На большинстве песчаниковых месторождений урановая минерализация представлена преимущественно на-

стураном с некоторой долей коффинита и реже — нингиоита. В качестве элементов-спутников присутствуют селен, молибден, рений и другие элементы в микроколичествах.

Месторождения “окислительного эпигенеза” (или окислительной эпигенетической зональности) образуются при взаимодействии ураноносных инфильтрационных кислородных подземных вод с сероцветными породами, содержащими органическое вещество (углистого, реже битумного ряда) и другие сингенетичные породам восстановители урана. Месторождения “восстановительного эпигенеза” формируются также из инфильтрационных кислородных вод при участии восходящих восстановительных термальных растворов, которые вызывают комплекс преобразований вмещающих пород, сопровождающихся привнесением элементов в восстановленных формах. Некоторые из этих веществ служат эпигенетическими восстановителями урана (углеводороды, сероводород, водород), другие участвуют в формировании восстановительных окolorудных новообразований. Поступление урана вместе с этими термальными водами в настоящее время не рассматривается. Сегодняшние дискуссии сводятся к обсуждению роли “эндогенного фактора” в экзогенном урановом рудообразовании.

Анализ особенностей восстановительных новообразований на урановых гидрогенных месторождениях, предпринятый в настоящей статье, имел целью оценить разнообразие данного феномена и дать по возможности объективную оценку природы вод, которые его вызывают.

### КЛАССИЧЕСКИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ АЛЬПИЙСКОГО ВОЗРАСТА

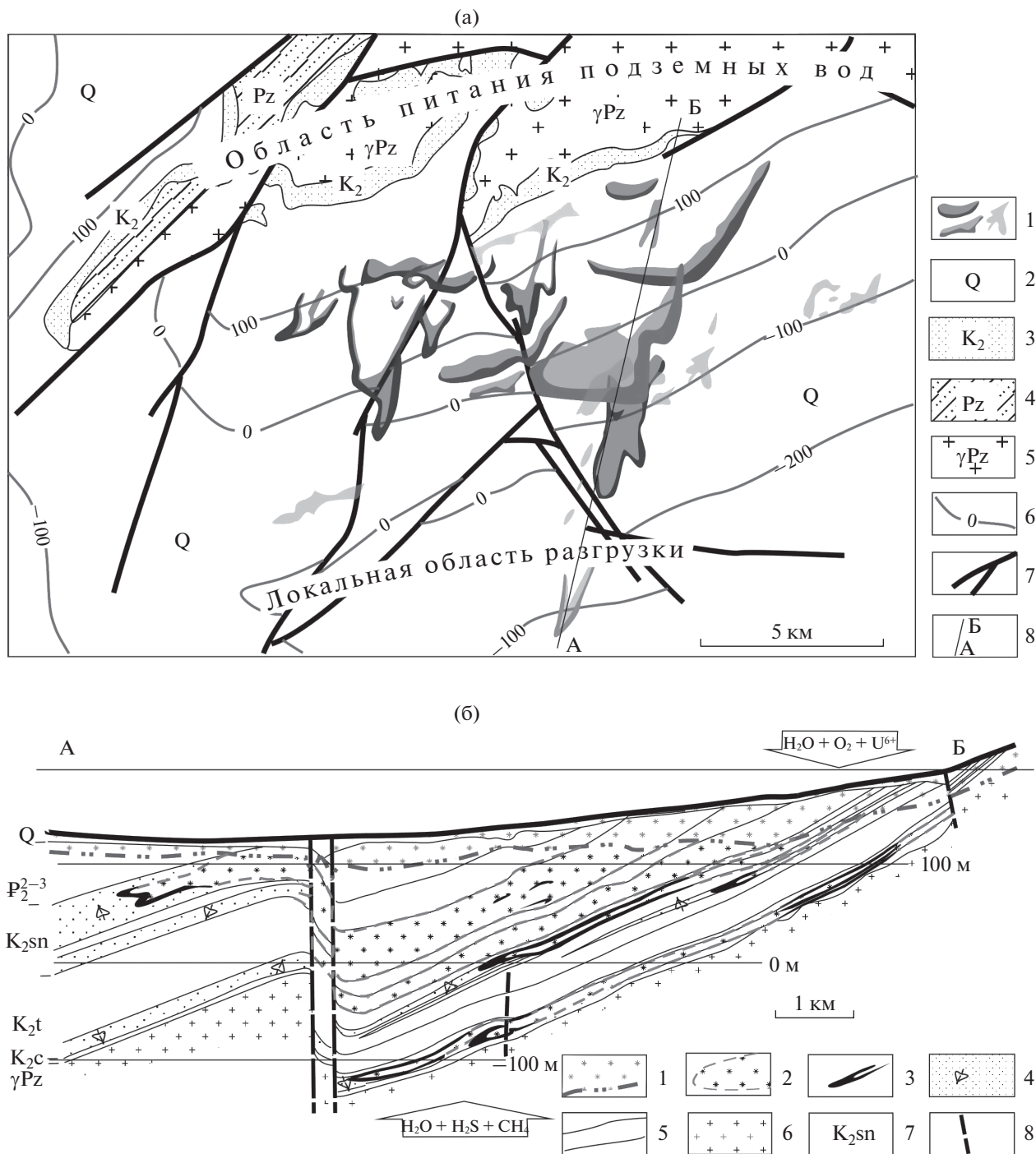
На классических инфильтрационных месторождениях восстановительные новообразования, связанные с подтоком восходящих вод, не установлены. Месторождения формируются в исходно сероцветных породах, в которых наблюдается рудоконтролирующая окислительная зональность. Рудные тела закономерно располагаются в исходно сероцветных породах на границе с окисленными. Гидрогеохимическая зональность соответствует литолого-геохимической. В области окисленных пород подземные воды содержат растворенный кислород и повышенные концентрации урана, тогда как в области сероцветных пород этот газ отсутствует, а концентрации урана понижаются на порядки. На этом основании считается, что формирование рудной минерализации продолжается в настоящее время. Восстановители урана — исключительно сингенетические. Месторождения имеют альпийский возраст, притом что возраст вмещающих пород может быть много древнее. По запасам урана эти месторождения различаются на порядки. От гигантских месторождений роллового подтипа в

Чу-Сарысуьской провинции, приуроченной к обширному осадочному бассейну мел-палеогенового возраста с напорным пластовым инфильтрационным режимом в тафрогенной обстановке суборогенной области Притяньшанья (Кисляков, Щеточкин, 2000). Содержание урана в рудах 0.05–0.25% U. До мелких месторождений, относящихся к пластовому подтипу, локализующихся в четвертичных речных долинах с безнапорным грунтовым потоком кислородных вод. Примером может служить месторождение Санарка в Прикамье (Халезов, 2017). Содержание урана в рудах 0.01–0.06%, но в отдельных пересечениях, обогащенных углестым веществом, достигает нескольких процентов. Другим классическим примером служат месторождения роллового подтипа в штате Вайоминг, США. Именно здесь в 1960 г. была замечена общая закономерность локализации урановых руд на границе серых и желтых песков одного и того же состава (Rackley, 1972). В республике Узбекистан точно такое же наблюдение было сделано на месторождении Учкудук в Кызыл-Кумах после его открытия в 1954 г. Возможны все промежуточные размеры месторождений по запасам в зависимости от размеров и структуры осадочных бассейнов с инфильтрационной динамикой кислородных ураноносных вод (фиг. 1).

### ДРЕВНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В связи с тем, что эпигенетическая литолого-геохимическая зональность в породах водоносных горизонтов соответствует гидрогеохимической зональности пластовых вод, смена гидрогеохимической обстановки во времени отражается в смене эпигенетических изменений, полным вторичном восстановлении окислительной рудоконтролирующей зональности и консервации оруденения. Это явление характерно для относительно древних месторождений. Их возраст обычно мезозойский (Долматовское и другие в Зауралье), но такое явление встречается и на молодых альпийских месторождениях (например, Витимский район, Забайкалье).

Пример — месторождение палеодолинного (базального по МАГАТЭ) подтипа Долматовское в Зауральском урановорудном районе (Кондратьева, Максимова, 1989). Зона окисления развивалась в позднеюрско-раннемеловую эпоху в аллювиальных песчаниках юрского возраста. Здесь восстановительные новообразования выражены вторичным восстановлением пород зоны окисления. Ее следы обнаруживаются в виде реликтов недоокисленной органики, минералов закисного железа и др. К этапу развития окислительной зональности относится также каолинизация зерен полевых шпатов в массе вмещающих песчаников. Каолинизация связывается с подкислением кислородосодержащих пластовых вод, благодаря оби-



**Фиг. 1.** Месторождение Учкудук. Пример классической инфильтрационной рудообразующей системы. (Составлено автором с использованием материалов разведочного бурения). (а) Геологическая схема и проекция рудных тел. 1 – проекции рудных тел, локализованные в разных горизонтах (оттенки серого цвета); 2 – чехол четвертичных отложений; 3 – верхнемеловые осадки; 4 – метаморфические породы палеозоя; 5 – палеозойские граниты; 6 – изогипсы поверхности фундамента; 7 – разломы; 8 – линия разреза А–Б. (б) Схематический разрез с положением рудных тел в рудоконтролирующей зональности. 1 – зона поверхностного окисления и ее граница; 2 – граница зоны пластового окисления и окисленные пески; 3 – пески сероцветные с углистым детритом; 4 – рудные тела; 5 – стратиграфические и литологические границы; 6 – граниты фундамента; 7 – возраст пород; 8 – разломы.

лию органического вещества и дисульфидов железа в исходных породах. Вторичное восстановление выражается в общем осветлении вмещающих пород. В белесых вторично восстановленных породах отсутствуют углеродистое вещество и сульфидная сера (менее 0.1%), а количество валового железа приблизительно на 25–30% ниже, чем в исходных сероцветных породах. Кроме этого, восстановительные новообразования фиксируются новообразованиями сидерита, в меньшей степени хлорита и кубического пирита. Сидерит нередко присутствует совместно с гидрогетитом, что свидетельствует о перераспределении железа в процессе вторичного восстановления и наличии участков с неустойчивой геохимической обстановкой (Халезов, 2017). Состав сегодняшних пластовых вод бессульфатный содовый (гидрокарбонатно-хлоридно-натровый) с pH 7.5–9.2. В незначительных количествах присутствует сероводород. В рудоносных отложениях его содержание возрастает (Солодов и др., 2006).

Агентом вторичного восстановления пород считаются пластовые воды, преобразованные в самом рудовмещающем горизонте за счет сохранившихся растительных остатков в условиях весьма застойного водообмена. Застойный водообмен устанавливается в проницаемых горизонтах после перекрытия областей их питания мощными водонепроницаемыми толщами. Обычно гидродинамическим экраном служат толщи морского происхождения, перекрывающие рудовмещающие палеодолины (Кондратьева, Максимова, 1989). Как вариант такого развития событий можно рассматривать перекрытие областей питания мощной зоной многолетнемерзлых пород. Пример последнего случая – Витимский урановорудный район. Здесь после образования экрана многолетнемерзлых пород ок. 2.5 млн лет назад изменилась обстановка в рудовмещающих горизонтах. Сократилось поступление сульфат-иона, из состава активной анаэробной микрофлоры практически исчезли сульфатредуцирующие бактерии. Современный состав подземных вод гидрокарбонатно-сульфатный кальциево-натриево-магниевый с pH 7.6–8.1. Сероводород обычно отсутствует. Правда, на гидрогеохимическую обстановку здесь влияют также углекислые воды, которые поступают в рудовмещающий горизонт на локальных участках разломов фундамента (Кочкин и др., 2017а, б).

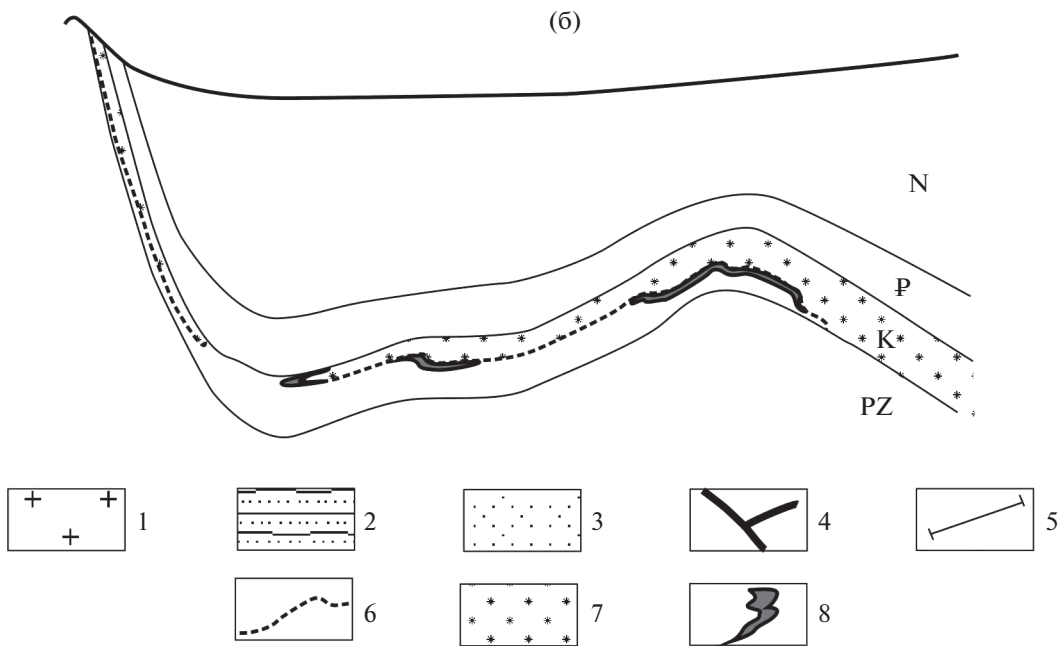
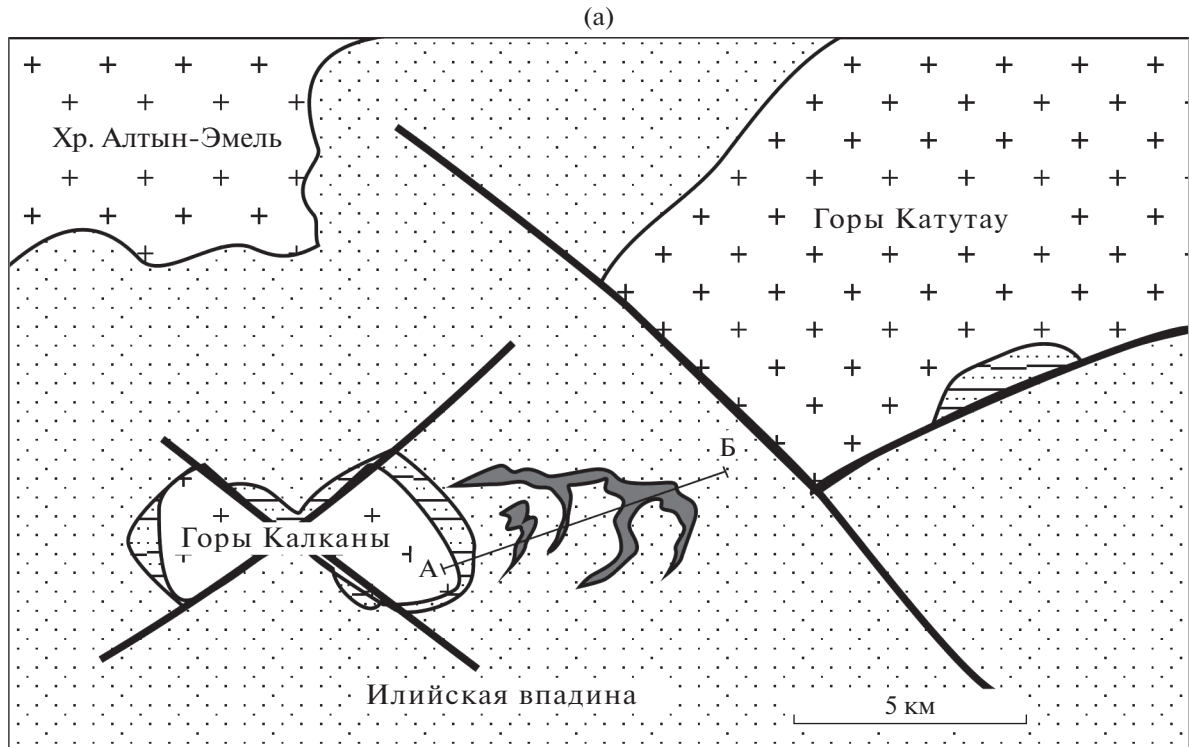
## МЕСТОРОЖДЕНИЯ С НЕЯВНЫМИ ИЗМЕНЕНИЯМИ

