

НОВЫЕ АСПЕКТЫ ФОРМИРОВАНИЯ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПЕСЧАНИКОВОГО ТИПА

На основе пересмотра и анализа обширной, в том числе новейшей информации по урановым провинциям мира с использованием палеореконокструкций уточняются закономерности локализации и формирования месторождений песчаникового типа. В дополнение к известным и ставшим классическими закономерностям предлагаются новые представления: а) о кольцевом размещении редокс-фронтов с пластово-ролловыми рудными залежами в артезианских бассейнах; б) о связи палеодолинных залежей с региональными палеорифтовыми зонами; в) о роли разломов в размещении месторождений, в том числе в обрамлении нефтегазоносных областей; г) о трансформации урановых концентраций в надинтрузивных метасоматических ореолах (метапесчаниковый тип). Прогнозируются крупные урановые месторождения в южном обрамлении Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции.

Ключевые слова: купола, рифты, бассейны, редокс-фронты, роллы, палеодолины, прогнозы.

Patterns of localization and formation of sandstone-type deposits are specified on the basis of revision and analysis of extensive information, including the latest one, on world uranium provinces using paleoreconstructions. In addition to well-known classic patterns, new conceptions are proposed concerning: a) ring localization of redox fronts with stratal-rolled ore deposits in artesian basins; b) the relationship of paleovalley deposits to regional paleorift zones; c) the role of faults in emplacement of ore deposits including those in oil-and-gas field frames; d) the transformation of uranium concentrations in superintrusive metasomatic halos (metasandstone type). Large uranium deposits are expected in the southern periphery of the West Siberian oil-and-gas province.

Keywords: domes, rifts, basins, redox fronts, rolls, paleovalleys, forecasts.

Согласно классификации геолого-промышленных типов урановых месторождений Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), песчаниковый тип объединяет стратиформные месторождения, в которых урановая минерализация совместно с рядом сопутствующих элементов (\pm TR, Mo, Re, Se, V) размещается в слабо- и нелитифицированных отложениях мезозойско-кайнозойских осадочных бассейнов (впадин) в чехлах древних и молодых платформ [18].

Песчаниковый тип урановых месторождений относится к классу экзогенных эпигенетических (гидрогенных). Несмотря на преимущественно низкие содержания урана в рудах, песчаниковый тип месторождений сегодня считается наиболее продуктивным, а благодаря возможности применения способа скважинного подземного выщелачивания (СПВ) также и наиболее рентабельным. В мировом масштабе суммарные ресурсы песчаникового типа могут превышать 2,5 млн т урана. По данным МАГАТЭ за 2010–2011 гг., добыча урана из месторождений этого типа в мировом балансе составляла до 53%, что более чем вдвое превышало объём добычи из гигантских месторождений типа несогласия с богатыми рудами [5].

Рудные провинции и районы с месторождениями песчаникового типа известны на всех обитаемых континентах мира. К ним принадлежат рудные территории, в которых стратиформные концентрации урана в песчаниках относятся либо к ведущему, либо к единственному промышленному типу месторождений. Наиболее известные рудные территории такого рода — провинции Плато Колорадо, Вайоминга и Южного Техаса в США, рудные

районы Прикордильерского и Приандийского рудных поясов, районы в пределах Центрально-Французского и Чешского массивов Средней Европы, Внутренних Карпат Южной Европы, провинции Притяньшанья в Средней Азии, районы Забайкалья, Монголии и Северого Китая, Мали-Нигерская провинция Северной Африки, провинция Фром на юге Австралии [1, 4, 6, 9–16].

В истории Земли наиболее ранними гидрогенными месторождениями в песчаниках считаются урановые месторождения в С–Р молассовых впадинах, ассоциирующих с ареалами угленакопления и наземного вулканизма. К ним относятся впадины Сен-Пьер, Эро, Фрайталь и Внутрисудетская в Средней Европе, впадины Гемерид и Баната в Карпатах, впадина Парадокс (Катлер) на Плато Колорадо, впадина Тим-Мерсуа в ахагарской части Сахары, бассейн Карру (Кейп) на юго-востоке Африки и впадины района Сьерра-Пинтада в Южной Америке. Отнесение некоторыми исследователями к гидрогенным урановым месторождениям в докембрийских песчаниках провинции Франсвилль является весьма сомнительным из-за размещения их вблизи поверхности структурно-стратиграфического несогласия и значительной региональной литификации отложений [8].

Песчаниковый тип урановых месторождений включает два подтипа: с пластово-ролловыми и палеодолинными рудными залежами (вайомингско-сарысуйский и далматовско-витимский подтипы), которые сформированы в условиях напорных пластовых (артезианских) или безнапорных грунтовых инфильтрационных гидродинамических систем. Кроме того, тип объединяет две разновидности по

первичной окраске рудовмещающих отложений: в красноватых (колорадская) и сероватых (вайомингская) [1, 4, 6, 7, 10–16]. Выявлен целый ряд важнейших закономерностей размещения и формирования уранового оруденения, которые уже стали классическими и успешно используются при прогнозировании и поисках.

