

Факторы пространственно-временной эволюции ураноносных осадочных бассейнов в истории Земли

Рассмотрена эволюция ураноносных осадочных бассейнов в истории Земли. Показано существенное влияние биоса на металлогеническую специализацию осадочного выполнения на различных этапах формирования и развития бассейнов.

Ключевые слова: *осадочный бассейн, эволюция, уран, комплексное оруденение, органическое вещество.*

YU. B. MIRONOV, E. M. PINSKY, A. M. KARPUNIN (VSEGEI)

Factors of spatiotemporal evolution of uranium-bearing sedimentary basins in the history of the Earth

The evolution of uranium-bearing sedimentary basins in Earth history is being considered. The significant bios influence on the metallogenic specialization of the sedimentary filling at different stages of basins formation and development is being shown.

Keywords: *sedimentary basin, evolution, uranium, complex mineralization, organic matter.*

Введение. Понятие «ураноносный осадочный бассейн» прочно вошло в практику специалистов по геологии урана при характеристике тех или иных ураноносных территорий как в нашей стране, так и за рубежом применительно к комплексу осадочных и вулканогенно-осадочных горных пород, в которых локализуются месторождения урана.

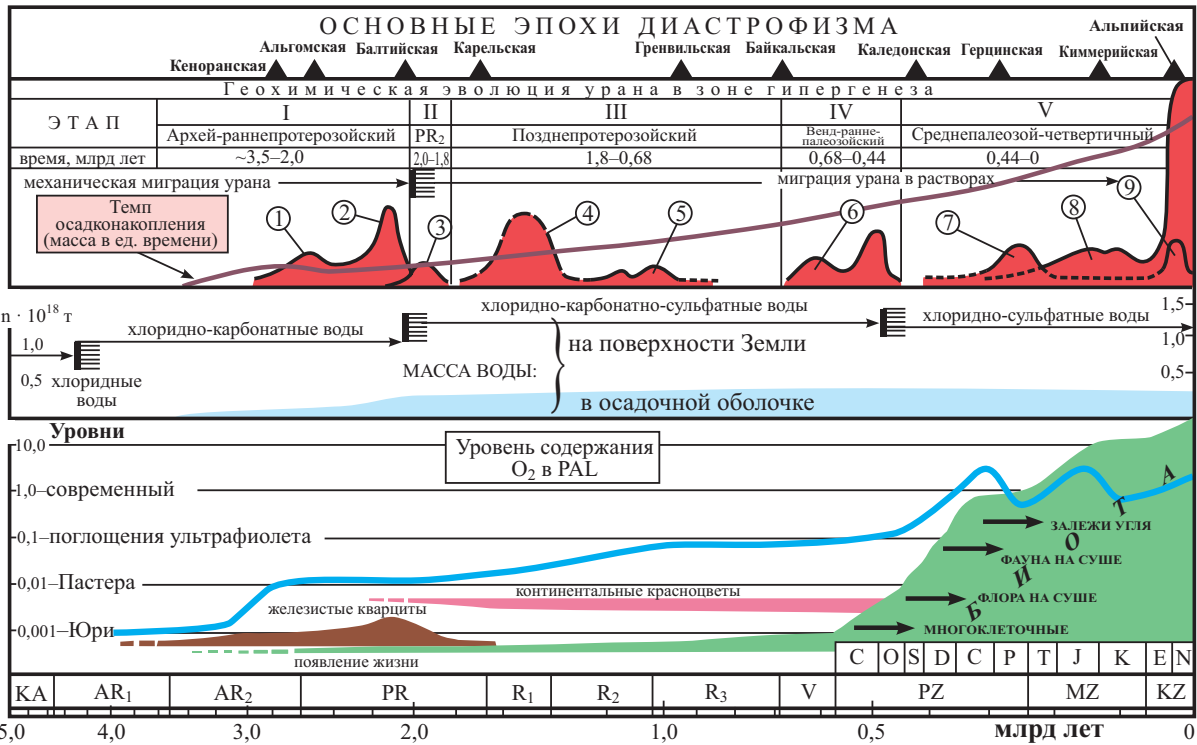
В представлении Н. Б. Вассоевича [7], осадочные бассейны — это крупные (площадью более 1000 км²) достаточно автономные впадины, характеризующиеся определенным единством геологического развития, в которых происходит или происходило в геологическом прошлом накопление осадков и преобразование их в осадочные горные породы. Под осадочным бассейном понимается крупное естественное геологическое тело, сформированное в определенных климатической и геодинамической обстановках, которые в основном и определяют общий состав и его минерогеническое содержание (торф, каменный уголь, соли, фосфориты, бокситы, различные россыпи) [14].

