

УДК 551

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УРАНА В РУДОНОСНЫХ ПОРОДАХ МАЛИНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПО ДАННЫМ f-РАДИОГРАФИИ

© 2004 г. И. А. Кондратьева, И. Г. Максимова, Г. И. Надъярных

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН)
119017 Москва, Старомонетный пер., 35*

Поступила в редакцию 30.06.2003 г.

Использование метода f-радиографии при изучении рудоносных пород Малиновского уранового месторождения выявило ряд его особенностей, к которым относятся: нахождение урана в составе как аутигенных, так и терригенных компонентов пород; присутствие тонкорассеянной “безминеральной” формы урана и ее относительно большая роль; участие разновременных эпигенетических процессов в формировании состава руд месторождения. Последовательность образования и преобразования руд аналогичны установленным на Семизбайском месторождении, что позволяет объединить их в единый подтип мезозойских инфильтрационных месторождений Западной Сибири.

Малиновское урановое месторождение расположено в юго-западной части Чулымо-Енисейской котловины, на границе с Кузнецко-Алатауской складчатой зоной. Урановое оруденение буровыми скважинами вскрыто в аллювиальных отложениях позднеюрского – раннемелового возраста (тяжинская и низы киалинской свиты), выполняющих погребенную речную палеодолину, врезанную в метаморфизованные палеозойские породы фундамента котловины, прорванные небольшими интрузиями гранитов и гранодиоритов (рис. 1).

Геологическое строение месторождения рассмотрено в публикациях М.И. Баженова с соавторами [1995], Л.С. Долгушина с соавторами [1995], И.М. Рубинова с соавторами [2000], А.Е. Халдея с соавторами [2000], С.Ф. Винокурова с соавторами [2001], что позволяет не останавливаться на этом вопросе более подробно. Важно отметить, что по основным условиям локализации уранового оруденения – типу рудоносной структуры (эрозионно-тектоническая базальная депрессия), возрасту (J_3 - K_1) и составу рудовмещающих пород (сероцветные аллювиальные отложения), присутствию признаков эпигенетического окисления сероцветных отложений Малиновское является аналогом ряда месторождений, расположенных по периферии Западно-Сибирской плиты, в пределах Курган-Павлодарского ураноносного пояса [Кисляков, Щеточкин, 2000]. Основные закономерности локализации оруденения позволили отнести эти объекты к единому типу экзогенно-эпигенетических, инфильтрационных, сформированных процессами грунтово-пластового окисления в аллювиальных сероцветных отложениях речных палеодолин. В то же время стало очевидным, что месторождения этого пояса распадают-

ся на две группы, различающиеся между собой минерально-геохимическим составом рудоносных толщ, их фаціальными особенностями (что связано с некоторой разницей во времени заложения и формирования палеодолин), условиями инфильтрации кислородсодержащих вод, определившими морфологию уранового оруденения. Еще более значительные различия двух групп проявлены в пострудных (постинфильтрационных) процессах, обусловленных разной геологической историей районов месторождений [Кондратьева, Нестерова, 1997]. Многие общие черты геологического строения и, особенно, проявления пострудных процессов на Семизбайском и Малиновском месторождениях дали основание объединить их в своеобразный подтип – Семизбайский, предложив для всей совокупности месторождений рудоносного пояса название Семизбайско-Далматовский тип [Кондратьева, Нестерова, 2002]. Альтернативные представления о генезисе Малиновского месторождения содержатся в работе С.Ф. Винокурова с соавторами [2001], где минерально-геохимические особенности этого объекта авторы связывают с интенсивным проявлением эндогенных рудообразующих процессов, противопоставляя его всем известным древним и современным месторождениям урана “палеодолинного” типа.

Проведенное изучение рудоносных пород Малиновского месторождения методом f-радиографии позволило получить дополнительную информацию как об особенностях распределения в них урана, так и о последовательности процессов образования и преобразования уранового оруденения.

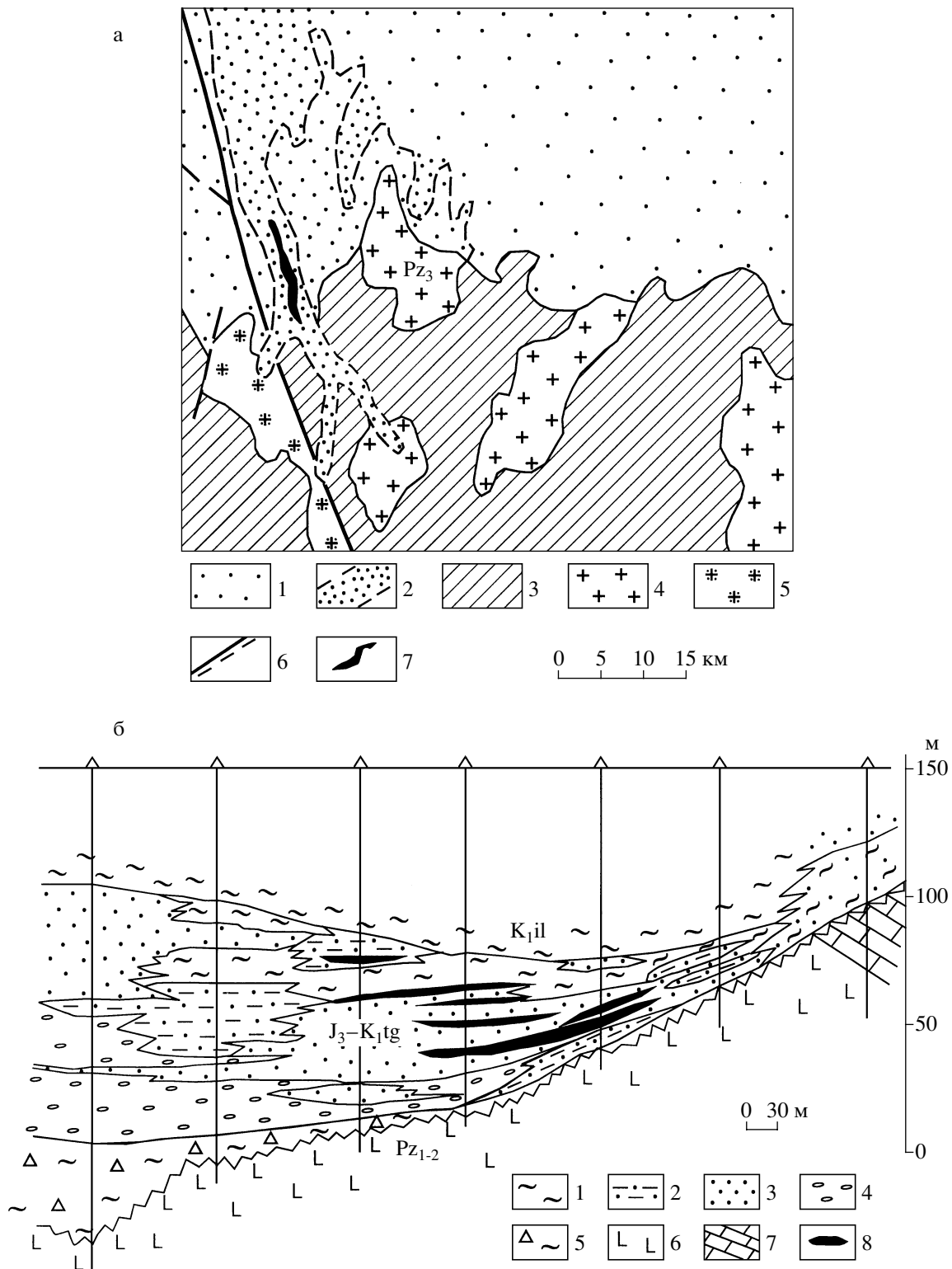


Рис. 1. Схема геологического строения юго-западной части Чулымо-Енисейской впадины (а) и геологический разрез Малиновской депрессии (б). Из работы А.Е. Халдея с соавторами [2000] (схематизировано).