Основные закономерности для пластово-роллового (вайомингско-сарысуйского) подтипа: а) приуроченность стратиформных рудных залежей в контрастных по проницаемости преимущественно мезозойско-кайнозойских отложениях к выклиниванию зон пластового окисления (ЗПО) на восстановительных геохимических барьерах (редокс-фронтах); б) поперечное положение региональных редокс-фронтов относительно генерального продольного направления движения инфильтрационных кислородсодержащих ураноносных подземных вод от областей питания к областям разгрузки; в) смещение редокс-фронтов вниз по разрезу впадин по мере удаления от областей питания подземных вод; г) линзовидно-пластовая и пластово-ролловая форма рудных залежей на выклинивании ЗПО с проявлением латеральной геохимической зональности в размещении элементов-спутников урана (Мо, Re, Se); д) резкое повышение содержания урана в рудах и масштабов месторождений в ареалах — очагах наложения флюидно-экспилтрационного восстановительного глеевого эпигенеза.

Более углубленный анализ условий локализации уранового оруденения с применением палеореконокструкций (тектонических, гидродинамических и др.) для предрудных, рудогенных и пострудных эпох позволил отчасти пересмотреть и дополнить эти закономерности для некоторых обширных рудных территорий. К таким территориям в первую очередь относятся урановые провинции, приуроченные к крупным субороженным впадинам — осадочным бассейнам артезианского типа, которые полностью (Плато Колорадо) или частично (Притяньшань, Вайоминг) перекрывают древнейшие купольные структуры основания древних и молодых платформ [2, 3]. В частности, для таких провинций сделаны выводы о существовании не только линейно-дуговых, но и кольцевых (замкнутых и полузамкнутых) региональных рудоконтролирующих редокс-фронтов, субпараллельных периметрам бассейнов. Рудоносные фрагменты таких редокс-фронтов протяженностью в сотни и первые тысячи километров выделяются в качестве минеральных поясов в провинции Плато Колорадо и металлогенических зон или рудных поясов в Притяньшань. Гео- и гидродинамическая история формирования указанных двух эталонных урановых провинций, приуроченных к субороженным окраинам платформ различного возраста, может быть представлена следующим образом.

1. *Территория урановой провинции Плато Колорадо* в структурах ларамийских Скалистых гор на западной окраине Северо-Американской древней платформы имеет гетерогенную блоковую структуру. Она представляет собой мозаику бассейнов (грабенов), хребтов (горстов) и ареалов монзонитовых лакколитов. В ней хаотично разбросаны различно ориентированные урановорудные минеральные пояса, приуроченные к различным горизонтам разреза от перми до верхов юры [8, 9, 16]. Заполнение межгорного осадочного бассейна Плато Колорадо площадью около 400 тыс. км² происходило в ре-

зультате длительного проседания кровли древнего купола основания с накоплением преимущественно красноцветно-пестроцветной терригенной толщи Р–К₁ мощностью до 1,5–2,5 км. В раннеларамийскую эпоху начавшееся воздымание горного обрамления осадочного бассейна стимулировало центростремительное движение кислородсодержащих подземных вод по проницаемым горизонтам к внутренней области разгрузки вблизи оз. Бленден в горах Абахо. Главными дренирующими системами являлись унаследованные направления компенсационной четырехлучевой делимости кровли купола основания (рис. 1).

Благодаря обилию разнообразных потенциальных источников урана в структурах обрамления артезианского бассейна (от черных сланцев серии Айдахо-Спрингс до урановых месторождений в щелочных метасоматитах типа Фронт-Рейндж) подземные воды были скорее всего высокоураноносными. Инфильтрация кислородных вод по проницаемым горизонтам первично-окисленных красноцветных песчаников (Т₃ формация Чинл, J₃ формация Моррисон и др.) в принципе не могла привести к формированию редокс-фронтов и гидrogenных урановых концентраций. Однако, по мнению американских исследователей [16], это произошло в результате захвата подземными водами газообразных и газово-жидких восстановителей из разрушающихся скоплений углефицированных рас-

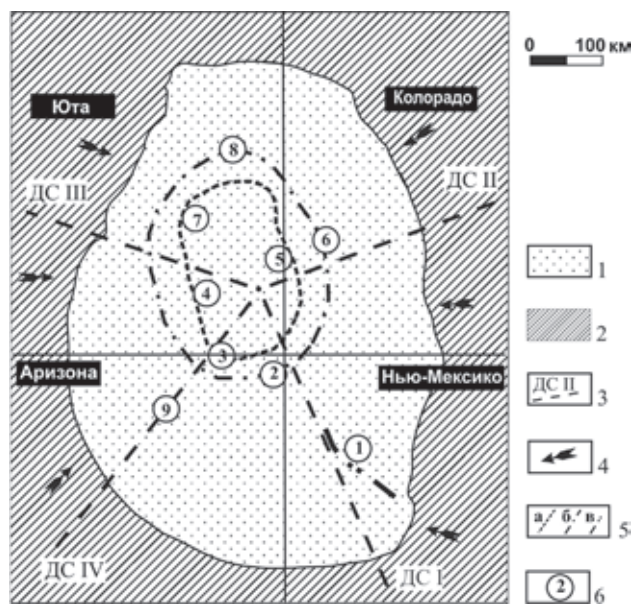


Рис. 1. Схема размещения гидрогенных урановых месторождений и минеральных поясов в пределах артезианского бассейна Плато Колорадо. Палеореконокструкция для раннеларамийской эпохи рудогенеза

