

УДК 553.495:553.078+551.72

Шумилин М.В. (ФГБУ «ВИМС»)

О МЕТАЛЛОГЕНИИ УРАНА В ДОКЕМБРИИ

*Рассматриваются месторождения урана, сформированные в протерозое, анализируются их генетические особенности и возможные причинно-следственные связи их образования с эволюцией тектоно-магматической обстановки, геохимических и климатических условий Земли. Выделяются четыре импульса образования урановых месторождений, разделенных паузами различной длительности, для каждого из которых характерен свой комплекс месторождений. **Ключевые слова:** месторождения урана, эволюция, протерозой.*

Shumilin M.V. (VIMS)

ON THE METALLOGENY OF URANIUM IN THE PRECAMBRIAN

*The uranium deposits formed in the Proterozoic are considered, their genetic characteristics and possible causal relationships of their formation with the evolution of the tectonic-magmatic environment, geochemical and climatic conditions of the Earth are analyzed. Four impulses uranium deposits are separated, with some pauses between. Every impulse are characterized by its own complex of deposit types. **Keywords:** uranium deposits, evolution, Proterozoic.*

Ровно 30 лет назад в СССР ведущими советскими геологами Н.П. Лаверовым, В.И. Казанским и А.И. Тугариновым была опубликована работа «Эволюция уранового рудообразования», в которой авторы впервые обратили внимание на закономерную смену в истории Земли одних типов урановых месторождений другими*. Причину этой эволюции они видели в направленном развитии литосферы и атмосферы Земли. Однако накопленные к тому времени геологические данные еще не позволяли дешифровать конкретные причинно-следственные связи изменений тех или иных условий на Земле с развитием конкретных типов урановых месторождений.

Сейчас наши представления как о геологическом развитии планеты, так и по металлогении урана существенно пополнились, а во многом и кардинально изменились. Во-первых, сформировалась теория тектоники плит, сделавшая понятными механизм образования структур, выделявшихся ранее под названием «геосинклиналей» и их трансформации в орогены. На

* Казанский В.И., Лаверов Н.П., Тугаринов А.И. Эволюция уранового рудообразования. — М.: Атомиздат, 1978.

основе этой теории были сделаны первые реконструкции земной суши для минувших эпох. Во-вторых, существенно пополнились сведения по геологии и генезису месторождений урана и были детально изучены некоторые новые их типы, в т.ч. месторождения «несогласия». Новые изотопные методы позволили также получить количественную информацию по палеогеохимии. Наконец, развитие информационной сети интернет открыло возможность анализа металлогении этого элемента в глобальном масштабе.

В данной статье нами предпринята попытка, опираясь на опубликованные материалы, выявить некоторые причинно-следственные связи эволюции уранового рудообразования с эволюцией литосферы, атмосферы и гидросферы Земли для эпохи протерозоя. В течение этой эпохи геохимические условия Земли претерпевали наиболее сильные изменения, и были образованы месторождения урана, в сумме заключающие более половины всех известных ресурсов этого металла.

Имеющаяся информация о ресурсах и времени образования основных типов протерозойских и раннепалеозойских месторождений урана представлена в следующей **таблице**:

Желтой заливкой в **таблице** выделены строки, соответствующие месторождениям, однозначно относимым к эндогенной серии, а голубой — соответствующие месторождениям, генезис которых считается экзогенным или остается дискуссионным, но, как будет показано ниже, вероятно изначально является именно экзогенным. Оставлены белыми строки, соответствующие периодам, для которых сведения о наличии месторождений с такой датировкой отсутствуют. Как видно из **таблицы**, в геологической истории рассматриваемой эпохи наблюдается чередование этапов формирования месторождений экзогенной и эндогенной серий. При этом эти этапы отделены друг от друга паузами, т.е. временными отрезками, для которых синхронных месторождений не известно.

Первыми природными концентрациями с промышленным содержанием урана явились кварцево-галечные конгломераты, формирование которых датируется интервалом 2,7–2,0 млрд лет. Эти специфические образования обнаружены на всех современных континентах, что позволяет считать их останцами некогда глобально развитой формации [2]. Металлоносность конгломератов неравномерна. При этом уран встречается в основном в слоях с возрастом >2,3 млрд лет, во время как золото развито по всему разрезу. Отмечается также замещение пирита оксидами железа в слоях моложе 2,1 млрд лет, причем оксидные слои повсеместно лишены урана, но остаются золотоносными.