Изучение ураноносных осадочных бассейнов. Существенный вклад в изучение минерогеники осадочных бассейнов внесли специалисты ВСЕГЕИ. В издаваемой на протяжении ряда лет серии «Осадочные бассейны России» (под ред. Н. В. Милетенко, В. М. Терентьева и А. Д. Щеглова) дано всестороннее описание их образования, развития и металлогенического наполнения. Обращено внимание на то, что проблема рудообразования в осадочных бассейнах — во многом гидрогеологическая, связанная с анализом строения и эволюции рудообразующих гидрогеологических (палеогидрогеологических) систем [2]. Значительный вклад в исследование различных аспектов радиогидрогеологии осадочных бассейнов внес Г. М. Шор [19]. Спектр геодинамических обстоя-

тельств рудоносных осадочных бассейнов включает [3, 23] внутриплитные рифтогенные, пассивноокраинные, субдукционные, коллизионные, современные океанические со свойственным каждой из них набором геологических и рудных формаций. Геологами ВСЕГЕИ охарактеризованы и ураноносные осадочные бассейны как черносланцевого [20], так и прочих геолого-промышленных типов [9].

Рассматривая металлогению ураноносных осадочных бассейнов Евразии, И. Г. Печенкин и Г. В. Грушевой [17] подчеркивали особенности осадочного рудообразования. Это участие в процессе изменения литосферы внешних оболочек Земли — гидросферы, атмосферы и биосферы, взаимоотношения которых характеризуют последовательно генерацию, миграцию и концентрацию полезных компонентов, включая уран. Совокупность их изменений во времени и пространстве определяет генезис месторождений.

В геохимической эволюции урана в зоне гипергенеза авторы [17] выделяют пять этапов (рисунок): архей-раннепротерозойский 3,5–2,0 млрд лет восстановительный; среднепротерозойский 2,0–1,8 млрд лет окислительный; позднепротерозойский 1,8–0,68 млрд лет окислительно-восстановительный; венд-раннепалеозойский 0,68–0,44 млрд лет окислительно-восстановительный; среднепалеозойский–четвертичный 0,44–0 млрд лет окислительно-восстановительный. Изменение геохимических особенностей литосферы влияло на форму и особенности миграции и локализации урана во времени и пространстве — от механической кластогенной (золото-ураноносные конгломераты) на первом этапе до осадочно-диагенетической (ураноносные черные сланцы, фосфориты и т. п.) на последующих этапах и инфильтрационной (экзодиагенез в палеорусле, зоны пластовой и грунтовой инфильтрации ураноносных растворов в проницаемых толщах)



Геохимическая эволюция урана в зоне гипергенеза [17]

1 – руды золото-урановых месторождений; 2 – регенерация руд отдельных месторождений; 3 – непромышленная концентрация урана в морских илах; 4 – руды месторождений типа несогласия; 5 – регенерация руд отдельных месторождений; 6 – урановые руды в черных углеродистых сланцах; 7 – экзодиагенетические руды пермских седиментационных бассейнов; 8 – руды инфильтрационных месторождений (ролловые, стековые и др.); 9 – руды уран-фосфор-редкоземельных месторождений, связанных с костным детритом рыб

на заключительном этапе. Просматривается постепенный рост промышленной значимости и разнообразия типов урановородных объектов к новейшему времени, что обусловлено изменением тектонических режимов, влиявших на осадконакопление, состав атмосферы, гидросферы, появление и развитие биоты [11].