1 — артезианский бассейн Плато Колорадо (пермь — ранний мел); 2 — низкогорное обрамление плато (область питания подземных вод); 3 — главные дренирующие системы (ДС) бассейна (вдоль трех- и четырехлучевой системы унаследованных дислокаций): ДС I — Грантс, ДС II — Ураван, ДС III — Парадокс, ДС IV — Камерон; 4 — основной поток О₂-вод вдоль протоавлакогена Плато Колорадо и поперечного порфириового пояса Скалистых гор; 5 — рудоконтролирующие региональные геохимические барьеры (редокс-фронты): а — нижний кольцевой, б — верхний кольцевой, в — большой линейный; 6 — минеральные пояса: 1 — Грантс, 2 — Люкачукай, 3 — Моньюмент-Вэлли, 4 — Уайт-Каньон, 5 — Лисбон-Вэлли, 6 — Ураванский, 7 — Темпл-Маунтин (Моаб), 8 — Сан-Рафаэль Ривер, Томпсон, 9 — Камерон

тительных остатков в русловых овражных врезях базальных частей песчаных формаций. Эти флюиды, вероятно, двигались во главе потоков кислородных подземных вод, создавая на их пути восстановительные геохимические барьеры.

Реконструкция положения минеральных поясов на разных уровнях разреза артезианского бассейна Плато Колорадо позволила восстановить гидродинамическую картину раннеларамийской рудогенной эпохи, в которую были сформированы два главных кольцевых региональных редокс-фронта: верхний в отложениях позднеюрской формации Моррисон и нижний в отложениях триасовой формации Чинл и её врез в отложения подстилающей пермской формации Катлер (рис. 1). При этом проявляется закономерное снижение стратиграфического положения редокс-фронтов по мере приближения к области разгрузки подземных вод в центре бассейна. В последующую наиболее активную тектоно-магматическую стадию ларамийского орогенеза с формированием Скалистых гор и высокого плато Колорадо структура мезозойского артезианского бассейна была радикально трансформирована, а урановое рудообразование прекратилось. За пределами Плато Колорадо, в соседней к северо-востоку провинции Вайоминг, которая не была захвачена активным ларамийским орогенезом, классические гидрогенные пластово-ролловые месторождения формировались позднее, в кайнозое. Рудообразование там происходило в обособленных артезианских бассейнах второго порядка (Паудер-Ривер, Шерли-Бейсин и др.), но также с элементами концентрически-зонального размещения редокс-фронтов и приуроченных к ним минеральных поясов.

На фоне общего единообразия строения, как правило, небольших рудных залежей (роллы) с низкими и рядовыми содержаниями урана и типового вещественного состава руд ($U \pm Cu, Mo, V$) в пределах провинции Плато Колорадо с суммарными ресурсами порядка 300 тыс. т резко выделяется урано-битумное оруденение минерального пояса Грантс. Ресурсы месторождений этого пояса (наиболее крупное из них Амброзия-Лейк с запасами около 120 тыс. т) оцениваются в 700 тыс. т при рудовых и высоких содержаниях урана [9, 11].

В свете перманентной дискуссии об источниках битумов в первичных (досбросовых) рудных залежах уникального пояса Грантс в качестве одного из основных предлагается вариант кладбища динозавров. О вероятности такого источника свидетельствуют огромные скопления окремнелых фоссилизированных скелетов этих гигантских травоядных рептилий и фрагментов древесины в бентонитовых пепловых глинах формации Браши-Бейсин мощностью до 200 м, которая перекрывает рудоносные песчаники свиты Солт-Уош (формация Моррисон) [8, 9]. Массовая гибель этих гигантских животных, погребенных в толще вулканического пепла, вероятнее всего, была связана с катастрофическим эксплозивным (пелейским) извержением многочисленных вулканов, наиболее активно действовавших в конце юры в южном горном обрамлении Плато Колорадо. Этот локально-апокалиптический сценарий (à la Pompeii) не исключает участия в формировании пояса Грантс также и углеводородных ресурсов пермской формации Катлер. Первичная связь урана с углеродистым веществом животного и растительного происхождения была нарушена в эпоху гидротермальной регенерации урано-би-

тумных руд и образования столбообразных залежей постсбросовых ванадий-урановых руд. В этом случае ванадий служит свидетельством былого существования ураноносных битумов в рудоносных песчаниках. Присутствие следов ванадия в составе урановых руд других минеральных поясов подтверждает значительную роль органического вещества (углеводородов, битумов-асфальтитов) в формировании месторождений песчаникового типа среди красноцветов провинции Плато Колорадо в целом.