О генезисе золотоурановой минерализации, да и самих конгломератов, дискуссия продолжается уже более столетия. Большинство исследователей, непосред-

венно изучавших эти месторождения, придерживается палеороссыпной модели, принимая, что такой механизм действовал в условиях постепенной смены первичной, углекислотно-сернокислотной атмосферы, современной азотно-кислородной. Однако в некоторых последних работах выдвигается гипотеза миграции золота в растворенной форме и осаждения его на бактериальных матах ранних анаэробных форм [5, 6]. Для урана такой механизм представлялся бы еще более реальным. Однако рост содержания кислорода и падение концентрации кислот в атмосфере в модели растворной миграции элементов должен был бы исключить дальнейшее накопление золота, сохранив или даже усилив накопление урана. Однако наблюдается как раз обратная картина: в наиболее поздних конгломератах сохраняется золото (Тарква), но исчезает уран. Этот факт свидетельствует скорее в пользу россыпной модели.

Подобных конгломератов с возрастом менее 2 млрд лет в мире не известно, хотя россыпной механизм концентрации золота действует до сих пор. По-видимому, накопление конгломератовой формации, независимо от

металлоносности, полностью прекратилось уже к середине протерозоя по причинам не геохимического, а какого-то иного плана, на которых мы остановимся ниже.

Можно предположить, что с возникновением кислородной атмосферы на смену россыпному механизму образования урановой минерализации должен был бы прийти процесс осаждения урана на восстановительных барьерах. Однако классические месторождения этого типа (песчаники) известны нам только с девона. Единственным сходным объектом в протерозое являются месторождения района Франсвилл в Габоне — Окло, Мунана и другие, получившие широкую известность благодаря открытию т.н. «феномена Окло», т.е. следов протекания в богатых рудах этого месторождения природной ядерной реакции. Сами эти месторождения не отличаются крупными масштабами и нигде более в мире не встречены.

Возраст руд Окло вначале принимался по уран-свинцовым определениям в 1800 млн лет [2]. Однако изучение «феномена Окло» показало, что ядерная реакция имела место не менее 2000 млн лет назад. Парадокс несоответствия этих датировок

был устранен дополнительными комплексными исследованиями, выполненными только в 2000 г. и показавшими, что возраст руд должен приниматься не моложе 2050 млн лет [12]. Таким образом, месторождения типа Окло действительно пришли на смену конгломератам и явились в геологической истории следующими по времени образования. Причина же их весьма ограниченной распространенности, вероятно, заключается в том, что относительно грубообломочные фации (конгломераты, песчаники) в то время соответствовали условиям, мало пригодным для жизни, и органические остатки-восстановители в них не накапливались. Осаждение урана из пластовых вод было возможно только у контактов таких фильтрующих слоев с породами, обогащенными восстановителями, т.е. в специфических структурных ловушках, которые не могли быть распространены широко. Именно в таких условиях (контакт песчаников с битуминозными сланцами) локализуются руды Окло [2].

| Тип месторождений | Основные геологические особенности | Возрастной интервал формирования, млн лет, источник | Известные ресурсы, тыс. т урана* |
|--|--|---|----------------------------------|
| Конгломераты | Пластовый характер залегания руд, ассоциация урана с золотом, пиритом, минералами россыпей | 2,7–2,0 | ≈600 |
| Тип Окло (песчаники) | Линзы и сложные тела в песчаниках у контакта с битуминозными сланцами; высокие содержания урана, следы протекания природной ядерной реакции | 2,05 | ≈30 |
| Месторождений нет | | 2–1,8 | |
| Метасоматиты | Штокверковый характер залегания, связь с зонами альбитизации | 1,8–1,6 | ≈400 |
| Тип Туммалапалле (ураноносные доломиты) | Пластовый характер залегания, убогие руды с пиритом и коллофаном | 1,75 | >100 |
| Тип Олимпик (меденосные гематитовые брекчии) | Штокверковый характер залегания; уран, как примесь в медных, халькопирит-борнитовых рудах | 1,6 | >1000 |
| Несогласия | Связь с бассейнами накопления терригенных осадков в кратонных областях; приуроченность руд к поверхности раздела кристаллического фундамента и чехла; уникально-высокие содержания урана | 1,6–1,3 | >1000 |
| Месторождений нет | | 1,3–0,9 | |
| Кинтайр, Вестморленд, Шинколобве | Жилы и штокверки | 0,85–0,7 | 20–40 |
| Месторождений нет | | 0,7–0,5 | |
| Тип Россинг, (ураноносные аплит-пегматиты) | Сложные инъекции гранитного материала в различные метаморфиты; низкие содержания урана | ≈0,5 | >300 |
| Тип Ранстад Ураноносные черные сланцы | Пластовые залежи с равномерно-бедным содержанием | 0,47–0,43 | >500 |