а: 1 – отложения мезозойского плитного комплекса; 2 – Малиновская палеодолина; 3 – метаморфические формации палеозоя; 4 – граниты; 5 – гранодиориты; 6 – разрывные нарушения; 7 – рудоносная полоса.

б: 1 – глины; 2 – алевролиты, глинистые песчаники; 3 – пески; 4 – гравелиты, конгломераты; 5 – кора выветривания; 6 – эффузивы; 7 – известняки; 8 – рудные залежи.

Исследования выполнены в лаборатории радиогеологии ИГЕМ РАН. Образцы пород отобраны при документации керн ряда скважин на Центральном участке месторождения М.В. Нестеровой; ряд образцов передан для изучения главным геологом “Березовгеологии” И.М. Рубиновым, за что авторы выражают им благодарность.

Основы метода f-радиографии разработаны в отделе ядерно-физических методов элементного анализа горных пород и руд ВНИИЯГГ’а под руководством академика Г.Н. Флерова [Берзина и др., 1967; Флеров, Берзина, 1979]; метод нашел широкое применение при исследованиях урановых месторождений [Методы изучения..., 1985].

Определение пространственного распределения и содержания урана в минералах и горных породах этим методом основано на способности ядер урана распадаться на два осколка под действием тепловых нейтронов. Разлетаясь, осколки ядер нарушают структуру окружающего их твердого тела (детектора); следы нарушения (треки) выявляются путем химического травления детекторов. Чувствительность метода весьма высока – до $n \times 10^{-8}\%$, при точности 10–20%. Облучение тепловыми нейтронами осуществлялось в реакторе МИФИ; в зависимости от содержания урана в пробах мощность потока тепловых нейтронов (I) составляла от 1×10^{13} до 1×10^{18} н/см².

В качестве объекта исследования использованы прозрачно-полированные шлифы на кварцевых пластинках; детекторами служила лавсановая пленка, плотно прилегающая к полированной поверхности шлифа. Использование кварцевых пластинок вместо обычных предметных стекол существенно уменьшает время “остывания” (снижения наведенной активности) шлифов после облучения.

Просмотр шлифов и их детекторов под микроскопом сравнения (МИСАМ-212 фирмы ЛОМО) позволяет с большой степенью достоверности установить связь урана с теми или иными минеральными компонентами либо структурными элементами пород, а также определить характер его распределения. Микроскопическая документация шлифов и детекторов осуществляется цифровой камерой Codak MDS-120. Если облучение шлифов и детекторов происходит без “мишени” (препарат с точно известным содержанием урана), являющейся основой для количественного определения содержания элемента, как это сделано в данной работе, по характеру распределения треков и их плотности можно судить об относительной концентрации урана в разных компонентах пород.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ УРАНА В РУДОНОСНЫХ И РУДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОДАХ

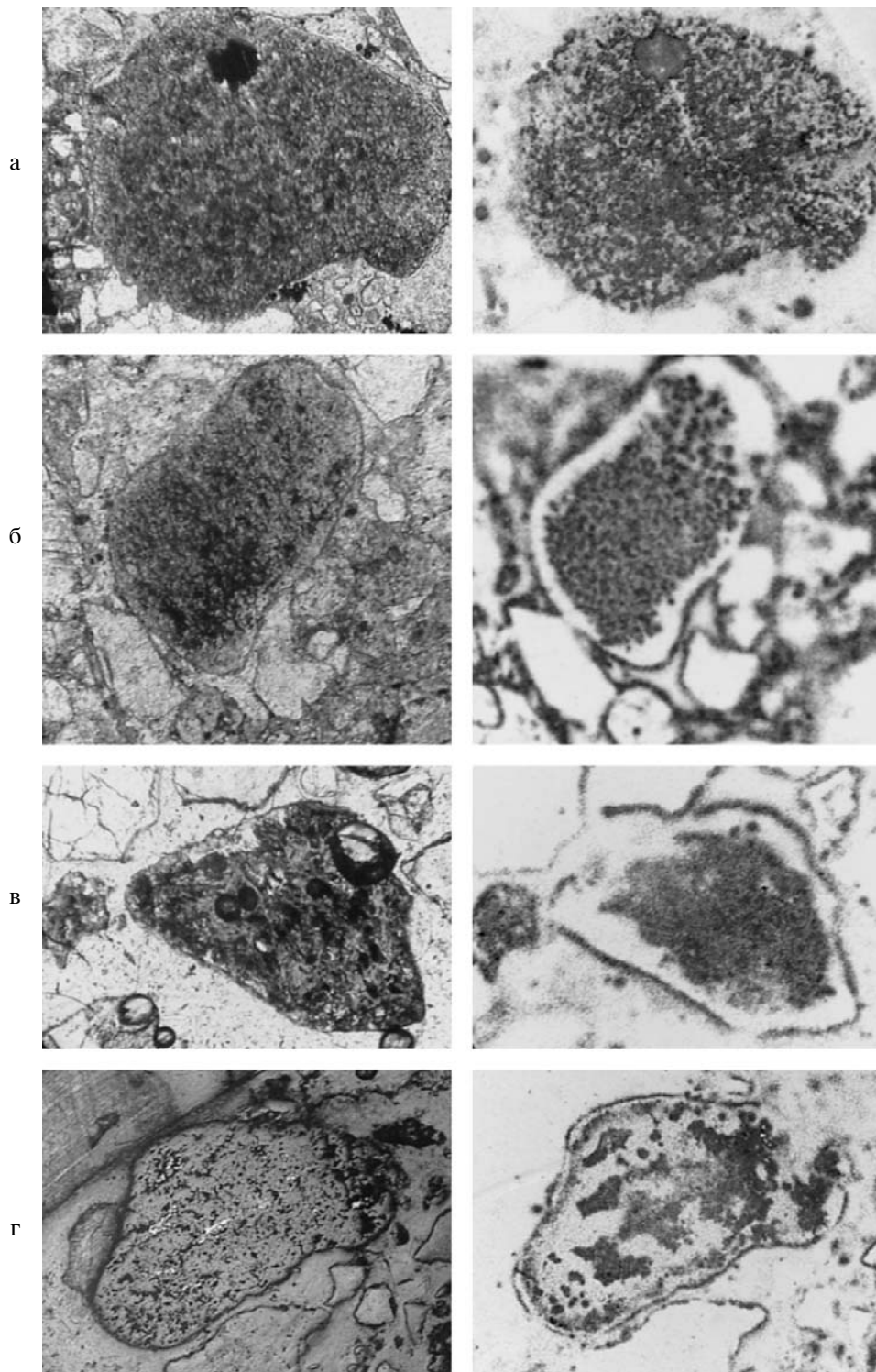
Изучение рудоносных обломочных пород Машиновского месторождения методом f-радиографии показало, что уран в них может содержаться как в аутигенных, так и в терригенных компонентах.

Уран в обломочных зернах

Отложения тяжинской свиты представлены песчаниками, гравийниками, мелкогалечными конгломератами, в составе которых преобладают обломки различных пород; среди них наиболее часто встречаются углисто-кремнистые и глинистые сланцы, эффузивы, криптозернистые кремнистые породы. В целом, по петрографическому составу обломочного материала отложения можно отнести к полимиктовым грауваккам. Методом f-радиографии установлена частая приуроченность урана к обломочным зернам разного состава, причем по характеру распределения обломки разделяются на две группы. **В первой** из них уран весьма равномерно, без каких-либо следов привноса или выноса, распределен во всем объеме; примером этого может служить окатанный обломок углисто-глинистого сланца (рис. 2а). Подобная же картина наблюдалась в зернах криптозернистых кремнистых пород, а также гипергенно-измененного базальта. Возможно, что некоторые из подобных зерен являются обломками пород, изначально содержащих уран, тогда как другие (например, гипергенно-измененные эффузивы) могли обогащаться ураном при процессах корообразования. По нашему мнению, обломочные зерна со сплошным, равномерным распределением урана в таком виде могли быть привнесены в аллювиальные осадки палеодолины, в связи с чем к ним применимо понятие о “досидиментогенной” форме нахождения урана.