На некоторых месторождениях признаки восстановительных новообразований носят скрытый характер, притом что поступление восходящих вод из фундамента в рудовмещающий горизонт достоверно установлено. Характерный пример представляет

Сулучекинское месторождение роллового подтипа. Оно расположено в северном борту протяженной и сравнительно узкой Илийской депрессии, в обрамлении южных отрогов Джунгарского Алатау (Республика Казахстан) недалеко от границы с Китаем. Сулучекинское месторождение представляет особый интерес в связи с сохранностью желтоцветной окраски пластовоокисленных пород, несмотря на восстановительную гидрогеохимическую обстановку в них (Кочкин и др., 1990). Следы начавшегося восстановления пород зоны пластового окисления, тем не менее, наблюдал Ю.В. Яшунский (неопубликованный отчет) в виде микроскопических выделений пирита на лимонитах.

Месторождение является примером полного противоречия данных по гидрогеохимии пластовых вод рудовмещающего водоносного горизонта с наблюдаемой в нем рудоконтролирующей литолого-геохимической зональностью. Урановое оруденение – закономерный член окислительной зональности. Оно контролируется границей желтоцветных и сероцветных пород и локализуется в сероцветных породах верхнемелового возраста, содержащих растительный детрит (фиг. 2). В гидрогеологическом отношении площадь Сулучекинское месторождения характеризуется приуроченностью к локальной гидрогеохимической аномалии. Если на сопредельных территориях пластовые воды рудовмещающего горизонта имеют низкую минерализацию (<1 г/л), содержат растворенный кислород и обычные в таких случаях концентрации урана (2.7–6.5 мкг/л), то на территории месторождения развиты сульфатно-хлоридно-натровые воды повышенной минерализации (2–9.6 г/л), бескислородные и безурановые ( $U < I$  мкг/л). В них обнаружены растворенные метан, водород, следы сероводорода и битумов, а также гелий. Уровень общей минерализации пластовых вод, их химический состав и состав растворенных газов ( $N_2 > 90\%$  об.), отсутствие урана, температура на изливе скважин около 40°C и др. позволяют отнести их к так называемым “азотным термам”, широко развитым в Тянь-Шаньской орогенной области. Эти термальные воды по своему генезису относятся к инфильтрационным водам глубокой циркуляции.

Палеогидрогеологические данные указывают на то, что кислородная инфильтрация и, соответственно, процесс рудообразования, которые начались около 4 млн лет назад, прекратились менее чем 150 тыс. лет назад, после того как рудоносный блок был частично изолирован от области питания кислородными водами в горах Катутау (Кочкин и др., 1990). С кратким периодом восстановительных условий, а также с составом азотных терм, можно связать почти полное отсутствие восстановительных новообразований.



**Фиг. 2.** Месторождение Сулучекинское. Геологическая позиция (а) и разрез (б) (по Кочкин и др., 1990) 1 – породы фундамента; 2 – мел-палеогеновые породы; 3 – неогеновые породы; 4 – разломы; 5 – положение разреза на карте; 6 – граница зоны пластового окисления (на разрезе); 7 – пластовоокисленные меловые песчаники (на разрезе); 8 – рудные тела.

**МЕСТОРОЖДЕНИЯ  
НАД НЕФТЕНОСНЫМИ ГОРИЗОНТАМИ**

Восстановительные новообразования на этих месторождениях связаны с нефтяными водами, поступающими из подстилающих горизонтов. При-

мером служат некоторые из месторождений Южно-го Техаса, США (Goldhaber et al., 1983). Все они относятся к ролловому подтипу и имеют альпийский возраст. Рудные тела залегают в прибрежно-морских песчаных отложениях миоценового возраста.

та. Вмещающие породы могут не содержать углестых обломков, поэтому в качестве восстановителей урана рассматриваются также углеводороды и сероводород, привнесенные в рудовмещающие горизонты из подстилающих осадочных водоносных горизонтов с нефтегазовой специализацией. Эти же воды привели к пострудной пиритизации вмещающих пород и руд и вторичному восстановлению пород зоны пластового окисления на месторождениях Фелдер и Лампрехт. Консервация урановой минерализации в восстановительной обстановке позволила определить уран-свинцовый возраст этого события. Он оказался равным примерно 5 млн лет (Ludwig et al., 1982).

Следует обратить внимание на локальный характер новообразований, формирующихся под воздействием восстановительных флюидов, поступающих по разломам.

Локальный характер имеют также ореолы восстановительных новообразований, развивающиеся в красноцветных отложениях над залежами углеводородов. Эти ореолы могут выполнять рудоконтролирующую роль для урановой минерализации. Общей чертой такой минерализации является их положение в сводах нефтегазоносных структур, осложняющих приподнятые крылья крупных артезианских бассейнов. Урановая минерализация находится в пределах контуров вторично восстановленных красноцветных пород (Зеленова и др., 1969). На участках максимального изменения все без исключения красноцветные породы приобрели характерные синевато-серые или зеленовато-серые тона. Характерным минералом вторично восстановленных пород является пирит, который представлен хорошо ограненными кристаллами (кубы, октаэдры, додекаэдры). Для пиритизированных пород характерно развитие хлорита, который замещает обломочный биотит. Кроме пирита и хлорита, в зонах пиритизации наблюдается перераспределение карбонатов, с дополнительной карбонатизацией некоторых прослоев. Также отмечается образование гидрослюд и в некоторых случаях алунита. Дополнительная карбонатизация и алунитизация пород связывается с подкислением подземных вод благодаря поступлению снизу по разломам вместе с  $H_2S$  больших количеств  $CO_2$ , что согласуется с газовым составом законтурных вод нижележащих нефтегазовых залежей.

#### МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ГРАНИЦЕ С НЕФТЕГАЗОНОСНЫМИ ПРОВИНЦИЯМИ

Новообразования, получившие название “углекисло-битумные” благодаря комплексу эпигенетических изменений вмещающих пород, включающих окремнение, карбонатизацию, каолинизацию, пиритизацию или гетитизацию, битуминизацию и другое, были изучены в Кызылкумской провинции

(Щеточкин, 1970). На месторождении Южный Букинай были задокументированы ореолы новообразований пластовой и жильно-штокверковой морфологии, слагающие “карбонатные столбы”, секущие все горизонты рудовмещающих сероцветных и пластооокисленных пород. Позднее выяснилось, что подобные изменения распространены на многих месторождениях по всей провинции. Главная особенность этих новообразований – локальность, структурный контроль и отсутствие урановых концентраций в ядре таких “столбов” (Кисляков, Щеточкин, 2000).

Месторождения Кызылкумской урановорудной провинции имеют альпийский возраст и локализируются в меловых и палеогеновых отложениях аллювиального и прибрежно-морского происхождения. Она граничит с Бухаро-Хивинской нефтегазоносной провинцией, подземные воды в которой характеризуются эксфильтрационным режимом (Кисляков, Щеточкин, 2000; Печенкин, 2014). Эти воды и рассматриваются в качестве поставщика восстановительных вод, проникающих через фундамент в сопредельные районы с инфильтрационным режимом подземных вод. На юге Кызылкумской провинции, вблизи сочленения бассейнов с разным гидродинамическим режимом подземных вод, урановые рудные тела подчас совмещаются с ореолами битумов, а зоны пластового окисления вторично восстановлены, как например, на месторождении Сабырсай. В рудных и околорудных песчаниках установлены проявления эпигенетической пиритизации, гетитизации, баритизации, карбонатизации, каолинизации и окварцевания (Рослый и др., 1979). В средней части провинции (Букинайское рудное поле) встречаются крупные ореолы углекисло-битумных новообразований (Кисляков, Щеточкин, 2000). На удалении от нефтегазоносного бассейна и ближе к центральной оси Кызылкумского свода углекисло-битумные новообразования распространены в меньшей степени. Примерами служат месторождения Учкудук (Машковцев и др., 1979) и Сугралы (Булатов, Щеточкин, 1970).

На месторождении Учкудук восстановительные новообразования были хорошо изучены благодаря наличию обширных карьеров, вскрывавших рудные залежи в разных горизонтах осадочного чехла. Новообразования локализируются в разных горизонтах рудовмещающего осадочного чехла и представлены несколькими ассоциациями с различной морфологией (Машковцев и др., 1979). Кварц-карбонат-сульфидные жилы встречаются в водоупорной глинистой пачке нижнего турона, где они выполняют пустоты в глинах. В кристаллах жильного кварца определена температура гомогенизации 240–340°C. Карбонатная минерализация жильно-пластовой, линзовидной, прожилковой и “гороховидной” морфологии обнаружена в проницаемых отложениях ту-

рона и сенона, где она выполняет цемент песчаных отложений (фиг. 3). Проявления пластово-прожилковой карбонатизации, окремнения с баритом, флюоритом и сульфидами железа найдены в проницаемых породах сеномана и нижнего турона. В урановых телах распространена гетитизация глин, причем выделения гетита, как правило, отделены от рудных пиритизированных сероцветных песков каймами осветления. Ассоциация черных или темно-серых рудоносных песков с желтыми глинами была интерпретирована как наложение восстановительных растворов на ранее окисленные породы. Наличие среди восстановительных новообразований этой ассоциации позволило в качестве дискуссии предположить, что уран поступал вместе с восстановительными растворами (Шмариович и др., 1974). Впоследствии эта точка зрения не получила подтверждения, притом что признание самого факта участия восстановительных растворов в экзогенном рудоформировании осталось (Шмариович, Лисицин, 1982). Взаимодействие нисходящих и восходящих растворов происходит на локальных участках подтока восстановительных флюидов, из-за чего положение геохимического барьера оказывается стабильным в пространстве (“гидравлическая завеса”). Количество урана, приносимого к такому стационарному барьеру, ограничено только временем его существования и концентрацией урана в кислородных водах. Это объясняет формирование особо богатых руд на локальных участках этих месторождений. Эта модель получила математическое и экспериментальное обоснование (Белова и др., 1982), а также наблюдательное подтверждение (Кочкин, 1989). Согласно модели, урановая минерализация должна накапливаться с одной стороны стационарного барьера, разделяющего различные воды, тогда как карбонатизация и другие новообразования — с другой. Пространственное разобщение богатых руд и участков восстановительных новообразований было установлено при документации урановых залежей в карьерах и шахтах на месторождении Учкудук в Кызыл-Кумах.

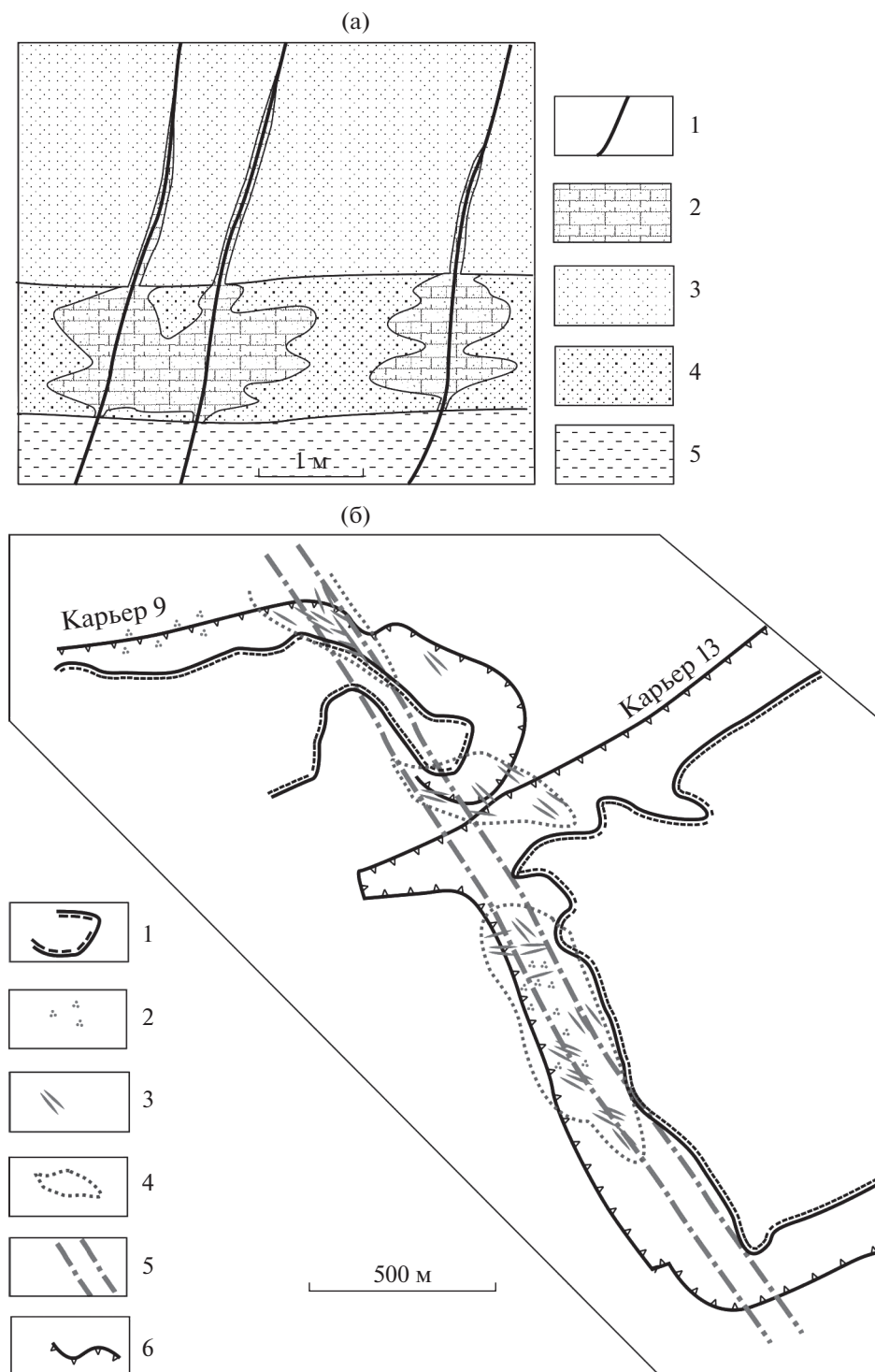
Месторождение Сугралы локализовано в отложениях маастрихта и частично кампана. Оно отрабатывалось шахтным способом, и поэтому состав и морфология изменений достаточно хорошо изучены. Восстановительный эпигенез представлен окремнением (кварц, халцедон, опал), аргиллизацией (каолинит, иллит, монтмориллонит), карбонатизацией (доломит, кальцит), сульфидизацией (пирит, марказит) и битуминизацией. Новообразования образуют локальные ореолы (Кисляков, Щеточкин, 2000). В пределах рудных тел отмечаются также гематитизация, приуроченная преимущественно к карбонатизированным песчанникам. Кроме того, на этом месторождении установлены приразломные ореолы вторично восстановленных пород серо-зеленого цвета (Булатов,