*Оценки рассчитаны по данным, приводимым в Red Book OECD-IAEA за 2014 г. для ресурсов категории RAR+INFerred < 130\$/kg в сумме с добытыми

Конгломераты и месторождения типа Окло соответствуют первому импульсу формирования урановых месторождений, занявшему период от 2,7 до 2,0 млрд лет. Начало нового импульса фиксируется временем около 1,8 млрд лет, когда появляются первые эндогенные месторождения — ураноносные метасоматиты-альбититы. Более или менее значительные урановые концентрации с надежными датировками порядка 1,9 млрд лет практически отсутствуют. Таким образом, в урановой металлогении протерозоя фиксируется перерыв — пауза, длительностью более 100 млн лет. В этой связи внимание привлекает статья группы австралийских исследователей, опубликованная в начале текущего года в журнале «Nature Geoscience» (Великобритания) [11].

Авторами указанной статьи был выполнен системный отбор образцов пород континентального магматизма раннего протерозоя по различным районам мира и выполнены определения их абсолютного возраста единым Sm-Nd методом. Статистическая обработка полученных результатов показала, что фиксируемые датировки образуют два отчетливых максимума, соответствующих периодам 3,0–2,3 млрд лет и 2,2–1,8 млрд лет, в то время как для периода 2,3–2,2 млрд лет датировки практически отсутствуют. Таким образом, в развитии континентального магматизма в период раннего протерозоя зафиксирован перерыв — пауза, длительностью около 100 млн лет*. Отмечается, что выделенная пауза характеризуется также замедлением осадконакопления и снижением скорости перемещения тектонических плит, т.е. вся геологическая жизнь планеты, как бы замирает, но потом снова активизируется.

На приводимый авторами статьи график распределения геохронологических датировок магматитов во временной шкале мы попытались нанести наши данные по накоплению ресурсов урана. Такой совмещенный график приведен на рис. 1.

Как видно из рис. 1 графики интенсивности магматизма и накопления урана оказываются практически обратными: тектономагматической паузе соответствует первый импульс накопления урана (месторождения конгломератов и типа Окло), а последующему максимуму тектономагматической активности — пауза в накоплении урана. С затуханием этого максимума начинается новый импульс концентрации урана.

Связь первого импульса с тектономагматической паузой свидетельствует о формировании его месторождений в спокойной тектонической обстановке, что

* В статье авторами используются термины *gap* (в буквальном переводе — брешь, пробел, пауза) или *lull* (затишье, успокоенье)