Дополнительным доводом в пользу возможной “досидиментогенной” природы концентраций урана служат находки характерных зональных обломков, в которых уран равномерно распределен в их центральных частях и полностью отсутствует в приконтактных. Примером может служить окатанный обломок красного аргиллита, а также обломок дацита, импрегнированный гидроксидами железа (см. рис. 2б, в). В осветленных приконтактных частях обломков отсутствуют как гидроксиды железа, так и уран; иногда осветление наблюдается не только по контактам обломков, но и вдоль разбивающих их трещин.

Тонкие осветленные каемки, равномерно окружающие обломки, очевидно, не могли возникнуть при переносе обломочного материала, скорее всего, они явились результатом восстановле-



ния и выноса железа и связанного с ним урана в слабо восстановительной среде захороняющегося осадка. Во всяком случае, сохранность урана в центральных частях служит аргументом в пользу возможности привноса ураноносных обломков в отложения палеодолины.

Наряду с описанным явлением, в рудоносных породах активно проявлен процесс внедрения урана в обломочные зерна, о чем можно судить по совершенно другим закономерностям его распределения (**вторая группа**). Так, на рис. 2г можно видеть окатанный обломок темно-красного аргиллита с пятнистыми скоплениями тонкокристаллического пирита, которым на детекторе соответствуют сгущения треков. В данном случае и пирит, и концентрации урана имеют отчетливо выраженный наложенный характер. Явление внедрения урана в обломочные зерна на этом месторождении развито весьма широко, что отмечали и ранее [Баженов и др., 1995]. Интенсивность этого процесса полностью связана с характером проницаемости: так, в крепких кремнистых обломках концентрация урана в ассоциации с пиритом наблюдается по плоскостям трещин, в монолитных зернах уран концентрируется только на их поверхности. Характерно, что во всех случаях уран ассоциирует с пиритом, причем по степени его концентрации здесь можно предполагать наличие его самостоятельных минеральных фаз.

Уран в углистых остатках, глинистой массе

Среди образцов, в которых уран концентрируется в углистом органическом веществе, преобладают слабопроницаемые разности пород – алевриты и мелкозернистые глинистые песчаники. На детекторах отчетливо проявлена концентрация урана в мелких углистых включениях в виде полей плотного распределения треков (см. рис. 3а). Глинистая масса при этом характеризуется также равномерным, но более разреженным распределением треков, что свидетельствует об относительно более низких содержаниях урана. Кристаллам пирита в таких породах соответствуют

участки, лишенные треков, тогда как глинистая составляющая вокруг них обогащена ураном больше, чем основная масса.

Аморфизованные, измененные до хлорита и смектита чешуи биотита в таких породах на детекторах фиксируются весьма плотным, равномерным сгущением треков (см. рис. 3б).

Углистые обломки, наряду с равномерным насыщением, могут быть обогащены ураном лишь по поверхности и вдоль трещин (см. рис. 3в). Характерный пример соотношения урановой минерализации в углистом веществе и пирите можно видеть на рис. 3г, где углистый обломок, равномерно насыщенный ураном, окружен сплошным футляром, состоящим из крупных кристаллов пирита, полностью его лишенных. (Концентрация урана на внешнем контуре пирита является результатом загрязнения препарата абразивным материалом, в связи с чем не обсуждается.)

Установлено, что углистое вещество в рудоносной толще обогащено ураном не повсеместно. Так, углистые остатки, залегающие в плотной глине, оказываются полностью безурановыми. Очевидно, этот элемент в растениях прижизненно не накапливался, а непроницаемые глинистые отложения изолировали их остатки от воздействия подземных вод.

Уран в кальците

Среди отложений тяжинской свиты присутствуют линзовидные прослои песчаников с крупнокристаллическим кальцитовым цементом, имеющим, как это будет показано ниже, эпигенетическое происхождение. В связи с тем, что кальцит в ходе дальнейших преобразований толщи подвергается разрушению и выносу, в проницаемых песчаных слоях сохраняются лишь его реликты, которые легко устанавливаются в шлифах, но не отмечаются при макродокументации керн скважин. Среди карбонатизированных пород методом f-радиографии обнаружен кальцит, в состав которого входит уран.

Рис. 2. Распределение урана в обломочных зернах.

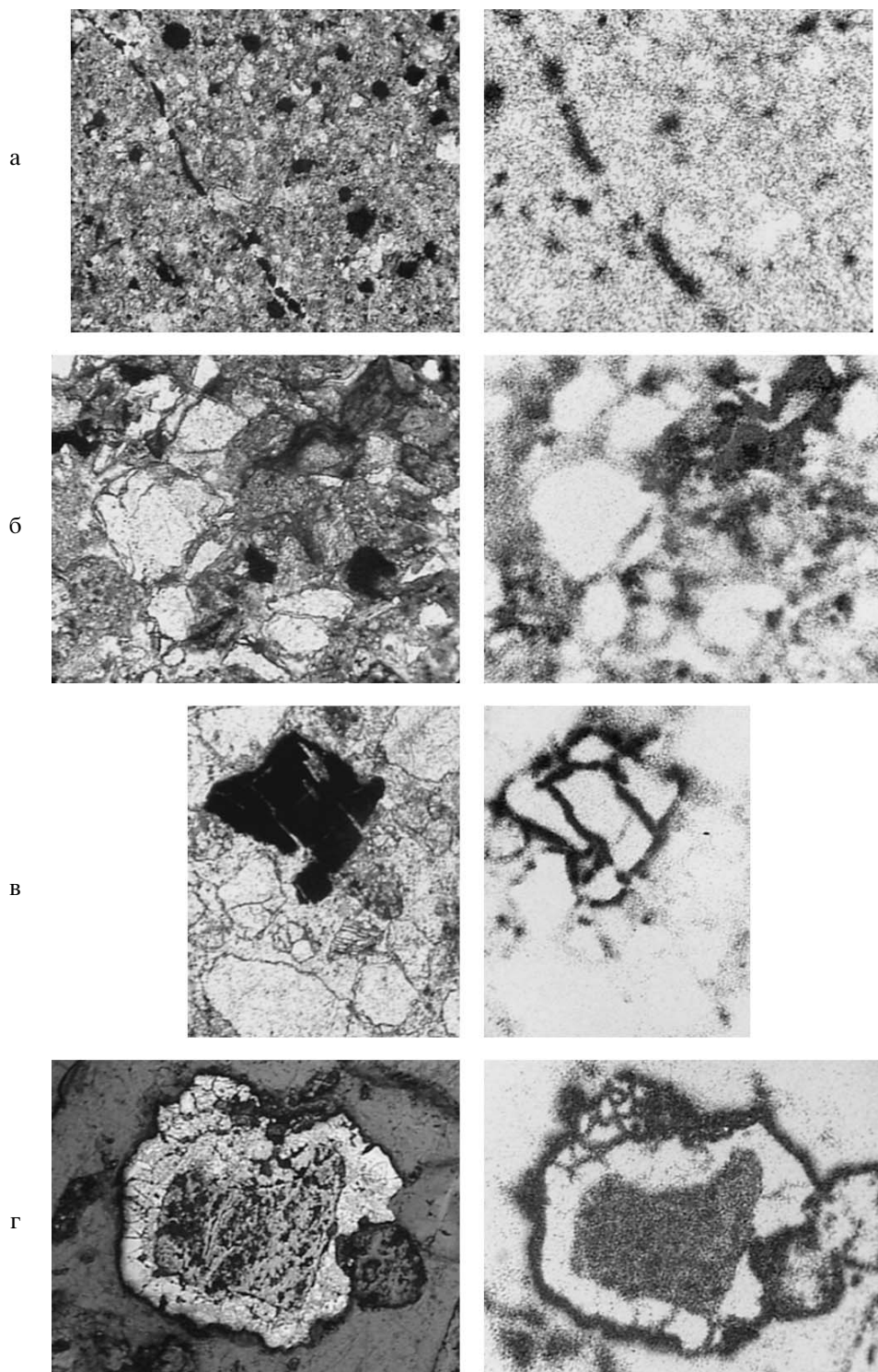
Здесь и на рисунках 3–5 – слева – микрофото прозрачно-полированных шлифов, справа – микрофото детекторов: а, б, в – в проходящем, г – в отраженном свете.