Теоретически прямым аналогом мегапровинции североамериканских Скалистых гор, объединяющей урановые провинции Плато Колорадо и Вайоминг, может быть Лут-Белуджистанский (Ирано-Афганский) срединный массив – надкупольный мезозойско-кайнозойский артезианский бассейн, обрамленный киммерийско-альпийскими горными сооружениями Парапамиза-Гиндукуша и Гималаев [3].

II. *Территория Притяньшаньской урановой мегапровинции* охватывает суборогенную окраину молодой Туранской плиты, где ураноносные предгорные впадины цепочкой располагаются у подножия Западного Тянь-Шаня. Отдельные впадины, разделяемые продольными N–Q поднятиями, выделяются в качестве самостоятельных рудных провинций (Чу-Сарьсуйской, Сырдарьинской, Центрально-Кызылкумской). Впадины выполнены сероцветными и пестроцветными контрастными по проницаемости отложениями плитного комплекса мела – палеогена мощностью до 400 м, которые перекрывают плащом красноцветных неоген-четвертичных молассоидов [4, 6, 10, 12, 15].

Анализ размещения рудоконтролирующих редокс-фронтов в рамках Чу-Сарьсуйской и Сырдарьинской провинций показывает, что ураноносной является обширная Сузакская мульда, объединяющая соседние части впадин в единый артезианский бассейн в докаратауское время с ресурсами урана более 1,5 млн т (рис. 2). Рудоносные редокс-фронты почти замкнутым контуром полигонально-эллиптической формы как бы повторяют очертания Сузакского артезианского бассейна с преобладающим радиально-центростремительным движением подземных вод к внутренней зоне разгрузки (Шолак-Эспе – Кокшетауская зона). Извилисто-зубчатая в плане конфигурация редокс-фронтов и приуроченных к ним рудных поясов (рис. 3) скорее всего свидетельствует о меняющемся тренде потоков рудоформирующих подземных вод на различных уровнях разреза с формированием прямых и обратных роллов при многоярусности оруденения.

Особенности размещения редокс-фронтов и соответствующих рудных поясов в пределах артезианского Сузакского бассейна указывают на существование внутренней области (зоны) разгрузки подземных вод (наряду с внешней, аральской); важную роль скрытых крутопадающих разломно-трещинных зон по периметру мульды, участвующих в распределении потоков подземных вод по проницаемым горизонтам разреза; на существование обрамляющих мульду обнаженных на поверхности (вулканы, черные сланцы и урановые месторождения Прибалхашья, Чаткало-Кураминского и Кураминско-Тамдыгауского ареалов) и скрытых поднятий основания бассейна. Эти особенности позволяют составить новую модель рудоформирующей гидродинамической системы Сузакского артезианского бассейна.

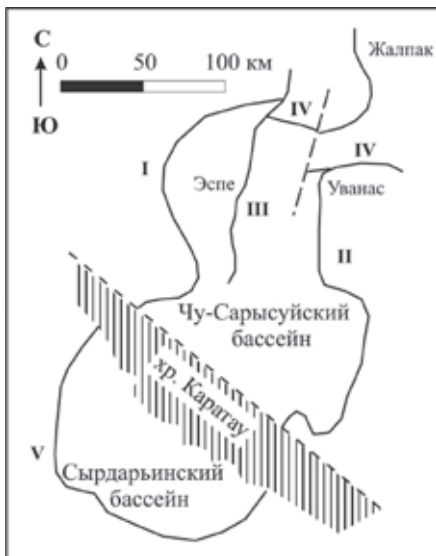


Рис. 2. Положение региональных рудоконтролирующих редокс-фронтов и соответствующих металлогенических зон в Сузакском артезианском бассейне Притяньшанья (Чу-Сарысу́йская и Сырда́рынская урановорудные провинции)

Металлогенические зоны (региональные редокс-фронты): I – Инкай-Мынкудукская, II – Канжуган-Моинкумская, III – Эспе-Кокшетауская, IV – Акдала-Уванаская, V – Карамурунская



Рис. 3. Урановорудные залежи Инкай-Мынкудукского рудного пояса [12]

Артезианские бассейны второго порядка, подобные разделенным выступами докембрийского основания ураноносным бассейнам провинции Вайоминг, характерны для блоковой структуры Центрально-Кызылкумской урановой провинции Притяньшанья. Например, Бешбулакская мульда с крупными месторождениями Учкудук и Сугралы представляет собой артезианский бассейн типа Сузакского. Бассейн обрамлен выступами черносланцевого основания в малоамплитудных поднятиях Букантау, Ауминзатау, Тамдытау и характери-

зуется дугowymi и кольцевыми редокс-фронтами с несомненной важной ролью разломов в распределении рудоформирующих потоков подземных вод [6, 12].