Щеточкин, 1970). Один из них сечет основное рудное тело, в результате чего часть этой залежи оказалась захоронена в зоне вторично восстановленных пород, а на фронте зоны восстановления в глубине окисленных пород было сформировано рудное тело второй стадии (фиг. 4). На этом примере видна не только локальность поступления восходящих вод, но и стадийность рудообразующего процесса, проявляющаяся благодаря изменению соотношения расходов нисходящих кислородных и восходящих восстановительных вод (Кочкин, 1988).

Интересен опыт, приобретенный автором, посетившим в 70-е гг. поднятие Туаркыр (республика Туркменистан). В обрамлении одноименного свода проводилось поисковое бурение на уран. В сероцветных меловых отложениях, содержащих углистый детрит и участки карбонатизации, были выявлены зоны пластового окисления, на выклинивании которых урановой минерализации практически не оказалось. На поверхности были встречены обнажения жильно-штоковерковых карбонатных тел, аналогичных тем, которые автор изучал в карьерах месторождения Учкудук. Отсутствие рудных накоплений объяснялось отсутствием ураноносных пород (источника урана) в области питания кислородных вод на ограниченном по площади своде поднятия. При этом в центральной части свода среди красноцветных пермских пород ранее располагалось мелкое месторождение Серное, к тому времени отработанное. Этот пример прямо указывает на отсутствие связи восстановительного эпигенеза, характерного для нефтегазоносных районов, с рудоносностью инфильтрационных систем, развитых вокруг, а главное, на обязательность источника урана в области питания кислородных вод.

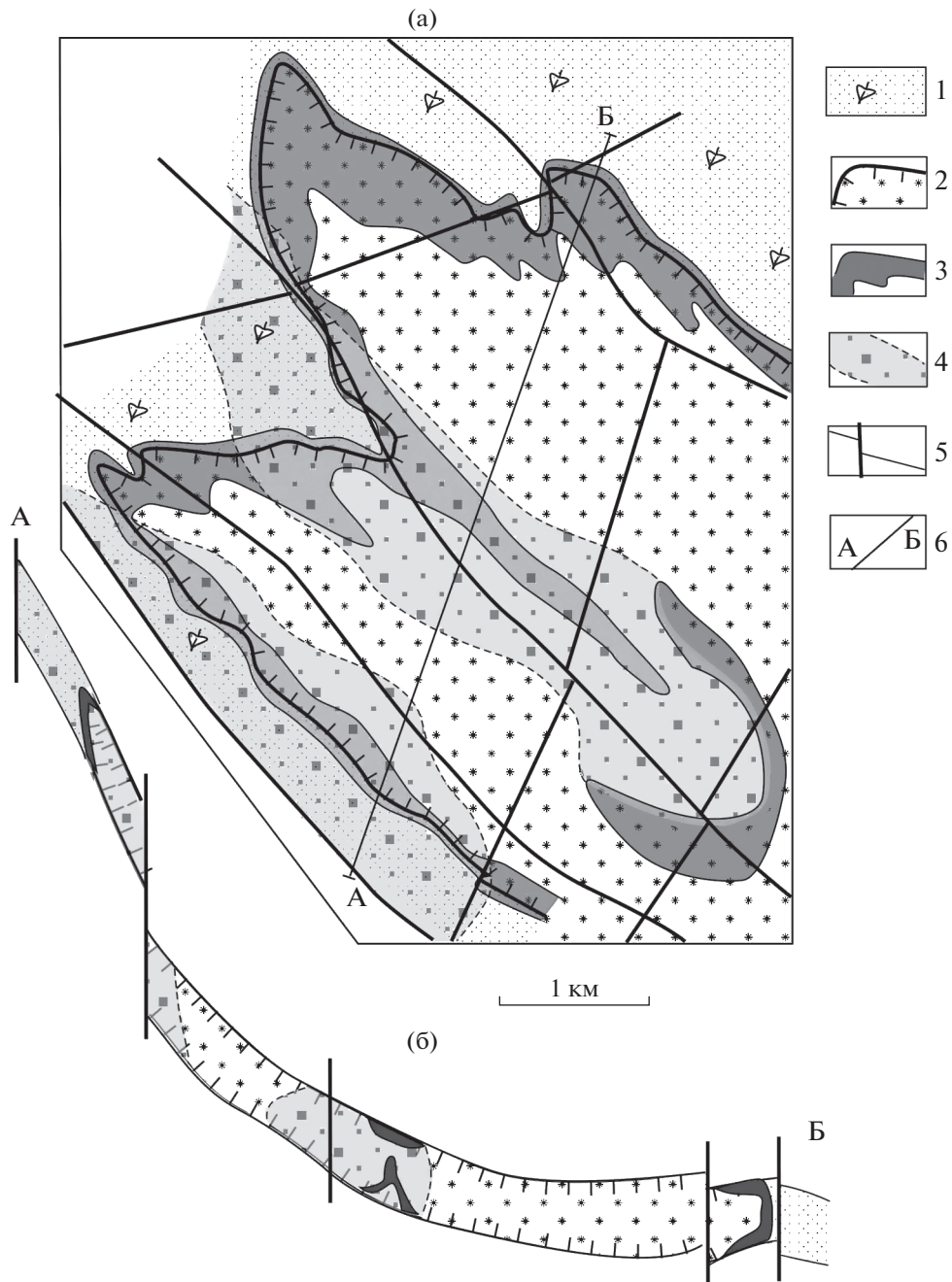
#### МЕСТОРОЖДЕНИЯ С УРАН-КАРБОНАТНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИЕЙ

Такие новообразования известны на палеодолонном месторождении Семизбай, расположенном на юге Западной Сибири. Это месторождение в целом сходно с Долматовским месторождением, расположенным в соседнем Зауралье. Обнаруженную здесь карбонатную минерализацию гидротермального происхождения невозможно связать с магматическими процессами. Развитие зоны пластового окисления было основным рудообразующим процессом в верхнеюрских — нижнемеловых осадках, а время его проявления (ранний мел) — основной рудообразующей стадией. Рудовмещающие породы и руды уранового месторождения Семизбай подвергнуты обычно для древних месторождений процессу вторичного восстановления в застойных гидродинамических условиях. Кроме него установлено локальное воздействие на породы тер-



**Фиг. 3.** Месторождение Учкудук. (а) Пластово-жильная карбонатизация песков (авторская зарисовка стенки карьера № 13). 1 – трещины; 2 – карбонатизация; 3 – пески среднезернистые; 4 – пески крупнозернистые; 5 – алевриты. (б) Схема полей карбонатизации в песках сенона (план; составлен автором). 1 – контуры рудных тел; 2 – поля “гороховидной” карбонатизации; 3 – карбонатные жилы; 4 – ореолы пластово-жильной карбонатизации и осветления окисленных песков; 5 – зона Меридионального разлома; 6 – контуры карьеров.