а – окатанный обломок углисто-глинистого сланца, с редкой сыпью мелкокристаллического пирита, с включением углистого обломка (черное на микрофото). Высокая плотность треков характерна для всего объема обломка. Обр. С-10-3; увел. $\times 3.7 \times 6$; $I = 5 \times 10^{15}$ н/см².

б – окатанный обломок аргиллита красного цвета с редкими мелкими кристалликами пирита и марказита; приконтактная часть обломка осветлена. Центральная часть на детекторе характеризуется плотными сгустками треков, осветленная часть – их отсутствием. Обр. С-9-4; увел. $\times 3.7 \times 6$; $I = 1 \times 10^{13}$ н/см².

в – обломок дацита флюидальной структуры, микропузыристой текстуры, пропитанный гидроксидами Fe, с очень мелкими редкими кристалликами пирита. Центральная часть обломка на детекторе характеризуется плотным равномерным распределением треков, периферическая – их полным отсутствием. Обр. 36-60; увел. $\times 3.7 \times 6$; $I = 1 \times 10^{13}$ н/см².

г – обломок глинистой породы буровато-красного цвета, со скоплениями мелких кристалликов пирита. Пятна сгущения треков на детекторе соответствуют участкам пиритизации. Обр. 36-60; увел. $\times 3.7 \times 6$; $I = 1 \times 10^{13}$ н/см².



На рис. 4а, б представлены микрофото шлифов таких песчаников; на детекторах темные поля с относительно равномерным распределением треков полностью соответствуют выделениям кальцита в их межзерновых пространствах. Распределение урана в кальците может иметь весьма прихотливый характер. Так, на рис. 4в видно, что плотность треков на детекторе в участках, соответствующих крупнокристаллическому кальциту, меняется очень сильно, что говорит о значительном изменении содержания урана в пределах одного и того же кристаллического выделения. Еще более сложное распределение урана представлено на рис. 4г, где крупный монокристалл кальцита в межзерновом пространстве песчаника в одной части обогащен ураном, тогда как другая его часть урана практически не содержит. При этом видимых оптических различий между двумя частями кристалла кальцита нет.

Установлено также, что кальцит, цементирующий песчаники, ураноносен не повсеместно; в ряде случаев на детекторах ему соответствуют участки с полным отсутствием треков.

Уран в участках пиритизации

В рудоносных породах Малиновского месторождения широкое, местами весьма интенсивное, развитие имеют дисульфиды железа, среди которых преобладает пирит различных модификаций; в подчиненном количестве присутствует марказит. На основании наших наблюдений можно сделать вывод о существовании двух генераций дисульфидов Fe, причем обе относятся к эпигенетическим образованиям.

О первой эпигенетической генерации пирита говорилось выше, при описании распределения урана в углистых остатках и глинистом веществе.

Ко второй (поздней) генерации относятся дисульфиды железа, положение которых в ряду преобразований определяется коррозионными взаимоотношениями с крупнокристаллическим кальцитом. На рис. 5а представлен участок тако-

го кальцита, цементирующего песчаник, и участок, где кальцит отсутствует (участок декарбонатизации). На их контакте развиты кристаллы пирита, внедряющиеся в кальцит. Кальцит при этом, судя по f-радиографии, интенсивно, но очень неравномерно обогащен ураном; в участке декарбонатизации наблюдаются лишь редкие, неравномерно распределенные треки. Кристаллам пирита на детекторе соответствуют "пустые" участки. В рудных песчаниках, содержащих лишь корродированные реликты крупнокристаллического кальцита, скопления кристаллов пирита находятся в участках декарбонатизации (см. рис. 5б). В этих же участках наблюдается концентрация урана, что отражается на детекторе полями сплошного распределения треков. Реликты кальцита с явными следами коррозии в данном случае полностью безрудны (не проявлены треками на детекторе).

Уран в участках хлоритизации и гидроксидов железа

Присутствие в рудовмещающих отложениях Малиновского месторождения железистого хлорита колломорфной структуры отмечалось всеми исследователями этого объекта, однако положение его в ряду эпигенетических преобразований пород оценивается неоднозначно [Халдей и др., 2000; Кондратьева, Нестерова, 2002].

Выделения железистого колломорфного хлорита часто сопровождаются включениями порошковых гидроксидов железа, что придает им желтоватую окраску; на детекторах подобным образованиям соответствуют поля с равномерным распределением треков (см. рис. 5в). Однако уран с гётит-хлоритовыми образованиями ассоциирует не повсеместно, а лишь в пределах или на контактах урановых залежей, тогда как сами выделения хлорита развиты на площади и в разрезе гораздо шире.

Незначительная концентрация урана в скоплениях порошковых гидроксидов Fe установлена

Рис. 3. Распределение урана в углистых остатках, глинистом веществе.

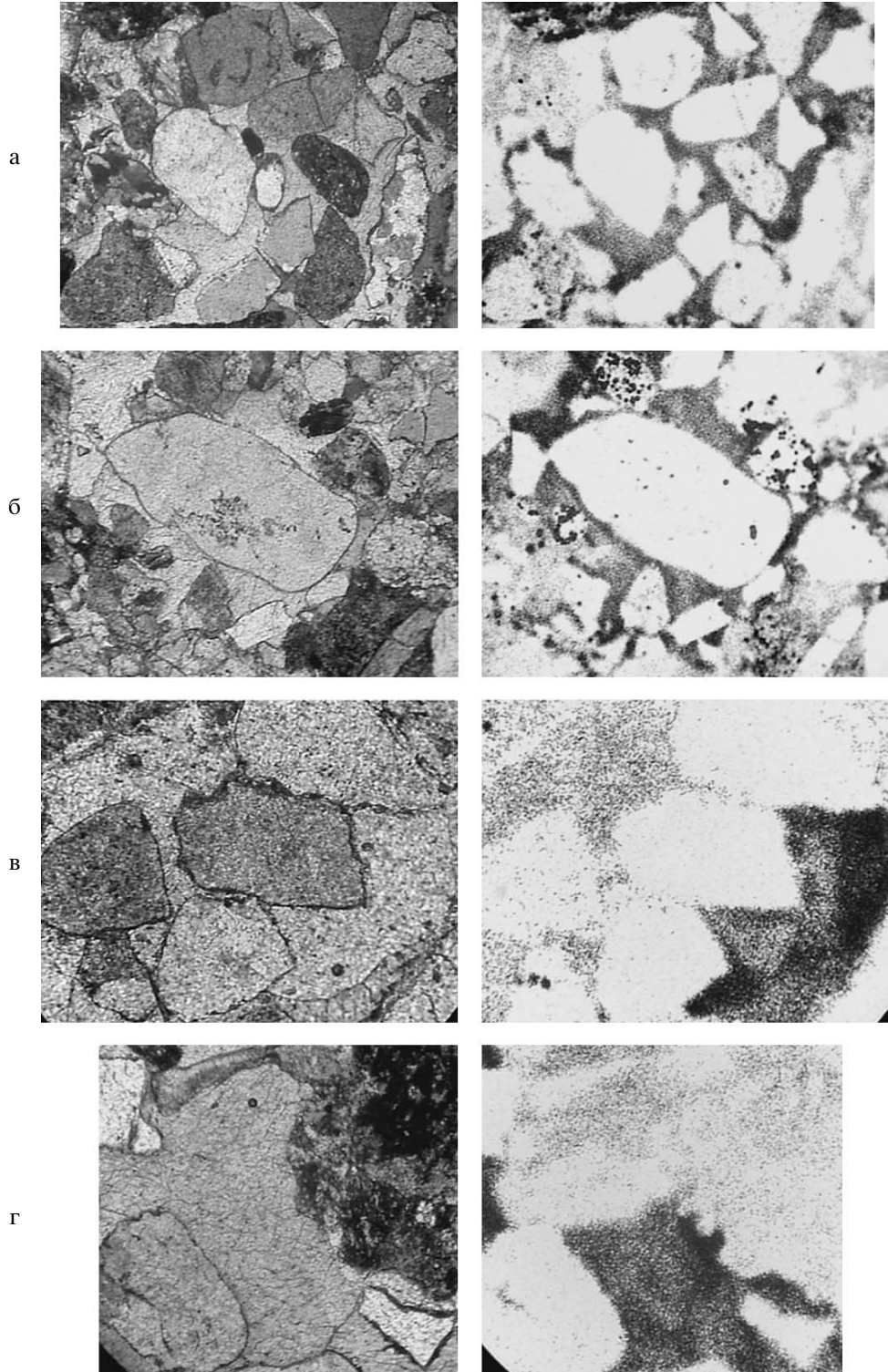
а, б, в – в проходящем, г – в отраженном свете.