Существенным отличием урановых месторождений учкудукского типа [6] от других урановых объектов Притяньшанья является участие эксфильтрационных углеводородов в формировании гидрогенных урановых и битумно-урановых руд, что значительно повышало степень концентрации урана в рудных залежах и масштабы отдельных месторождений. В качестве объяснения этого феномена априори приводится сближенность Центрально-Кызылкумской урановой провинции с Бухаро-Хивинской нефтегазоносной областью. Значение такого соседства для формирования гидрогенного уранового оруденения, в том числе роли разломов и источников эксфильтрационных восстановителей, может быть рассмотрено на примере провинции Южного Техаса в качестве третьей эталонной рудной территории.

III. *Территория урановой провинции Южного Техаса* или провинции Прибрежной равнины размещается в пределах плиты молодой платформы в непосредственной близости к одной из крупнейших нефтегазоносных областей – провинции Мексиканского залива с главными залежами углеводородов в отложениях миоцена. Рудовмещающей в пределах ураноносной территории является контрастная по проницаемости пестроцветная терригенная толща третичного возраста (эоцен – плиоцен), перекрывающая мезозойский существенно карбонатный плотик. Эта толща мощностью в несколько сотен метров слагает региональную слабоволнистую моноклиаль протяженностью около 400 км, полого склоняющуюся в направлении Мексиканского залива. Ведущей структурой моноклинали является система крутопадающих дугообразных разломов, которые трансформируются субпараллельно тектоническому ограничению нефтегазоносной области Мексиканского залива.

Согласно представлениям американских исследователей [16], каждый из трёх главных разломов этой системы играл свою определенную роль в процессе гидрогенного уранового рудообразования в вайомингскую (N–Q) эпоху аридизации климата. Гидродинамическая обстановка этой эпохи в южной части североамериканского континента представляется следующей. Пластовые кислородные воды, обогащающиеся ураном по пути транзита, направлялись вдоль вулканических и фосфорит-черносланцевых горно-складчатых сооружений Кордильер и Аппалачей на юг континента, где как в воронку сливались в мезозойско-кайнозойскую тафрогенную надкупольную зону Мексиканского залива. Часть этих вод примерно в 250 км от залива погружалась по зоне разломов Бальконес (Balcones Fault Zone) и формировала нисходящие потоки ураноносных подземных вод вдоль проницаемых горизонтов терригенной толщи. В свою очередь Краевой пограничный разлом области Мексиканского залива служил основным поставщиком восходящих потоков газообразных и газовой-жидких флюидов в проницаемые горизонты третичного разреза. Эти встречные и различно специализированные потоки подземных вод контактировали в широкой (15–25 км) зоне глубинного разлома Эдвардс (Deer Edwards Fault Zone), где формировали региональный геохимический барьер. Этот



Рис. 4. Генерализованная геологическая карта прибрежной равнины Южного Техаса с размещением урановорудных районов [15]

Районы с месторождениями урана в отложениях формаций: 1 – голиад (плиоцен), 2 – оаквилль (миоцен), 3 – катахоула (олигоцен), 4 – джексон (верхний эоцен). Породы месторождений урана: 5 – породы голоцена и плейстоцена; 6 – свита голиад (плейстоцен); 7 – песчаники Оаквилль и свита флеминг (миоцен); 8 – свита катахоула (олигоцен); 9 – глины фрио (олигоцен?); 10 – группа джексон (верхний эоцен); 11 – породы свиты джексон (эоцен, палеоцен, верхний мел). Главные тектонические нарушения: I – граница нефтегазоносного бассейна Мексиканского залива; II – зона разломов Бальконес; III – зона разломов Эдвардс, контролирующая положение уранового минерального пояса Южного Техаса

барьер контролировал размещение многоярусного стратиформного пластово-роллового уранового оруденения минерального пояса Южного Техаса протяженностью 450 км с общими ресурсами урана около 200 тыс. т. Характерно, что в рядовых по содержаниям урана рудах этого пояса отмечаются лишь следы битумов, что, вероятно, связано с пре-

обладающим газовым составом восходящих потоков восстановителей (рис. 4).

Сходная с техасской ситуация соседства с нефтегазоносной областью отмечается также для Мали-Нигерской провинции североафриканской Сахары [17]. Пластово-ролловые месторождения в слаболигифицированных отложениях верхнего Р–J₃ рудного

этажа в пределах синеклизы Тим-Мерсуа обладают крупными масштабами при низких и рядовых рудах: например ресурсы месторождения Имоураен (в J_3) 140 тыс. т, а месторождения Азелик (в Р–Т) 100 тыс. т [12]. В отличие от них крупные первично-водородные пластово-ролловые урановые месторождения нижнего рудного этажа (Акаута и Арли) залегают в значительно литифицированных отложениях каменноугольного возраста. Эти руды, как будет показано далее, скорее всего испытали воздействие ларамийского магматизма, представленного гранитами айрского комплекса.