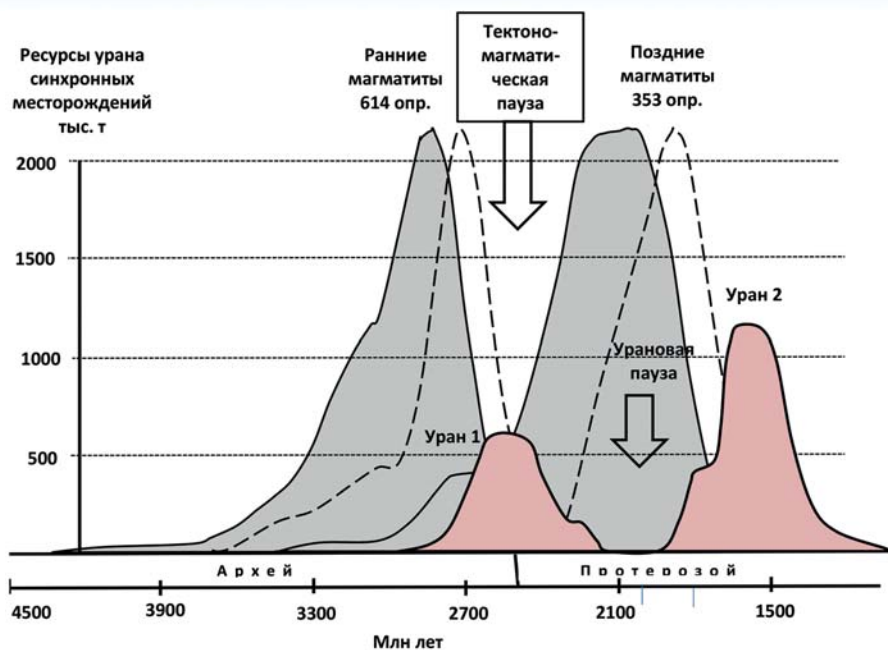


Рис. 1. Графики распределения возрастных датировок магматитов на временной шкале по [3] в совмещении с графиками накопления ресурсов урана в месторождениях по нашим данным

может служить свидетельством их образования поверхностными, экзогенными процессами и еще раз подтверждает россыпную модель для конгломератов.

Палеотектонические построения рисуют нам эпоху 2,5–2,0 млрд лет как время становления и постепенного распада первого суперконтинента — Монгеи или Кенорленда [10]. Установлено также, что этот период характеризовался развитием и последующим таянием мощного, по-видимому, общеконтинентального ледяного покрова (гуронское оледенение) [1].

Таяние этого покрова определило глобальное формирование пояса флювиогляциальных осадков, где и образовывались металлоносные конгломераты, хотя их металлоносность, естественно, определялась составом области сноса и могла варьировать в широких пределах. Однако с установлением кислородного режима атмосферы россыпной механизм накопления урана оказался полностью выключенным, а на рубеже 2,0 млрд лет прекратилось и формирование самих конгломератов.

Второй импульс накопления урана в месторождениях начинается с образования месторождений ураноносных метасоматитов-альбититов, являющихся первыми в геологической истории гидротермальными концентрациями этого элемента. Месторождения данного типа развиты широко, но среди них выделяются древние протерозойские и относительно молодые палеозойские (Колиз Хилл в США, Кокчетавская группа, Казахстан). В интересующей нас древней группе основные ресурсы связаны с месторождениями Украинского щита (около 300 тыс. т), возраст которых уверенно датируется в 1800 млн лет. Близко синхронными оцениваются также месторождения Сев. Америки (Мишлен, Биверлодж) и Бразилии (Лагоа-Реал), однако формирование таких объектов продолжается в течение достаточно длительного времени (Валхалла в Австралии — 1,56 млрд лет) [2].

В тектоническом развитии Земли этап 1800 млн лет соответствует завершающей стадии гудзонского орогенного цикла, т.е. спаиванию разрозненных древних континентальных блоков в единый массив нового суперконтинента — Мегагеи или Колумбии, сопровождающийся формированием крупных орогенов. В зонах субдукции плит при этом могло происходить «затягивание» на глубину ранних ураноносных формаций (конгломератов), что приводило к образованию насыщенных ураном гидротерм, формировавших месторождения метасоматитов. Отметим при этом, что почти во всех районах развития протерозойских ураноносных метасоматитов сохраняются останцы конгломератовой формации и даже связанные с ними месторождения золота (Матрикс в Канаде, Бразилия) или урана (Эппл в Канаде, Николо-Козельское на Украине).

Практически параллельно с образованием метасоматитов протекает активная эрозия континентов и вынос урана в океанический бассейн, где в некоторых специфических условиях местами происходит его осаждение. Свидетельством этого является уникальное по геологии месторождение Туммалапалле в Индии, представленное пластами ураноносных фосфат и пирит-содержащих доломитов, возраст которых оценивается в 1750 млн лет [9]. Ресурсы этого объекта весьма велики (>100 тыс. т), однако публикации по его геологии ограничены. Нигде более в мире подобные образования не встречены.

Несколько позже появляются месторождения урана, т.н. «типа несогласия», причем их вклад в ресурсный потенциал данного этапа оказывается наибольшим (около 1000 тыс. т). Время их образования, согласно специальным исследованиям П. Александра с соавторами, датируется интервалом 1600–1300 млн лет [4].