**Фиг. 4.** Месторождение Сугралы. Рудные залежи и эпигенетические изменения в плане (а) и разрезе (б). Составлено автором по данным разведочного бурения и документации горных выработок, по (Кочкин, 1988). 1 – сероцветные породы с углистым детритом; 2 – граница зоны пластового окисления и область окисленных пород; 3 – проекции рудных залежей; 4 – вторично восстановленные породы и их граница; 5 – границы горизонта (на разрезе) и разломы; 6 – линия разреза А–Б.

мальных углекислых (что следует из состава новообразований) растворов. Это дало основание для выделения двух стадий пострудных процессов – гидротермальной и пластовой восстановительной (Кондратьева и др., 1992).

Минерализация гидротермальной стадии в рудомещающей толще представлена двумя параге-

нетическими ассоциациями: гематит-кальцитовой и гетит-хлоритовой. Первая из них проявлена в виде крупнокристаллического кальцитового цемента песчаных пород. Глобулярные выделения гематита концентрируются по контактам обломочных зерен. Гомогенизация газовой-жидких включений в крупнокристаллическом кальците

происходит в интервале температур 196–216°C. Гетит-хлоритовая ассоциация встречается в песчаниках буровато-зеленого цвета. В них развит ряд железосодержащих минералов: шамозит, хлорит, аллофан, гидроксиды железа (главным образом, гетит) и сидерит. Минералы этих двух ассоциаций установлены также в гранитоидах фундамента депрессии. Установлено, что карбонатизированные и гематитизированные песчаники содержат повышенные (до кондиционных) количества урана, если находятся в контурах рудных залежей или вблизи них. В фундаменте палеодолины зоны гидротермальных изменений не содержат урана.

В целом утверждается, что на этапе позднемезозойской тектонической активизации из гранитного фундамента в осадочный чехол внедрялись горячие углекислые воды. Они не были рудоносными. С ними связано только поступление железа. В то же время, воздействие горячих углекислых растворов на рудные залежи привело к частичному растворению и переосаждению урана совместно с новообразованными кальцитом и гематитом; при формировании гетит-хлоритовой ассоциации такого активного воздействия, по-видимому, не происходило.

Установленное на этом месторождении явление переотложения урана совместно с минералами, образовавшимися из растворов с повышенной температурой, остается одним из немногих примеров такого воздействия “эндогенных” растворов на экзогенное урановое оруденение.

#### МЕСТОРОЖДЕНИЯ В РАЙОНАХ ПРОЯВЛЕНИЯ МАГМАТИЗМА

Урановые месторождения плато Колорадо (США) ныне рассматриваются в ряду песчаниковых месторождений с пластовой морфологией (World..., 2018). Пространственно-временную связь этих месторождений с магматизмом подробно обосновал П.Ф. Керр еще в середине прошлого века (Kerr, 1958). Этот исследователь аргументировал свою точку зрения, в том числе, нахождением в одних и тех же районах рудной минерализации, термальных новообразований и разломов. Обычное явление на плато – обеление и осветление красноцветных и бурых осадков около разломов и урановых тел. Наиболее широко в осветленных зонах распространена аргиллизация. Здесь встречаются перекристаллизованный каолинит и иллит. Аргиллизация пород ассоциирует с доломитизацией и окремнением. Сидеритизация, алунитизация и окремнение пород – более локальны.

Позже песчаниковые месторождения стали обнаруживаться в других регионах развития магматизма. В фундаменте таких регионов обычно рас-

пространены термальные воды, которые формируют соответствующие новообразования. Мелкие и средние урановые месторождения, локализованные в сероцветных песчаниках на выклинивании зоны пластового (грунтово-пластового) окисления, которая может быть вторично восстановлена, распространены в районах проявления позднекайнозойского магматизма внутри континентальных плит и на их окраинах. Они известны в Болгарии (Зеленова и др., 1985), в Северо-Восточном Китае (Zhao et al., 2018), в Витимском районе Бурятии, РФ (Кисляков, Щеточкин, 2000) и в других регионах мира.

В Болгарии на Родопском своде были изучены месторождения Марица, Навысен и Троян (Зеленова и др., 1985). Основной закономерностью локализации уранового оруденения является контроль урановой минерализации границей сероцветных и зеленоцветных (вторично восстановленных) пород. В качестве преобладающего урансодержащего минерала был определен железосодержащий нингиоит. Современные подземные воды рудовмещающей толщи имеют преимущественно гидрокарбонатно-сульфатно-натриевый состав и слабощелочную реакцию (рН 7.4–8.9). По газовому составу (93% азота) они аналогичны так называемым “азотным термам”. Отмечаются участки самоизливающихся вод с повышенной температурой (до 30°C). В них же отмечаются аномальные концентрации гелия и фтора. Это однозначно указывает на разгрузку в пределах рудного поля глубинных вод. Из восстановительных изменений рудовмещающих пород (кроме вторичного восстановления) наиболее широко и интенсивно проявлена монтмориллонитизация туфовых частиц, в отдельных прослоях также отмечались новообразования цеолитов (проявлены довольно слабо), каолинизация (развита весьма локально) и лимонитизация. Лимонитизация в виде охристо-желтых и буровато-желтых порошковатых гидроксидов железа наложена на монтмориллонитизированные туфопесчаники.

На примере месторождений Северного Китая многие годы дебатировался вопрос о том, какие растворы ответственны здесь за рудоформирование: низкотемпературные подземные воды или магматические гидротермальные флюиды, связанные с диабазовым магматизмом. Новообразования, которые некоторые авторы рассматривают как продукты гидротермальных изменений, включают карбонатный цемент, колломорфные и фрамбоидальные агрегаты пирита, аутигенный каолинит и гематит во вмещающих меловых песчаниках этих месторождений. В качестве альтернативы рассматривается участие нефтяных вод, которые могли поступать из подстилающих осадочных пород нижнего мела как следствие активизации разломов (Zhao et al., 2018).

Чианцзядиан — одно из этих месторождений. Рудовмещающая формация имеет верхнемеловой возраст, накапливалась в речных условиях и сложена серыми и пестроцветными песчано-глинистыми отложениями мощностью 160–233 м. Диабазовые дайки, секущие осадки, имеют возраст  $70.0 \pm 3.0$  млн лет. Рудные тела — только линзовидной и пластовой морфологии. Минерализация представлена коффинитом и урановой смолкой. Исследования показали существенный отрыв во времени этапа рудообразования от возраста даек; низкую температуру образования ( $30\text{--}50^\circ\text{C}$ ) и диагенетическую природу кальцита в карбонатном цементе, а также присутствие нефтяных углеводородов во флюидных включениях в кальците; обычную для биогенной дифференциации изотопию серы в пиритах. Эти и другие данные склонили авторов к гипотезе экзогенного формирования руд при участии эпигенетических восстановителей (Zhao et al., 2018).