а – алевролит глинистый, с углистыми остатками, с обильными очень мелкими кристаллами пирита. Сгущение треков на детекторе соответствует углистым обломкам; глинистая масса характеризуется равномерно-рассеянным распределением треков. Обр. С-88-1; увел. $\times 9$; $I = 1 \times 10^{14}$ н/см².

б – песчаник мелкозернистый, глинистый, с обильными послынными углистыми остатками (в поле шлифа их нет), с очень редкими кристаллами пирита. Глинистый цемент на детекторе характеризуется равномерно-рассеянным распределением треков; поле плотного скопления треков соответствует аморфизованному хлоритизированному обломку биотита. Обр. С-141-2; увел. $\times 9$; $I = 1 \times 10^{13}$ н/см².

в – углистый обломок в среднезернистом песчанике. Сгущение треков на детекторе по внешнему контуру и трещинам в углистом обломке. Обр. С-2-2; увел. $\times 3.7 \times 4$; $I = 1 \times 10^{13}$ н/см².

г – углистый обломок, окруженный крупнокристаллическим пиритом. Уголь на детекторе характеризуется равномерным плотным распределением треков, пирит – практически полным их отсутствием. Обр. 36-60; увел. $\times 9$; $I = 1 \times 10^{13}$ н/см².



также на контактах эпигенетически окисленных и впоследствии восстановленных глинистых пород.

Уран в участках битуминизации

Каплевидные включения черного блестящего битума (асфальтита) в отложениях Малиновской депрессии отмечались многими исследователями [Баженов и др., 1995 и др.].

В образце плотной глины зеленовато-серого цвета, который был в нашем распоряжении, выделения черного битума (асфальтита) приурочены к системе тонких ветвящихся трещин. В шлифах отчетливо видна пропитка глины вокруг трещинок бурым битумным веществом (см. рис. 5г). Непосредственно вблизи битумной пропитки наблюдаются гнездовидные скопления мелких кристалликов пирита. (Асфальтит, выполняющий трещинки, в шлифах присутствует лишь в виде очень мелких включений, тогда как основное выполнение трещин не сохранилось.) На детекторе отчетливо проявлено сгущение треков в участках пропитки глинистой породы бурым битуминозным веществом.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

При использовании метода f-радиографии характер распределения треков на детекторах дает возможность судить не только об относительном содержании урана в разных компонентах пород, но и делать заключения о формах его нахождения. Установлено, что самостоятельные минеральные фазы урана, поддающиеся диагностике оптическими и электронно-микроскопическими методами, благодаря соответствующей им плотности треков, на детекторах отражаются “дырами”, образующимися при химическом травлении лавсановых пленок. В то же время этот метод, благодаря высокой чувствительности, позволяет “видеть” уран, находящийся в состоянии рассеяния, входящий в состав других минеральных образований.

В.Т. Дубинчук с соавторами [1990] для подобного рассеянного урана предложили понятие “безминеральной” формы его нахождения, понимая под ней отсутствие оптически наблюдаемых минералов при любых увеличениях. При этом авторы имели в виду главным образом сорбированный уран. Приведенные f-радиографии свидетельствуют о чрезвычайно широком распространении такой “безминеральной” формы урана в рудоносных породах месторождения.

Так, в породах с органическими остатками уран, без признаков наличия собственной минеральной фазы, сконцентрирован в углистом веществе и в относительно меньших количествах – в глинистой массе. Помимо сорбированной формы, здесь можно предположить присутствие уран-органических соединений.

В крупнокристаллическом кальците тонкодисперсный уран распределен неравномерно, признаки присутствия самостоятельных минеральных фаз не обнаружены. Подсчет треков в четырех полях кальцита в образце С-9-1 (см. рис. 4а, б) с относительно равномерным распределением урана показал следующие его содержания: 0.03; 0.027; 0.038; 0.026%, что в среднем составляет 0.03%. Данные по Семизбайскому месторождению, где распределение урана было исследовано более детально, свидетельствуют, что уран входит в состав кальцита; содержание его колеблется в широких пределах, составляя в среднем $7 \cdot 10^{-2}\%$ [Кондратьева и др., 1995].

Ассоциация урана с порошковатыми гидроксидами железа (“гидроксидами осаждения”) не противоречит известным данным об активной сорбции урана этими образованиями. Это явление в широких масштабах проявлено на Семизбайском месторождении [Кондратьева и др., 1992, 1997; Кисляков, Щеточкин, 2000].

Самостоятельные минеральные выделения урана фиксируются в виде мелких “дыр” на лавсановых пленках, главным образом в трещинах и на поверхности обломков, практически всегда в ассоциации с пиритом. По данным, приведенным в

Рис. 4. Распределение урана в кальците.