Месторождения несогласия также распространены широко и в настоящее время мы видим их на всех континентах*. Районом, где они дошли до нас в наибольшем числе, является бассейн Атабаска в Канаде. Характерной особенностью этих месторождений является их локализация вблизи поверхности несогласия между кристаллическим архей-раннепротерозойским фундаментом и осадочным покровом среднего протерозоя (1700–1600 млн лет). При этом рудные скопления встречаются как в разломах фундамента, так и в реголитах поверхности несогласия и вышележащих осадках.

Для наиболее изученных месторождений Канады исследователями рисуется следующая модель образования [7, 8]:

- формирование внутриконтинентального бассейна с накоплением песчаных осадков и насыщением бассейновых вод ураном, сносимым с горного обрамления и концентрировавшимся за счет испарения**;
- захоронение ураноносных бассейновых вод с осадками при сохранении их вертикальной циркуля-

ции в среде, где отсутствовали водоупоры и восстановители под действием повышенного геотермического градиента;

- тектоническая активизация района с подновлением разломов фундамента и возникновением по ним притока восстановительных, но безурановых гидротерм;

- осаждение урана из бассейновых вод при смешении их с восстановительными гидротермами вблизи поверхности несогласия, с локализацией руд выше или ниже этой поверхности в зависимости от локальных гидродинамических условий.

Решающим фактором, определявшим осаждение очень богатых руд, в этой модели оказывается постоянный приток в зону реакции новых порций высокоураноносных вод за счет сохранения их вертикальной циркуляции в верхней проницаемой толще. В этой связи обращает на себя внимание, что на объектах несогласия в Карелии (Карху) и Мали (Фалеа) подобная циркуляция была ограничена, т.к. относительно тонкий слой фильтрующих песчаников там перекрывается непроницаемым пластом базальтовых лав. Именно этим мы склонны объяснять существенно более низкое содержание урана в рудах этих объектов.

Как следует из модели, такие месторождения могли возникать только в условиях, когда вмещающие осадки были полностью лишены сингенетических восстановителей, что обеспечивало возможность длительной циркуляции ураноносных седиментационных вод при сохранении урана в растворе. Подобные условия могли существовать только в протерозое и раннем палеозое, но никак не позже, т.к. с развитием наземной жизни на континентах стали возникать геохимические барьеры, «перехватывающие» уран уже на путях миграции в бассейны возможного накопления. Поэтому месторождения несогласия следует считать специфическим продуктом только этой эпохи***.

Со вторым импульсом связано возникновение еще одного эндогенного месторождения урана, занимающего среди всех таких объектов совершенно особое положение. Мы имеем в виду месторождение Олимпик Дэм в Австралии, ресурсы которого оцениваются колоссальной цифрой — более 1400 тыс. т, а возраст синхронен с месторождениями несогласия Канады — 1590 млн лет [2, 3].

Основной компонент руд этого объекта — медь и как медное — месторождение Олимпик по типу не является уникальным, хотя остается уникальным по масштабу (около 60 млн т меди). Этот масштаб определяется, прежде всего, огромными размерами выполняемой рудой брекчиевой структуры — трубки взрыва (около 2х5 км). Связь урана с медными рудами также не уникальное явление: ураноносными оказываются, в частности, руды некоторых месторождений медного пояса Замбии (Лумвана и др.), причем в связи с этим

* В Австралии это — Рейнджер и др., в Африке — Фалеа в Мали, Карху в России, в Ю. Америке — Рио Кристаллино в Бразилии, в Азии — Гоги и др. в Индии

** По данным декрипитации ГЖВ концентрация урана в водах достигала сотен мг/л [8]

*** Нередко встречающийся в литературе термин «фанерозойские месторождения несогласия», на наш взгляд, употреблять не следует, т.к. при этом имеются в виду обычные гидротермальные месторождения, лишь локализованные в сходной структурной обстановке

поясом известно и крупное собственно урановое месторождение — Шинколобве. Такой же, хотя и небольшой объект (Маунт Ги) известен и в районе Олимпика. Таким образом, уран может сопутствовать меди в рудах там, где наблюдается совмещение (наложение) металлогенических зон этих металлов. Уникальность Олимпика, прежде всего, в размерах рудовмещающей структуры. Поэтому мы склонны в нашем анализе рассматривать Олимпик как особое, выдающееся явление (своего рода «ураганную пробу»), принимая, что общий процесс накопления урана в месторождениях второго импульса определяли все-таки месторождения несогласия и, в меньшей степени, предшествующие им метасоматиты.