IV. Территория Западной Сибири. Особенности формирования и размещения водородного уранового оруденения в чехлах молодых и некоторых древних платформ, установленные на примерах провинций Центральных Кызылкумов, Южного Техаса и Северной Африки, могут быть использованы при прогнозировании пластово-ролловых месторождений песчаникового типа в Западной Сибири. Эти месторождения следует ожидать в связи с системами субширотных дугообразных разломов на территории южного обрамления нефтегазонасыщенной провинции, причем на значительном удалении от Урало-Енисейского пояса развития палеодолинных месторождений и вне явной пространственной связи с ними. Наиболее вероятно развитие урановых концентраций на юрском и вышележащих стратиграфических уровнях разреза платформенного чехла, например, в зоне латерального фациально-формационного перехода от нефтегазоматеринской баженовской свиты (черносланцевой, специализированной на золото и уран) к терригенным песчано-глинистым эквивалентам баженовитов. Водородное урановое оруденение связывается с эпохами аридизации климата и формированием потоков кислородных пластовых вод на значительном удалении от горного обрамления Западно-Сибирской плиты.

Следует отметить, что в качестве источников углеводородных восстановителей для формирования эксфильтрационно-инфильтрационных (водородных эпигенетических) месторождений урана в песчаниках могут выступать не только сопредельные нефтегазонасыщенные области, но и подстилающие ареалы нефтегазо- и угленакопления, а также черносланцевой седиментации. В числе таких ареалов слаболитифицированные фанерозойские черные сланцы типа баженовитов (юра) и чаттанугитов (фамен – турон); нефтеносные слои типа пермской формации катлер на Плато Колорадо; угленосные толщи верхнего палеозоя и мезозоя с характерной «сыпью» твердых битумов на фоссилизированных растительных остатках.

V. Территория Румынии, Чехии и Мали-Нигерской синеклизы. Примерами урановорудных территорий последнего рода могут служить рудный район румынского Западного Баната с урано-битумными месторождениями (Натра, Чудановица, Добрей и др.) в изоклинально дислоцированной толще пермских песчаников между угленосными слоями верхнего карбона и юры; Северо-Чешский район Гамр-Кёнигштайн в отложениях чешского мела, которые перекрывают Фрайталь-Внутрисудетскую область пермского угленакопления. Во всех случаях экстракция восстановительных газовых и газожидких флюидов из минерализованной органики происходила в результате локального проявления активизационных процессов: дислокационного

стресса (Западный Банат) или базальтоидного вулканизма (Северная Чехия).

Весьма интересен для песчаникового типа ранее затронутый для бассейна Тим-Мерсуа в африканской Сахаре вопрос о структурно-вещественной трансформации пластово-ролловых водородных урановых месторождений в каменноугольных отложениях под воздействием гранитоидного магматизма. Такие месторождения следует относить к экзотическому метапесчаниковому типу с пока единственным уникальным бихорским прототипом на территории румынских Внутренних Карпат. Как известно, пластовое месторождение Бихор и его менее масштабные спутники располагаются в метасоматическом ореоле альбитизации пермских песчаников площадью около 150 км² в 800–900 м над пологом кровлей ларамийского банатитового плутона (банатиты – кварцевые диориты) и под двойным экраном мощного (до 200 м) горизонта филлитов и надвиговой чешуи рифейских кристаллических сланцев. Первично-пестроцветные ураноносные полимиктовые песчаники и алевролиты 20–50-метрового продуктивного горизонта в пределах ореола альбитизации превращены в темные-серые до черных полосчатые роговиковоподобные тигровые породы с альбитом, диопсидом, эпидотом, цоизитом, актинолитом, биотитом, графитом и сфеном.

Дополнительным важным фактором спрессовывания рудного вещества считается внедрение под продуктивный горизонт мощного (до 120 м) силла диабазов, конфигурация которого в плане в общих чертах соответствует контурам этого весьма компактного месторождения. Месторождение отличается высокой контрастностью настурановых руд и значительными ныне отработанными запасами (более 20 тыс. т). Максимальное содержание урана в массивных, полосчатых и желваковых рудах ($U \pm Cu, Mo, V, Ti$) от нескольких до 20% и более. Радиологический возраст настуранов Бихорского месторождения оценивается в 115–90 млн лет и близок к возрасту банатитов и диабазов.

К аналогам Бихора, возможно, относятся также крупные (100 тыс. т) месторождения Акута и Арли на нижнем рудном этаже синеклизы Тим-Мерсуа в Мали-Нигерской урановой провинции [12]. Они располагаются в локально литифицированных песчаниках $S_{1,2}$ в пределах айрского пояса ларамийских гранитоидов, которые обнажаются на поверхности в выступах пород основания бассейна в районе г. Агадес. В закамуфлированных литификацией пластово-ролловых рудных залежах отмечается целый ряд признаков эпигенетической сегрегации рудного вещества: высокие содержания урана в рудах (до $n\%$ при среднем 0,25–0,45%); контрастность массивных и желваковых настурановых руд, которые либо полностью замещают цемент песчаников, либо главным образом карбонатно-фосфатные конкреции (стяжения, нодулы) и при этом имеют резкие границы с практически безрудными песчаниками; изотопный возраст настурановых руд от 330 до 150 млн лет, который охватывает эпохи водородной и метаморфогенной (бихорской) концентрации урана (рис. 5).