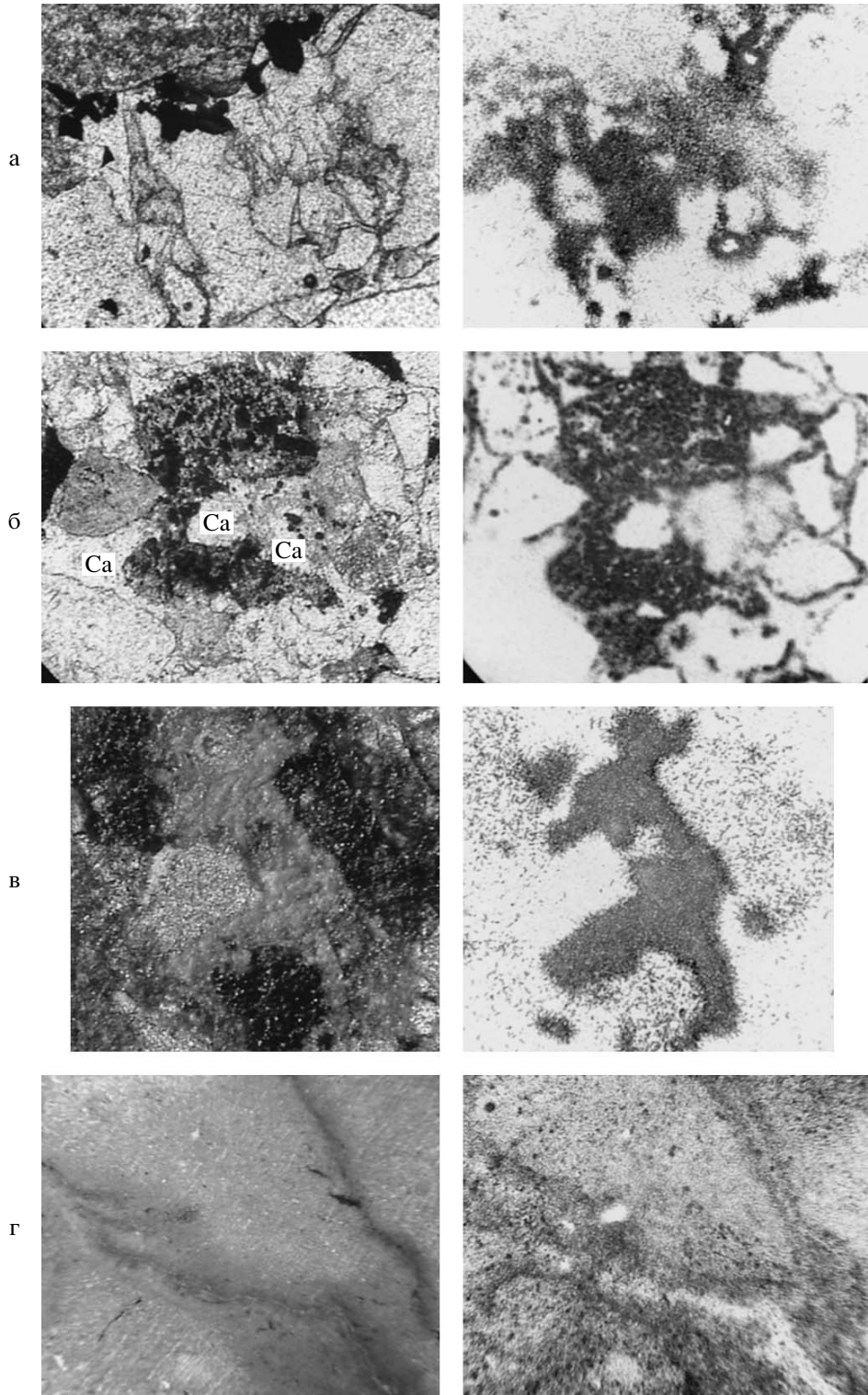
а, б – при скрещенных николях, в, г – при одном никеле.

а – песчаник среднезернистый с крупнокристаллическим кальцитовым цементом. Кальцит на детекторе характеризуется плотным равномерным распределением треков, некоторые обломки – их редкими точечными сгустками. Обр. С-9-1; увел. $\times 3.7$; $I = 1 \times 10^{14}$ н/см².

б – песчаник разномасштабный с кальцитовым цементом. Кальцит на детекторе характеризуется равномерным распределением треков; некоторые обломочные зерна – их редкими точечными сгустками. Обр. С-9-1; увел. $\times 3.7$; $I = 1 \times 10^{14}$ н/см².

в – песчаник крупнозернистый с пойкилитовым кальцитовым цементом. Выделениям кальцита на детекторе соответствуют поля с разной степенью сгущения треков – от плотного (черное поле) до равномерно-рассеянного. Концентрация треков (содержание урана) не отражается на оптических свойствах кальцита. Обр. С-10-1; увел. $\times 9$; $I = 1 \times 10^{14}$ н/см².

г – крупнокристаллический кальцит в межзерновом пространстве песчаника. Поле кальцита на детекторе характеризуется существенно различным распределением треков: одной его части соответствует весьма плотное (до сплошного) распределение, другой – рассеянное, с незначительными сгущениями. Различная ураноносность не отражается на оптических свойствах кальцита. Обр. С-9-1; увел. $\times 3.7 \times 6$; $I = 1 \times 10^{14}$ н/см².



работам [Баженов и др., 1995; Халдей и др., 2000; Винокуров и др., 2001], в рудах месторождения установлены оксиды урана, коффинит (последний преобладает), редкие находки нингиюита. Все исследователи отмечают чрезвычайную дисперсность минеральных выделений и их ассоциацию с дисульфидами железа.

В целом, можно констатировать, что в рудах Малиновского месторождения, помимо тонкодисперсной минеральной, чрезвычайно широко представлена тонкорассеянная “безминеральная” форма нахождения урана, что вообще характерно для экзогенных эпигенетических месторождений этого элемента. Следовательно, описанием только лишь минералов нельзя полностью характеризовать рудоносность таких объектов, для этого требуется определение баланса форм нахождения урана, что имеет не только генетическое значение, но должно учитываться при организации процесса подземного выщелачивания – наиболее рационального способа эксплуатации таких руд.

Второй характерной чертой уранового оруденения Малиновского месторождения, подтвержденной методом f-радиографии, является его многостадийность. При этом имеется в виду участие разновременных процессов в формировании руд, роль не только инфильтрационной стадии, определенной закономерности пространственного положения оруденения, но также влияние процессов предрудного и пострудного этапов, в целом обусловивших все особенности месторождения.

Присутствие в рудовмещающих отложениях обломков пород с характерным распределением урана (равномерным по всему объему зерен, а также с признаками его выноса) ставит вопрос о возможном существовании “доседиментогенной” формы урана. Однако отсутствие данных о закономерностях распространения таких обломков в отложениях палеодолины не позволяет считать это предположение полностью обоснованным. Во всяком случае, это не был рудообразующий процесс; уран, привносимый в обломках, мог слу-

жить лишь дополнительным источником этого элемента при последующем рудообразовании.

К наиболее ранним рудным образованиям есть основания относить те, что находятся в слабопроницаемых породах – алевролитах, мелкозернистых глинистых песчаниках, обогащенных растительным детритом и пиритом. Для них характерна концентрация урана в углистых остатках и рассеянное его распределение в глинистой массе. Принимая во внимание признаки окисления сероцветных слабопроницаемых отложений на контактах с проницаемыми песчаными горизонтами и глубокие эпигенетические изменения последних, можно считать, что именно в относительно менее проницаемых слоях сохраняется урановое оруденение, сформированное кислородными инфильтрационными водами. Роль углистого вещества как основного фактора создания восстановительного барьера для урана в данном случае очевидна. Присутствие рассеянных кристаллов пирита также может быть результатом инфильтрационных процессов; известно, что зона пиритизации (биохимического окисления органического вещества) является обязательным членом окислительной рудоконтролирующей зональности в отложениях, содержащих углефицированные растительные остатки [Гидрогенные..., 1980].

Как показано выше, в рудоносной толще месторождения присутствуют линзовидные прослои песчаников с крупнокристаллическим кальцитовым цементом, среди которого методом f-радиографии выявлен урансодержащий кальцит. Установлено также, что не весь кальцит, цементирующий песчаники, содержит уран; для ураноносных разностей характерно весьма сложное, неравномерное его распределение (см. рис. 4в, г). По данным С.Ф. Винокурова с соавторами [2001], температура образования кальцита варьирует в диапазоне от 120 до 230°C, что соответствует среднетемпературным гидротермальным растворам.

Аналогичная карбонатизация пород, но проявленная в более широком масштабе, развита на Семизбайском месторождении; изучение ее на

Рис. 5. Распределение урана в участках пиритизации, хлоритизации, битуминизации.

а, б, г – в проходящем неполяризованном свете, в – в косом свете.