Такая временная последовательность данных объектов, возможно, не случайна: метасоматиты, как и еще более ранние конгломераты, могли служить концентрированными источниками урана при образовании месторождений несогласия. Характерно, что оба последних типа проявлены в обрамлении бассейна Атабаска, вмещающего месторождения несогласия. Присутствует в обрамлении бассейна и еще один ранний урановый объект — месторождение ураноносных мигматит-пегматитов Шарлебуа, ресурсы которого достаточно велики (по некоторым оценкам до 100 тыс. т). К сожалению, геохронологических датировок руд этого объекта нами в публикациях не обнаружено. Наличие ранних масштабных урановых концентраций, возможно, являлось очень важным фактором, определяющим формирование месторождений несогласия.

Поздний протерозой в интервале моложе 1300 млн лет выглядит слабо ураноносной эпохой, причем проявлены в нем исключительно месторождения эндогенной серии. Первый всплеск их образования фиксируется на рубеже 1445 млн лет (месторождения района Б. Медвежьего оз. в Канаде). Более широко развитая группа отвечает временному интервалу 850–840 млн лет. Это, уже упоминавшееся выше, Шинколобве (Африка, Заир) и месторождения Австралии Кинтайр и Вестморленд. Несмотря на существенные различия, все эти объекты могут квалифицироваться как жильные.

Процесс формирования месторождений несогласия, да и вообще месторождений экзогенной серии, оказался в неопротерозое выключенным. Причины пока остаются неясными. Все же обращает на себя внимание тот факт, что именно поздний протерозой явился эпохой резкого похолодания климата и глобального развития оледенения. Очевидно, что в условиях ледников растворная миграция элементов на поверхности Земли стала вообще невозможной. Собственно ледниковая эпоха (криогений) датируется интервалом лишь около 750–530 млн лет [1], а образование месторождений несогласия, по-видимому, уже прекратилось значительно раньше.

Наши знания о климате протерозойской эпохи пока далеко не полны и, возможно, что существенное глобальное похолодание началось уже с начала неопротерозоя. Напомним, что принимаемая модель образования месторождений несогласия отводит существен-

ную роль эвапорационному режиму, т.е. жаркому, засушливому климату. Смена климатических условий, возможно, и явилась «шлагбаумом», застопорившим образование этих месторождений.

Заключительный импульс образования урановых месторождений в рассматриваемую эпоху приходится уже на границу с кембрием и представлен эндогенными месторождениями, т.н. «гранитного» типа. Наиболее известны объекты, расположенные в Дамарском орогене Намибии: Россинг, Хусаб и др. Их суммарные ресурсы превышают 300 тыс. т. Месторождения представлены сложными, разномасштабными инъекциями гранитного материала, несущего рассеянную урановую минерализацию в разнообразные вмещающие метаморфиты: гнейсы, сланцы, мраморы. При этом наиболее продуктивны именно мигматитоподобные обра-