Витимские месторождения однозначно формировались практически синхронно с вулканическим базальтовым плато, которое в результате перекрыло рудовмещающие осадки на всей территории их развития (Кочкин и др., 2017а). Возраст рудовмещающих осадков 17–2.5 млн лет, возраст платобазальтов 20–0.5 млн лет. Туфы базальтов входят в состав осадков верхней части рудовмещающей свиты, базальтовые неки пересекают осадки, в том числе на территории месторождений, и, наконец, базальты и их туфы перекрывают осадочную и вулканогенно-осадочную толщи сплошным покровом общей мощностью до сотни метров. Рудовмещающие осадки и рудные тела локализируются в небольших палеорулах, врезанных в гранитный фундамент. Рудные тела в основном линзовидные и лентообразные в плане, но встречаются мощные раздувы, напоминающие роллы (Кочкин и др., 2014b). Урановые минералы представлены практически исключительно нингиоитом (Дойникова, Тарасов, 2014).

Особенность месторождений — вторичное восстановление зоны окисления, из-за чего рудные тела контролируются границей сероцветных и белесых (вторично восстановленных) песчаников. Вторичное восстановление здесь традиционно связывают с воздействием углекислых вод, поступающих по разломам из фундамента. Современные подземные воды в фундаменте региона относятся к типу холодных углекислых. В качестве типичных черт этих вод указывают низкую температуру (до  $10^\circ\text{C}$ , на Витимских месторождениях  $2\text{--}4^\circ\text{C}$ ), минерализацию до 1.5 г/л, гидрокарбонатный магниево-кальциевый состав, высокое (до 3.3 г/л) содержание свободной углекислоты и рН до 5.5 при отсутствии сероводорода. По этой причине в этих водах сохраняется высокая подвижность закисного железа, что позволяет рассматривать их как основную причину перераспре-

деления железа во вмещающих породах с формированием пострудного осветления (обеления), пятнистой лимонитизации и сидеритизации вмещающих песчаников (Кисляков, Щеточкин, 2000; Кочкин и др., 2014а). Влияние разгрузки углекислых вод на современный состав подземных вод рудовмещающего горизонта установлено прямыми измерениями (Кочкин и др., 2017b). Вопрос о возможности перераспределения урана в рудных залежах под воздействием углекислых вод остается дискуссионным. Имеются примеры урановой минерализации, диспергированной в гетитовых корках среди обеленных пород. Эта минерализация интерпретируется как результат сорбции урана на гидроксидах железа, приносимого сюда в закисной форме из рудных участков месторождения вместе с углекислыми водами. В то же время урановая минерализация отсутствует в других восстановительных новообразованиях (Кочкин и др., 2017b). Процесс вторичного восстановления вмещающих пород и перераспределение железа вследствие прекращения кислородной инфильтрации, видимо, имеет подчиненное значение, в отличие от мезозойских месторождений (как, например, на месторождении Долматовское). Возможно, сказывается незначительная продолжительность этого процесса на Витимских месторождениях, имеющих альпийский возраст.

Логично предположить, что в периоды активного вулканизма в гранитный фундамент, осадки и базальты могли поступать воды, которые имели высокую температуру и отличались по составу от современных. Термальное и гидротермальное воздействие базальтов, изливавшихся поверх осадков в виде лавовых и туфовых покровов, или прорывавших вулканогенно-осадочную толщу в виде некков, выражено в виде закалки кровли осадков, и соответствующие термальные новообразования визуально прослеживаются в осадках на первые сантиметры. Местами по контакту осадков с базальтами проявлены последствия вулканических фумарольно-гидротермальных процессов, вызывавших осветление базальтов на расстояниях до нескольких метров с образованием узких ветвящихся зон галлуазита, смектитов и карбонатных прожилков по трещинным зонам в самих базальтах, а также в некках. Воздействие поствулканических растворов на вмещающие породы и руды также проявилось в минеральных новообразованиях. Выявлены локальные участки появления кристаллов арагонита в пустотах базальтов и единожды — среди песчаников, совместно с гидроксидами железа. Температура гомогенизации всех арагонитов  $119\text{--}386^\circ\text{C}$  (Кочкин и др., 2017b).

Изучение состава песчаной и глинистой фракций рудовмещающих осадочных пород показало, что гидрослюды метасоматического происхождения в обломочных породах отсутствуют, что указы-

вает на неучастие высокотемпературных поствулканических растворов в урановом рудообразовании. Напротив, низкотемпературные подземные воды играли существенную роль в формировании восстановительных новообразований рудовмещающих пород. К таким новообразованиям относятся скопления эпигенетического сидерита, обнаруженные в разных частях осадочного разреза. Площади, охваченные проявлениями сидеритов и рудной минерализации, не совпадают, но соизмеримы. Изотопные характеристики  $O_2$  и  $C$  из сидеритов не интерпретируются однозначно, но они определенно исключают высокотемпературную гидротермальную природу этого минерала. Сидериты рассматриваются среди новообразований, связанных с углекислыми водами. Сидериты нередко присутствует совместно с гидрогетитом, что свидетельствует о перераспределении железа в неустойчивой гидрохимической обстановке. Эпигенетические дисульфиды железа, которые развиты в рудных телах, считаются продуктом биогенного восстановления сульфатов в процессе рудоформирования (Кочкин и др., 2017а).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате анализа литературных данных на песчаных месторождениях урана выявлено несколько типов восстановительных новообразований, присущих определенным регионам. Интенсивность проявления новообразований зависит от времени воздействия и состава восстановительных вод. Состав новообразований зависит в первую очередь от состава подземных вод, поступавших в рудовмещающие породы. Эти воды отличает широкий разброс температур и разнообразие химического состава, включая растворенные газы. Сами по себе такие воды могут быть проявлены вне ураноносных районов и не являются источниками урана.

Главными поставщиками восходящих флюидов в районах экзогенной ураноносности являются соседние нефтегазоносные бассейны и подземные воды, поступающие из фундамента. Состав новообразований, связанных с водами разной природы, не отличается принципиально. На месторождениях, расположенных в районах с основным магматизмом, не встречено никаких новообразований, принципиально отличающихся от новообразований, связанных с нефтяными или глубинными водами. Обычно встречаются карбонаты, глинистые минералы, дисульфиды и гидроксиды железа, а также кремнезем. Возможно, это связано с конвергентной природой минералов, входящих в комплексы новообразований разного происхождения.

Состав восходящих вод не определяет специфику урановой минерализации. Если на большинстве гидрогенных месторождений урановая

минерализация представлена настураном с некоторой долей коффинита и нингиоита, то на месторождениях в Болгарии и на Витиме доминирует нингиоит, притом что воды там и там совершенно разные — азотные термы в первом районе, холодные углекислые во втором. В Китае рудная минерализация представлена коффинитом и настураном, установлен разрыв во времени между магматизмом и процессом рудоформирования, но имеются данные, указывающие на участие в этом процессе эпигенетических восстановителей нефтяного ряда.