При большой компактности крупных по запасам рядовых и богатых руд отрицательной чертой месторождений метапесчаникового типа является необходимость их отработки подземным горным способом в связи с литификацией вмещающих пород, что значительно снижает рентабельность



Рис. 5. Принципиальная схема формирования уранового оруденения в проницаемых осадочных породах бассейна Тим-Мерсуа [17]

этих месторождений по сравнению с нормальными песчаниковыми месторождениями в рыхлых отложениях. Образование месторождений бихорского типа возможно также на нижних горизонтах артезианского бассейна Плато Колорадо, в частности среди отложений пермской формации Катлер, в надинтрузивных ореолах ларамийских лакколлитов, концентрирующихся в центральной части мозаично-блоковой структуры.

Палеодолинный (далматовско-витимский) подтип гидрогенных урановых месторождений в чехлах древних и молодых платформ приобретает всё большее число промышленно значимых рудных объектов в связи с активизацией прогнозно-поисковых работ на различных континентах. Для него также выясняются некоторые важные особенности и закономерности. Одна из них — связь крупных рудных территорий с региональными структурами тафрогенного происхождения. Такие структуры установлены для возрастных уровней C_3 –J и K–N и представляют собой палеорифтовые зоны на древнем основании, включающем докембрийские купольные структуры [2, 3].

Самая крупная Восточно-Африканская палеорифтовая зона тянется от Красного моря и Индийского океана на севере до Атлантического океана на юге. Она контролирует эшелонированную кулисную систему односторонних грабенов, выполненных сероцветными угленосными (C_3) и пестроцветными (P–J) отложениями надсерии карру. Эта надсерия вмещает многочисленные гидрогенные урановые месторождения песчано-угольного и песчаникового типов, а также возникшие за счет их поверхностного выветривания концентрации урана в современных калькретах. Система грабенов перекрыта мощными покровами юрских плато-базальтов (траппов) серии Дракенберг. В раздувах основания рифтовой системы реконструируются крупные купольные структуры предрифейского заложения (Ньяса, Лимпопо, Кейп) и трёхлучевая компенсационная структура, делимость кровли которых унаследованно отражается в радиальном размещении рудоносных грабенов, выполненных

отложениями карру. В провинции Ньяса обнаружены наиболее крупные месторождения урана Ньота (Мкуджу-Ривер) и Кайелекера с ресурсами от 40 до 100 тыс. т при рядовых и бедных по содержанию урана рудах. По данным некоторых исследователей [5], в отложениях надсерии карру отмечаются переходы от палеодолинных рудных залежей к пластово-ролловым.

Вероятным аналогом Восточно-Африканской мегаструктуры может быть палеозабайкальская Витим-Амалатская система MZ–KZ грабеновых стволных базальных палеодолин с месторождениями Хиагдинского и других рудных полей, перекрывающимися их амалатскими траппами неогена и Ангаро-Витимским полихронным гранитным батолитом (куполом) в основании. Прогнозируемые в южном обрамлении Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции концентрации урана пластово-роллового подтипа подобно восточноафриканским могут быть связаны с мезозойской эпиплатформенной рифтовой системой.

Согласно палеореконструкциям [2] эта система наследует трансрегиональный Томь-Кокчетав-Илийский протоавлакоген в основании субмеридиональной ветви палеозойского Центрально-Азиатского подвижного пояса. Хорошо известные мелкие палеодолинные месторождения Урало-Енисейского пояса (далматовский подтип) при этом могут служить косвенными признаками существования обширной области разгрузки ураноносных подземных вод, возможно, связанной с арктическими морями.

Заключение. Деление песчаникового типа урановых месторождений и рудных территорий на два самостоятельных подтипа условно. Для ряда провинций и районов ведущими действительно являются либо пластово-ролловые (Притяньшанье, Вайоминг), либо палеодолинные (Зауралье, Витим) концентрации урана. Например, для Плато Колорадо характерна тесная ассоциация пластово-ролловых залежей минеральных поясов с палеодолинными концентрациями в базальных врезках,

насыщенных углефицированным растительным детритом. В этом случае наблюдается своего рода вертикальный генетический ряд урановых концентраций в рамках единого песчаникового типа. Кроме того, высказываются предположения о существовании латеральных генетических соотношений между концентрациями урана разных подтипов [4]. Такие соотношения могут быть связаны с разрушением мешковых частей роллов, мигрирующих по падению слоев в пределах крупных базальных палеодолин. При этом линзо- и лентообразные рудные тела вблизи водоупоров на склонах палеодолин интерпретируются как реликты пластово-ролловых рудных залежей.

В формировании некоторых урановых месторождений песчаникового типа наряду с ведущими экзогенными процессами возможно участие эндогенных факторов. Наиболее вероятно такое участие в надкупольных осадочных бассейнах, где с орогенной активизацией фидерных структур и блоковых движений может быть связано поступление восходящих термальных флюидов и растворов.