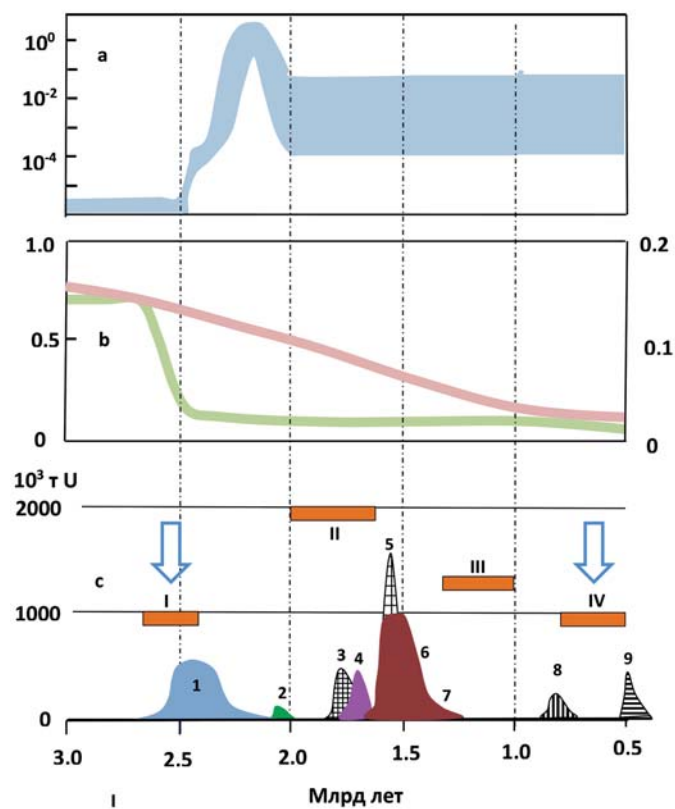


Рис. 2. Эволюция типов месторождений урана в протерозое: а, b — эволюция химии атмосферы (по [11] со смещением оси к кембрию): а — парциальное давление кислорода; b — отношение сероводород/серный ангидрид (зеленая линия, левая шкала) и парциальное давление углекислого газа (красная линия, правая шкала); с — накопление ресурсов урана в различных типах месторождений: цветные поля — экзогенные концентрации: голубой — конгломераты; зеленый — тип Окло; розовый — несогласия; фиолетовый — Туммалапалле (сингенез); черная узорная заливка — эндогенные концентрации: густая сетка — метасоматиты; редкая сетка — тип Олимпик; вертикальная штриховка — жильный тип; горизонтальная — гранитный тип. Цифры — учтенные месторождения: 1 — районы Витватерсранд, Эллиот; 2 — Окло, Мунана и др.; 3 — месторождения Украинского щита, Лагоа-Реал, р-он Биверлодж, Мишлен; 4 — Туммалапалле; 5 — Олимпик Дэм; 6 — р-он Атабаска, Фалеа, Карху; 7 — р-он Порт Радий; 8 — Шинколобве, Кинтайр, Вестморленд; 9 — Россинг, Хусаб, Валенсия и др. Оранжевые прямоугольники — периоды становления суперконтинентов: I — Кенорленд; II — Колумбия; III — Родиния; IV — Гондвана [4]. Крупные синие стрелки — этапы максимумов оледенения

зования с густой сетью тонких прожилков гранитного материала, пронизывающих породную матрицу, в которых, как можно предполагать, кристаллизация ураноносных расплавов происходила быстро, и летучий уран оставался связанным в силикатной массе. Возраст объектов Намибии определяется в 510–468 млн лет, т.е. практически соответствует уже кембрию. Однако, как отмечалось выше, весьма сходный объект Шарлебуа в Канаде, возможно, относится к более раннему времени.

Отмеченный рубеж соответствует этапу спаивания континентальных плит Африки и Южной Америки (суперконтинент Паннотия) с широким развитием, т.н. панафриканского или бразильского орогенеза, что, видимо, и обусловило новый импульс эндогенного уранового рудообразования, завершивший рассматриваемый нами его протерозойский этап.

Отметим, что в раннем палеозое (силур) на смену этим объектам приходят месторождения в черных сланцах (Ранстад и другие в Прибалтике и Скандинавии). Таким образом, чередование эпох развития месторождений эндогенных и экзогенных серий продолжается и в фанерозое. Однако анализ металлогении этой эпохи уже выходит за рамки нашей статьи.

В заключение проиллюстрируем графиком накопления ресурсов урана в месторождениях в увязке с некоторыми данными по эволюции Земли, построенным на единой геохронологической шкале (рис. 2). Как видно на рисунке в протерозойскую эпоху выделяются четыре импульса образования урановых месторождений, разделенных паузами различной длительности. При этом два первых являются мощными по количеству накопленных ресурсов, а два завершающих — относительно слабыми.

Первый импульс (2,7–2,0 млрд лет) характеризуется образованием месторождений исключительно экзогенной серии, причем в нем происходит смена россыпного механизма формирования — растворной миграцией и химическим осаждением, связанная с «кислородной революцией» атмосферы.

Второй импульс (1,8–1,3 млрд лет) характеризуется формированием месторождений эндогенной и экзогенной серий, в каждой из которых проявлены несколько их типов. Доминирующими оказываются в эндогенной серии метасоматиты, а в экзогенной — месторождения несогласия (при условии исключения уникального объекта Олимпик).