а – крупнокристаллический кальцит в межзерновом пространстве песчаника и участок декарбонатизации (левый верхний угол микрофото) с выделениями кристаллов пирита по их контакту. Кальцит характеризуется интенсивным, но весьма неравномерным распределением треков на детекторе. Обр. С-9-1; увел. $\times 9$; $I = 1 \times 10^{14}$ н/см².

б – песчаник с реликтами кальцита. Темные участки в шлифе – участки декарбонатизированной породы со скоплениями кристаллов пирита. На детекторе им соответствуют плотные ступчатые скопления треков. Кальцит на детекторе треками не фиксируется. Обр. С-88-2; увел. $\times 3.7 \times 6$; $I = 1 \times 10^{13}$ н/см².

в – выделение коллоидного хлорита буровато-зеленого цвета в межзерновом пространстве песчаника. На детекторе фиксируется поле равномерного распределения треков. Обр. 36-13; увел. $\times 9 \times 4$; $I = 1 \times 10^{13}$ н/см².

г – глина плотная, мелкочешуйчатая, с тонкой ветвящейся трещиной, вокруг которой наблюдается пропитка бурым битумным веществом с редкими включениями черного блестящего битума. Сгущение треков на детекторе соответствует участкам пропитки глины битумом. обр. С-2-1; увел. $\times 2.5$; $I = 1 \times 10^{14}$ н/см².

этом детально разбуренном объекте позволило сделать определенные выводы об условиях формирования урансодержащего кальцита [Кондратьева и др., 1992, 1995; Кондратьева, Нестерова, 1997]. Установлено, что образование крупнокристаллического кальцита происходило в результате внедрения в осадочный чехол углекислых низкотемпературных гидротермальных растворов из гранитного фундамента депрессии по зонам трещиноватости. Сами растворы не были ураноносными, но под их влиянием происходило частичное растворение ранее сформированного инфильтрационными процессами оруденения и переосаждения урана с кальцитом при карбонатизации пород.

Вероятно, близкие условия существовали и на Малиновском месторождении. Так, само присутствие урансодержащего кальцита свидетельствует, что рудоносные отложения были обогащены ураном, который и послужил источником этого элемента при карбонатизации. Очевидно, это были инфильтрационные концентрации в аллювиальных осадках палеодолины, так как следов каких-либо других рудообразующих процессов, протекавших до карбонатизации пород, в них не установлено [Кондратьева, Нестерова, 2002].

Как и на Семизбайском месторождении, крупнокристаллический кальцит, цементирующий песчаники, служит надежным репером, разделяющим минеральные образования, сформированные до процесса карбонатизации и после него, наложенные на карбонатизированные породы.

По отчетливо проявленным коррозионным взаимоотношениям с кальцитом, к посткарбонатным процессам минералообразования на Малиновском месторождении относится формирование железистого хлорита, а также поздней генерации дисульфидов железа.

По данным А.Е. Халдея с соавторами [2000], хлоритизация продуктивных отложений характерна для всей изученной бурением части Малиновской палеодолины, при максимальных ее ореолах в горизонтах песчаных пород. Интенсивность хлоритизации возрастает над тектоническими нарушениями в кристаллическом фундаменте, где также выявлена хлоритовая минерализация. По результатам рентгено-структурного анализа, колломорфный хлорит отнесен к железистой разновидности – лептохлориту; установлено, что местами происходит раскристаллизация колломорфных образований. Процесс хлоритизации накладывается и на породы с урановой минерализацией, где наблюдаются колломорфные образования зеленого хлорита вокруг обломочных зерен и микрочешуйчатые его выделения по смектитовому цементу. Однако каких-либо фактов отложения или переотложения урана, связанного

с процессами хлоритизации, авторами не установлено.

В шлифах карбонатизированных песчаников отчетливо наблюдается коррозия крупнокристаллического кальцита хлоритом колломорфной структуры; о разрушении и выносе кальцита свидетельствует и тот факт, что в интенсивно хлоритизированных песчаниках присутствуют лишь его мелкие реликты [Кондратьева, Нестерова, 2002].

Колломорфный хлорит часто ассоциирует с порошковатыми ржаво-желтыми гидроксидами железа, которые концентрируются на контактах слоев, вокруг реликтов растительных остатков; микроскопически мелкие включения гидроксидов железа иногда придают колломорфным выделениям хлорита бурый оттенок. Методом f-радиографии в таких гётит-хлоритовых образованиях установлена концентрация урана (см. рис. 5в), что согласуется с повышенными содержаниями этого элемента ($n \times 10^{-3}$ – $10^{-2}\%$) в хлоритизированных песчаниках вблизи контактов с сероцветными рудоносными породами.

Обращает на себя внимание сходство хлоритовой минерализации Малиновского месторождения со “второй минеральной ассоциацией” гидротермальной стадии пострудных преобразований Семизбая, которая выражена колломорфными выделениями переменного состава, где чередуются концентры, сложенные железистым хлоритом, нонтронитом и гётитом. Эта ассоциация имеет четкие коррозионные взаимоотношения с крупнокристаллическим кальцитом, в гранитном основании депрессии образует тонкие прожилки, пересекающие прожилки кальцита. Формирование ее связано с внедрением в осадочный чехол высокожелезистых бессероводородных (глеевых) слабокислых вод из фундамента депрессии [Кондратьева и др., 1992; Кондратьева, Нестерова, 1997].

Сонахождение порошковатых гидроксидов железа с колломорфным хлоритом на Малиновском месторождении, по нашему мнению, также не связано с окислением последнего, а является результатом осаждения гидроксидов железа из тех же высокожелезистых глеевых растворов, что привели к образованию хлорита; подобные гидроксиды не являются признаком окислительных (инфильтрационных) процессов. В целом очевидно, что хлоритизация песчаных пород Малиновского месторождения происходила позднее процессов инфильтрационного рудообразования и карбонатизации; с ней не связан привнос урана, но высокожелезистые растворы, поступавшие из фундамента депрессии, могли приводить к его локальному перераспределению вблизи ранее образованных рудных залежей.

В рудоносных породах Малиновского месторождения дисульфиды Fe развиты весьма широко, причем есть все основания считать, что процессы их образования были проявлены неоднократно. Вопрос о диагенетических сульфидах, существование которых предполагается в работе А.Е. Халдея с соавторами, на имеющемся в нашем распоряжении материале не может быть решен.

Среди более поздних образований пирита намечаются две генерации, относящиеся к двум разным стадиям эпигенетических процессов. К первой генерации относятся выделения пирита, встречающиеся в виде вкрапленности отдельных кристаллов в глинистой массе слабопроницаемых урансодержащих пород с углефицированными растительными остатками (см. рис. 3а). Как отмечено выше, по их положению в слабопроницаемых слоях, часто имеющих признаки окисления (лимонитизации) на контактах с водоносными горизонтами, есть основание отнести их к инфильтрационной стадии.

Вторая (поздняя) эпигенетическая генерация дисульфидов железа проявлена весьма отчетливо; ее положение в последовательности преобразований определяется соотношением с карбонатизированными породами. Так, на рис. 5а виден контакт между крупнокристаллическим кальцитом и участком декарбонатизации (выноса кальцита), вдоль которого развиты кристаллы пирита, корродирующие кальцит. Посткарбонатный характер пирита в данном случае очевиден. В песчаниках с реликтами кальцита скопления пирита наблюдаются в участках его выноса (см. рис. 5б). К этой же генерации, по-видимому, относится пирит, нарастающий на урансодержащий углистый обломок, тонкорассеянная минерализация в котором связана с инфильтрационными процессами (см. рис. 3г). Вероятно, к этой же генерации относится тонкокристаллический пирит, проникающий в обломочные зерна. Как показано выше, с поздней генерацией пирита может ассоциировать уран (см. рис. 5б), но явление это носит сложный характер, проявлено не всегда и не повсеместно.