М. В. Шумилин [25] указывает на три события в истории Земли, когда геохимические условия планеты кардинально изменялись, влияя на характер миграции и концентрации урана:

- деление внешней оболочки Земли на сушу (континенты) и акваторию океанов (более 3 млрд лет назад) и возникновение современного механизма эрозии суши метеогенными водами, что резко активизировало дифференциацию вещества по удельным массам и растворимости;

- активное развитие бактериальной жизни, морских растений (около 2,2–1,8 млрд лет), что привело к появлению кислородной атмосферы (вступила в действие водорастворимая уранил-ионная форма миграции урана) и фиксаторов его в виде органических остатков (сорбентов и восстановителей);

- появление и развитие наземной растительности (около 0,45 млрд лет) на суше, т. е. возникновение восстановительных геохимических барьеров в континентальных формациях. Условия миграции и накопления урана в геологической среде становятся близкими к современным. М. В. Шумилин [25] отмечает, что металлогения конкретных областей Земли, выделяемых как урановородные провинции и пояса, определялась в первую очередь унаследованностью геохимической специализации

локальных блоков коры, основы которой закладывались в эпохи, предшествовавшие основному рудообразованию. Во многих регионах мира наиболее древними скоплениями урана фиксируются реликты специфической формации уран-золотоносных кварцево-галечных конгломератов раннего протерозоя, которые могли служить исходным «урановым депо» для возникавших позже промышленно значимых месторождений урана.

С. Г. Неручевым [15] развита концепция о периодическом проявлении в истории Земли эпох уранонакопления и повышенной радиоактивности среды, что неоднократно вызывало интенсивную ответную реакцию всего комплекса организмов биосферы. Эти эпохи отражают общий пульсационный ритм развития Земли, обусловленный взаимодействием земных и космических факторов, и определяют неравномерный ход развития органического мира – чередование более длительных эволюционных и относительно кратковременных революционных этапов.

Характеризуя формации рудных месторождений в истории земной коры, В. С. Домарев [10, с. 25] замечает, что «... эволюция рудообразования, по-видимому, наилучшим образом может быть понята путем выяснения временной распространенности определенных типов месторождений и возможных различий разновозрастных представителей их; выбор принципов выделения таких типов представляет собой достаточно сложную задачу». Приняв на вооружение данную рекомендацию классика отечественной металлогении, авторы полагают, что пространственно-временная эволюция

ураноносных осадочных бассейнов в истории Земли в этом аспекте должна базироваться на двух постулатах. Первый — на необратимо направленной эволюции литосферы, гидросферы, атмосферы и биосферы в ходе течения геологического времени (что подразумевает исключение использования принципа актуализма «в чистом виде» при оценке геологических процессов для тех или иных интервалов геологического времени — эонов, эр, периодов и эпох). Второй — на периодичности проявления геологических процессов и явлений, обусловленной эволюцией оболочек Земли как космического тела в составе планет солнечной системы, т. е. подчиненности геологических явлений физическим космическим полям на различных участках орбиты в рамках величины галактического года (ГГ). Позиция авторов при оценке второго постулата отображена в публикациях [12, 13], согласуется с представлениями ряда исследователей [15] и получила понимание и востребованность у геологов производственных организаций [16, 22].

Исходя из вышеизложенного и учитывая последнюю классификацию геолого-промышленных типов урановых месторождений МАГАТЭ, в пространственно-временной эволюции ураноносных осадочных бассейнов намечаются два существенных репера: возникновение кислородной атмосферы в мезопротозое (2600–2000 млн лет) и выход растительности на континент 450–400 млн лет (силур — девон). Указанные реперы разделяют историю ураноносных осадочных бассейнов на три интервала (этапа) с четко проявленными типоморфными физико-химическими процессами уранового рудогенеза и соответственно набором геолого-промышленных типов урановых месторождений.