Третий и завершающий импульсы представлены исключительно месторождениями эндогенной серии: гидротермальными жильными — в третьем и магматическими (аплит-мигматиты) — в завершающем.

Первый импульс соответствует окончанию гуронского ледового цикла, а третий и завершающий определенно разделены новым этапом глобального оледенения, хотя сами они связаны с эндогенными процессами.

В целом объекты эндогенной серии соответствуют завершающим этапам становления континентов, а экзогенной — этапам тектонического покоя после их распада.

Уран — элемент, способный служить одновременно хронометром и индикатором геохимии палеосреды. Дальнейшее накопление, систематизация и анализ геохронологических данных по месторождениям урана может расширить и углубить наши знания о прошлом Планеты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чумаков, Н.М. Оледенения Земли: история, стратиграфическое значение и роль в биосфере / Н.М. Чумаков. — М.: ГЕОС, 2015. — Т. 611.
2. Шумилин, М.В. Историческая металлогения урана: опыт глобального анализа / М.В. Шумилин. — Иркутск: ФГУП «Геологоразведка», 2015.
3. Шумилин, М.В. О генезисе медно-золото-уранового месторождения Олимпик Дэм / М.В. Шумилин // Недропользование XXI век.— 2013.— № 2.
4. Alexandre, P. Geochronology of unconformity-related uranium deposits in the Atabasca basin. Canada and their integration in the evolution of the basin. Mineralium Deposita / P. Alexandre, K. Kyser, D. Thomas, P. Polito, J. Marlat.— 2009.— № 1. — Vol. 44.
5. Frimmel, H.E. A Giant Mezoarchean Crustal Gold-Enrichment Episode: Causes and Consequences for Exploration. Society of Economic Geologist Inc. Special Publication / H.E. Frimmel.— 2017.
6. Frimmel, H.E. First whiffs of oxygen triggered onset of crustal gold cycle. Mineral Deposita / H.E. Frimmel, Q. Hemmigh.— 2015. — Vol. 50 (1).
7. Jefferson, C.W. Unconformity associated uranium deposits of the Athabasca basin, Saskatchewan and Alberta. In Mineral deposits of Canada. Geological association of Canada. Special publ / C.W. Jefferson, D.J. Thomas, S.S. Gandhi and all.— 2007.— № 5.
8. Komninou, A. Geochemical modeling of the formation of an unconformity related uranium deposit. Econ. Geology / A. Komninou, D.A. Sverjensky.— 1996.— Vol. 91.
9. Mackintosh, J. Aged and Basin Evolution of the Cuddapah Supergroup, India. Univ. Adelaide / J. Mackintosh.— 2010.
10. Merino, L.V.G. Supercontinentes la Reconstrucion de Geografica Perididas. Conferencia impartida. Univ. Cantabria / L.V.G. Merino.— 2012.
11. Spenser, C. A Paleoproterozoic tectono-magmatic lull as a potential trigger for Supercontinent Cycle. Nature Geoscience / C. Spenser, J. Murphy, Ch. Krikland, K. Mitchell.— 11 (2).— 2018.
12. Zetterstrom, L. A review and critical evaluation of literature. Technical Report TR-00-17 Laboratory for Isotope Geology Swedish Museum of Natural History / L. Zetterstrom.— 2000.

© Шумилин М.В., 2019

Шумилин Михаил Владимирович // mishazbk@gmail.com

УДК 550.84.543(553.04)

**Васильев Н.В., Кабирова Р.У., Куликова И.М.,
Соленикова Е.О., Набелкин О.А. (ФГБУ «ИМГРЭ»)**

АНАЛИТИЧЕСКОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ РАБОТ

*Характеризуются состояние и проблемы лабораторно-аналитического обеспечения региональных и поисковых геохимических работ в России. На примере ФГБУ «ИМГРЭ» представлен перечень традиционных и новых аналитических методов по трем направлениям изучения геохимических проб: количественного химического анализа, оптико-минералогического анализа и рентгено-спектрального микроанализа. **Ключевые слова:** масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой метод, рентгеноспектральный микроанализ, оптико-минералогический анализ, пробоподготовка.*