Изложенный материал не охватывает всего спектра выявляющихся в последние годы новых сторон формирования урановых месторождений песчаникового типа и соответствующих направлений научных исследований. Одно направление, развитие которого представляется весьма перспективным, — это комплексная оценка потенциала всего рудного наполнения осадочного бассейна в целом, независимо от узкоспециализированных воззрений, ограничивающих реальные возможности металлогенического анализа.

Нестандартная реализация такого подхода продемонстрирована на примере анализа взаимосвязанных в пространстве и времени четырёх рудообразующих систем: седиментационной, катагенетической, инфильтрационной и эксфильтрационной, охватывающих совокупность экзогенных процессов рудообразования [11]. К этому списку рудогенных систем следует добавить ранее упомянутые процессы надинтрузивной метасоматической сегрегации, свойственные метапесчаниковому типу. Сложный полигенный характер такого оруденения и вероятность его конвергентности, т. е. формирование в различных пространственно-временных рамках [2, 3], позволяет, согласно принципу абстрактной аналогии, прогнозировать крупные рудные объекты в песчаниках различного возраста. Непременные условия для такого рода рудообразований — геохимическая специализация на уран отложений бассейна при существовании в его разрезе стратиформных концентраций урана различного происхождения,

а также наличие структурных и литологических экранов.

Установленные черты сходства и различия в локализации и размещении месторождений урана песчаникового типа подчеркивают общие закономерности и специфические черты уранового рудообразования в различных осадочных бассейнах Земли.

1. *Афанасьев А.М., Миронов Ю.Б.* Урановый потенциал молодых плит Евразии // Регион. геология и металлогения. 2007. № 32. — С. 121–125.
2. *Афанасьев Г.В., Миронов Ю.Б.* Уран в купольных структурах земной коры. Опыт палеорекострукций в металлогении. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. — 360 с.
3. *Афанасьев Г.В., Миронов Ю.Б., Пинский Э.М.* Урановые провинции мира // Тезисы III Междунар. симп. «Уран: геология, ресурсы, производство». — М.: ВИМС, 2013. — С. 19–20.
4. *Грушевой Г.В., Печенкин И.Г.* Металлогения мезозойских и кайнозойских ураноносных осадочных бассейнов Евразии // Регион. геология и металлогения. 2000. № 12. — С. 178–191.
5. *Живов В.Л., Бойцов А.В., Шумилин М.В.* Уран: геология, добыча, экономика. — М.: РИС ВИМС, 2012. — 304 с.
6. *Каримов Х.К., Бобоноров Н.С., Бровин К.Г.* Урановые месторождения учкудукского типа в Республике Узбекистан. — Ташкент: Фан, 1996. — 334 с.
7. *Кисляков Я.М., Щеточкин В.Н.* Гидрогенное рудообразование. — М.: ЗАО «Геоинформмарк», 2000. — 608 с.
8. *Константинов М.М., Куликова Е.Я.* Урановые провинции. — М.: Атомиздат, 1960. — 306 с.
9. *Лаверов Н.П., Смилкстын А.О., Шумилин М.В.* Зарубежные месторождения урана. — М.: Недра, 1983. — 320 с.
10. *Петров Н.Н., Язиков В.Г., Аубакиров Н.Б.* и др. Урановые месторождения Казахстана (экзогенные). — Алматы: Гылым, 1995. — 264 с.
11. *Печенкин И.Г., Печенкин В.Г.* Эволюция осадочного рудообразования в флювиальных палеосистемах. — М.: ВИМС, 2008. — 76 с.
12. *Тарханов А.В., Бугриева Е.В.* Крупнейшие урановые месторождения мира // Минеральное сырьё. 2012. № 27. — 118 с.
13. Уран российских недр / ред. Г.А. Машковцев. — М.: ВИМС, 2010. — 850 с.
14. Урановые месторождения Чехословакии. — М.: Недра, 1984. — 445 с.
15. *Dahlkamp F.I.* Uranium Deposits of the World — Asia. — Berlin—Heidelberg: Springer Verlag, 2009. — 508 p.
16. *Dahlkamp F.I.* Uranium Deposits of the World — USA and Latin America. — Berlin—Heidelberg: Springer Verlag, 2010. — 518 p.
17. *Scholtz N.* Batalene 1 and 2 uranium projects, Niger. Scarab Enterprises. Technical Report, 2009.
18. World Distribution of Uranium Deposits (UDEPO) with Uranium Deposits Classification. Edition Vienna, 2009. — 117 p.

Афанасьев Георгий Владимирович — доктор геол.-минер. наук, консультант, ВСЕГЕИ.

Миронов Юрий Борисович — доктор геол.-минер. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ. <Yuri_Mironov@vsegei.ru>.

Пинский Эдуард Маркович — доктор геол.-минер. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ. <Eduard_Pinsky@vsegei.ru>.