Концентрации урана, ассоциирующие с поздней генерацией пирита, не выходят за общие контуры рудоносных пород палеодолины, т.е. источником урана при их формировании, очевидно, послужили более ранние его скопления в тех же отложениях; привнос урана извне в этих условиях не представляется вероятным. Характерно, что на Семизбайском месторождении отчетливо выделяется генерация пирита, накладывающаяся на карбонатизированные породы и корродирующая крупнокристаллический кальцит. С этой генерацией в определенных условиях также ассоциирует уран [Кондратьева и др., 1992; Кондратьева, Нестерова, 1997].

При выяснении причин появления поздней генерации дисульфидов Fe необходимо учитывать одну особенность отложений Малиновской депрессии, а именно – присутствие в них битумов. Действительно, редкие каплевидные включения битумов в песчаных пластах отмечают все исследователи; следует также принимать во внимание факт проникновения битумов в глинистую кровлю песчаного пласта по системе тонких трещинок (см. рис. 5г). Очевидно, в последнем случае мы наблюдаем реликты жидких битуминозных веществ, некогда мигрировавших по контактирующему с глиной песчаному пласту.

Известно, что в водоносных горизонтах битумы подвергаются биохимическому окислению сульфатами подземных вод с генерацией таких газов, как CO_2 , H_2S . Образующиеся при этом сульфиды “замещают” битумы в водоносных горизонтах, тогда как в слабопроницаемых разностях их реликты могут сохраняться; подобная закономерность установлена на инфильтрационных урановых месторождениях в нефтеносных отложениях – карбонатных породах Северной Ферганы, а также терригенных меловых юга Кызылкумской провинции [Холодов и др., 1961; Гидрогенные ..., 1980; Пеньков и др., 1982 и др.]. Это дает основание предполагать, что источником сероводорода при формировании сульфидов поздней генерации на Малиновском месторождении мог быть процесс биохимического окисления битумов, проникавших в отложения палеодолины из Западно-Сибирской нефтегазовой провинции. Напомним, что рудовмещающие отложения депрессии (J_3 - K_1) являются стратиграфическим аналогом баженовской свиты – одной из основных продуктивных свит этой провинции.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование метода f-радиографии при изучении рудоносных пород Малиновского месторождения позволило выявить некоторые особенности уранового оруденения этого объекта.

Установлено, что помимо тонкодисперсных минеральных выделений урана в породах присутствует его рассеянная, “безминеральная”, форма: уран может быть связан с углистым веществом, глинистыми минералами, кальцитом, гидроксидами железа. Присутствие такого урана ставит вопрос о необходимости при характеристике руд подобных объектов учитывать не только минеральные, но и все другие формы его нахождения, что важно как для генетических выводов, так и при постановке работ по подземному выщелачиванию руд.

Другой особенностью Малиновского месторождения является то, что в формировании состава руд принимали участие процессы, относящиеся

к разным стадиям формирования и преобразования рудоносных отложений. Основные закономерности локализации руд в аллювиальных отложениях палеодолины, как и прямые признаки окислительных преобразований, на наш взгляд, подтверждают представления исследователей о принадлежности этого объекта к типу древних инфильтрационных месторождений [Баженов и др., 1995; Долгушин и др., 1995; Рубинов и др., 2000; Халдей и др., 2000; Кондратьева, Нестерова, 2002]. С этих позиций основной рудообразующей стадией является инфильтрационная; по отношению к ней могут быть выделены предрудные и пострудные процессы и минеральные образования.

Последовательность и вещественное выражение эпигенетических процессов образования и преобразования руд Малиновского месторождения аналогичны установленным и изученным на Семизбайском месторождении, что, помимо сходных геологических условий, дает основание объединить эти объекты в "Семизбайский" подтип мезозойских инфильтрационных месторождений Западной Сибири.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баженов М.И., Машиковцев Г.А., Расулова С.Д., Тарханова Г.А., Халдей А.Е.* Литолого-геохимические условия локализации уран-полиэлементного оруденения на Малиновском месторождении // *Материалы по геологии урана, редких и редкоземельных металлов.* Вып. 137. М.: ВИМС, 1995. С. 46–61.
- Берзина И.Г., Берман И.Б., Гурвич М.Ю., Флеров Г.Н., Шимелевич Ю.С.* Определение концентрации урана и его пространственного распределения в минералах и горных породах // *Атомная энергия.* 1967. Т. 23. № 6.
- Винокуров С.Ф., Дойникова О.А., Крылова Т.Л., Меньшиков В.В., Нестерова М.В., Рыжов Б.И., Сысов А.Н.* Литолого-геохимические и минералогические особенности Малиновского месторождения урана (Россия) // *Геология рудных месторождений.* 2001. Т. 43. № 5. С. 414–429.
- Гидрогенные месторождения урана. Основы теории образования. М.: Атомиздат, 1980. 270 с.
- Долгушин Л.С., Баженов М.И., Рубинов И.М., Задорин Л.И.* Малиновское месторождение урана // *Отчеты геология.* 1995. № 9. С. 39–42.
- Дубинчук В.Т., Коченов А.В., Ружицкий В.В., Мещанина В.И.* Формы выделений урановой минерализации экзогенного эпигенетического оруденения в осадочных породах по данным электронно-микроскопического изучения // *Литология и полез. ископаемые.* 1990. № 3. С. 65–72.
- Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н.* Гидрогенное рудообразование. М.: Геоинформмарк, 2000. 610 с.
- Кондратьева И.А., Боброва Л.Л., Нестерова М.В.* Роль пострудных процессов в преобразовании древнего инфильтрационного уранового месторождения // *Литология и полез. ископаемые.* 1992. № 1. С. 70–90.
- Кондратьева И.А., Максимова И.Г., Дойникова О.И.* Условия образования ураносодержащего кальцита в рудовмещающих отложениях месторождения Семизбай (Казахстан) // *Геология рудных месторождений.* 1995. Т. 37. № 1. С. 89–96.
- Кондратьева И.А., Нестерова М.В.* Литолого-геохимические особенности урановых месторождений в мезозойских речных палеодолинах // *Литология и полез. ископаемые.* 1997. № 6. С. 577–594.
- Кондратьева И.А., Нестерова М.В.* Инфильтрационные урановые месторождения в мезозойских речных палеодолинах Западной Сибири // *Уран на рубеже веков: природные ресурсы, производство, потребление.* Тр. Международного симпозиума по геологии урана. М.: ВИМС, 2002. С. 144–159.
- Методы изучения урановых месторождений в осадочных и метаморфических толщах. М.: Недра, 1985. 322 с.
- Пеньков В.Ф., Кондратьева И.А., Шмариович Е.М. и др.* Ураноносные битумы на месторождении, связанном с зонами пластового окисления // *Литология и полез. ископаемые.* 1982. № 2. С. 70–84.
- Рубинов И.М., Баженов М.И., Удовик В.В., Бреднихин И.Ф.* Малиновское месторождение урана Западно-Сибирского урановорудного пояса // *Уран на рубеже веков: природные ресурсы, производство, потребление.* Международный симпозиум по геологии урана. Тезисы докладов. М.: ВИМС, 2000. С. 60–61.
- Флеров Г.Н., Берзина И.Г.* Радиография минералов горных пород и руд. М.: Атомиздат, 1979. 222 с.
- Халдей А.Е., Тарханова Г.А., Расулова С.Д., Коченов А.В., Дубинчук В.Т., Баженов М.И.* О последовательности формирования эпигенетических изменений и урановой минерализации на Малиновском месторождении // *Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов.* Вып. 142. М.: ВИМС, 2000. С. 172–192.
- Холодов В.Н., Лисицин А.К., Комарова Г.В., Кондратьева И.А.* Об эпигенетической зональности уранового оруденения в нефтеносных карбонатных породах // *Изв. АН СССР. Сер. геол.* 1961. № 11. С. 50–63.