Роль восходящих флюидов в экзогенном урановом рудогенезе различна:

1 — полное отсутствие проявления; 2 — принос эпигенетических восстановителей урана; 3 — консервация сформированного оруденения в восстановительных условиях; 4 — формирование окolorудных восстановительных новообразований; 5 — создание стационарных гидравлических барьеров и формирование богатых руд; 6 — формирование урановых рудных тел в несколько стадий; 7 — редко, в случае углекислого состава, восходящие воды способны инициировать процесс локального переотложения ранее сформированной урановой минерализации в составе новообразованных минералов.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Статья подготовлена при финансовой поддержке госзадания ИГЕМ РАН (тема № 0136-2018-0017).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белова Л.Л., Кричевец Г.Н., Шмариович Е.М.* О гидродинамических условиях формирования эпигенетической минерализации при взаимодействии пластовых вод и восходящих трещинно-жильных растворов // Докл. АН СССР. Геология. 1982. Т. 265. № 2. С. 393–396.
- Булатов С.Г., Щеточкин В.Н.* Особенности рудообразующего процесса на урановых месторождениях пластовой кислородной зональности // Сов. геология. 1970. № 4. С. 110–119.
- Дойникова О.А., Тарасов Н.Н., Мохов А.В.* Новый фосфатный тип урановых руд в России // ДАН. 2014. Т. 45. № 4. С. 434–438.
- Зеленова О.И., Кондратьева И.А., Лисицын А.К.* Эпигенетические изменения красноцветных пород и урановое рудообразование над залежами углеводородов // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1969. № 2. С. 68–89.
- Зеленова О.И., Крылов О.Н., Лисицын А.К., Маринов Б.Н.* Урановое оруденение в туфогенно-осадочных отложениях палеогена юго-восточной Болгарии // Мат-лы по геологии урановых месторождений. М., 1985. Вып. 96. С. 31–41.
- Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н.* Гидрогенное рудообразование. М.: ЗАО “Геоинформмарк”, 2000. 608 с.
- Кондратьева И.А., Максимова И.Г.* Роль восстановительного этапа эпигенетических изменений пород в

- формировании оруденения Семизбайского и Далматовского месторождений // Матер. по геологии урановых месторождений. М., 1989. Вып. 118. С. 62–81.
- Кондратьева И.А., Боброва Л.Л., Нестерова М.В.* Роль пострудных процессов в преобразовании древнего инфильтрационного уранового месторождения // Литология и полезные ископаемые. 1992. №1. С. 70–90.
- Кочкин Б.Т.* Влияние структурных и гидродинамических условий на морфологию пластовых инфильтрационных месторождений урана // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1988. № 7. С. 67–77.
- Кочкин Б.Т.* О пространственном взаимоотношении оруденения и углекисло-битумных новообразований на пластовых инфильтрационных месторождениях урана // Геология руд. месторождений. 1989. Т. 31. № 4. С. 88–97.
- Кочкин Б.Т., Лисицин А.К., Сахарнов О.И.* Геолого-геохимическая модель и палеогидрогеологические условия формирования Сулукчинского месторождения // Матер. по геологии урановых месторождений. М., 1990. Вып. 122. С. 64–75.
- Кочкин Б.Т., Тарасов Н.Н., Величкин В.И., Нестерова М.В., Новгородцев А.А., Шулик Л.С.* Перераспределение железа в пострудную стадию на урановых месторождениях Хиагдинского рудного поля, Витимский район // Геология руд. месторождений. 2014а. Т. 56. № 2. С. 131–147.
- Кочкин Б.Т., Новгородцев А.А., Тарасов Н.Н., Мартыненко В.Г.* Морфологические особенности рудных тел и генезис месторождений урана Хиагдинского рудного поля // Геология руд. месторождений. 2014б. Т. 56. № 6. С. 539–555.
- Кочкин Б.Т., Тарасов Н.Н., Андреева О.В., Асадулин Э.Э., Голубев В.Н.* Полигенность и полихронность урановой минерализации на месторождениях Хиагдинского рудного поля (Бурятия) // Геология руд. месторождений. 2017а. Т. 59. № 2. С. 124–140.
- Кочкин Б.Т., Солодов И.Н., Ганина Н.И., Рекун М.Л., Тарасов Н.Н., Шулина Г.А., Шулик Л.С.* Геохимические особенности рудовмещающей среды на месторождениях урана Хиагдинского рудного поля // Геология руд. месторождений. 2017б. Т. 59. № 5. С. 349–362.
- Лаверов Н.П., Лисицин А.К., Солодов И.Н.* Урансодержащие полиэлементные экзогенные эпигенетические месторождения: условия образования и источники металлов, извлекаемых методами подземного выщелачивания // Геология руд. месторождений. 2000. Т. 42. № 1. С. 5–24.
- Машковцев Г.А., Ткаченко И.И., Щеточкин В.Н., Шмариович Е.М., Кочкин Б.Т., Петрухин В.В.* Основные особенности новообразований восстановительного эпигенеза на месторождении Учкудук // Матер. по геологии урановых месторождений. М., 1979. Вып. 56. С. 95–121.
- Печенкин И.Г.* Геолого-генетические типы гидrogenных месторождений (сообщение второе) // Разведка и охрана недр. 2014. № 7. С. 18–22.
- Рослый А.И., Шмариович Е.М., Рехарская В.М.* О последовательности и зональности эпигенетических преобразований на месторождении Сабырсай // Матер. по геологии урановых месторождений. М., 1979. Вып. 56. С. 108–122.
- Солодов И.Н., Черток М.Б., Ганина Н.И., Шулик Л.С.* Сравнение геохимических особенностей рудоносных горизонтов на молодых и древних гидrogenных месторождениях урана (геотехнологические аспекты) // Геология руд. месторождений. 2006. Т. 48. № 1. С. 71–85.
- Халезов А.Б.* Месторождения урана в речных палеодолинах Уральского региона. Разновидности месторождений типа “несогласия” в фанерозе // Минеральное сырье. № 34. М.: ВИМС, 2017. 194 с.
- Шмариович Е.М., Лисицин А.К.* Проблемы эпигенетического уранового рудообразования в породах осадочного чехла // Условия образования месторождений редких и цветных металлов. М.: Наука, 1982. С. 7–18.
- Шмариович Е.М., Машковцев Г.А., Рослый А.И., Щеточкин В.Н., Ткаченко И.И., Иванов К.Е.* Два класса руд и рудоконтролирующей пластовой зональности на эпигенетическом месторождении урана // Советская геология. 1974. № 7. С. 56–68.
- Щеточкин В.Н.* Изменения углекисло-битумного типа на урановых месторождениях пластовой кислородной зональности // Литология и полезные ископаемые. 1970. № 4. С. 92–101.
- Экзогенные эпигенетические месторождения урана: условия образования / Ред. А.И. Перельман. М.: Атомиздат, 1965. 324 с.
- Finch W.J.* Geology of epigenetic uranium deposits in sandstones in the United States // U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 538. 1967.
- Goldhaber M.B., Reynolds R.I., Rye R.O.* Role of fluid mixing and fault-related sulfide in the origin of the Ray Point uranium district, South Texas // Econ. Geol. 1983. V. 78. № 6. P. 1043–1063.
- Ludwig K.R., Goldhaber M.B., Reynolds R.I., Simmons K.R.* Uranium-lead isochron age and preliminary sulfur isotope systematic of the Felder uranium deposit, South Texas // Econ. Geol. 1982. V. 77. № 2. P. 557–563.
- Kerr P.F.* Uranium emplacement in the Colorado Plateau // Bulletin of The Geol. Soc. of America. 1958. V. 69. № 9. P. 1075–1112.
- Rackley R.I.* Environment of Wyoming Tertiary Uranium Deposits // AAPG Bullutin. 1972. V. 56. № 4. P. 755–774.
- World Distribution of Uranium Deposits (UDEPO). 2016 Edition // IAEA-TECDOC-1843. VIENNA: IAEA, 2018. 250 p.
- Zhao L., Cai C., Jin R., Li J., Li H., Wei J., Guo H., Zhang B.* Mineralogical and geochemical evidence for biogenic and petroleum-related uranium mineralization in the Qianjiadi-an deposit, NE China // Ore Geol. Rev. 2018. V. 101. P. 273–292.