Первый интервал обусловлен низким содержанием кислорода в атмосфере (первый этап, по И. Г. Печенкину и Г. В. Грушевому [17], архей-протерозойский 3,5–2,0 млрд лет восстановительный). Основной механизм формирования отложений в осадочных бассейнах — механическая сепарация смываемых с возвышенностей горных пород. Характер атмосферы способствовал сохранению соединения урана в обломочной фракции, что привело к образованию его скоплений в ураноносных и золото-ураноносных кварцево-галечных конгломератах ЮАР, Бразилии, Ганы и других районов мира. В данном интервале времени преобладает тип (МАГАТЭ) палеокварцево-галечниковых конгломератов. Возраст конгломератов оценивается в 2,7–2,5 млрд лет [25]. Образование их, возможно, стимулировано диастрофизмом на рубеже 2775 млн лет, который впервые выявляется в предложенной нами геохронологической схеме и пока не упомянут в геологической литературе, посвященной докембрию. Он проявился, вероятно, в середине позднего архея между кольской (трансваальской) и кеноранской (беломорской, родезийской) эпохами структурной перестройки земной коры и может быть назван позднекольским (позднетрансваальским) диастрофизмом. В этом плане подкупает совпадение дат возраста золото-ураноносных конгломератов — 2700–2500 млн лет у М. В. Шумилина [25] и 2775–2555 млн лет у авторов.

Примечательно, что сведения об ураноносных черных сланцах в этот период отсутствуют, хотя наличие черных сланцев отмечается в целом ряде районов мира, в том числе в подошве слоя кварцевых конгломератов (риффов) ЮАР, самый известный

из которых — маркирующий риф Карбон Лидер, определяемый как фоссилизированные цианобактериальные маты, покрывавшие дно мелководных пресноводных озер, представлявших дистальные фации пролювиальных конусов выноса. По существу, это механические ловушки для тяжелых минералов, выносившихся в озера временными потоками (пирита, золота, уранинита и др.). Длительное радиоактивное облучение органики способствовало образованию тухолита — высокоуглеродистого вещества наподобие антраксолитов с аномально низкими содержаниями водорода.

Второй интервал характеризуется кислородсодержащей атмосферой, широким проявлением осадочно-диагенетических процессов в обширных акваториях морей и океанов и развитием ураноносных черных сланцев. Процессы механической сепарации на континентах, естественно, сохранились, однако уран в окислительных обстановках мог сохраняться лишь в составе аксессуарных минералов (рутил, циркон и т. п.), а не в форме урановых окислов, как на предыдущем этапе. Преобладающим типом ураноносных бассейнов становятся черносланцевые, охватывая время от позднего протерозоя до девона и проникая далее до квартера (современные ураноносные отложения Черного моря). Этот этап осадочно-диагенетического рудогенеза может быть определен как морской черносланцевый и тип урановых месторождений (МАГАТЭ) — черносланцевый. В обширной сводке [20] подробно рассмотрены геологические особенности урановых месторождений этого типа в России. Следует иметь в виду, что в ряде ураноносных черносланцевых бассейнов в рудогенезе в качестве источника урана принимали прямое или опосредованное участие процессы вулканизма [24].

Третий интервал начинается с выходом растительности из акваторий на сушу. В действие вступают разнообразные гидрогенные процессы в виде экзодиагенеза, эксфильтрации, грунтовой и пластовой инфильтрации в различных структурных обстановках (палеорусле, крыльях артезианских бассейнов и т. д.). Всё это приводит к весьма широкому спектру гидрогенных месторождений, которые можно для удобства объединить термином песчаниковый тип (МАГАТЭ). При этом сохраняются процессы механической сепарации и осадочно-диагенетического рудогенеза. Другими словами, из интервала в интервал спектр промышленно-генетических типов с течением геологического времени по нарастающей становится всё более и более разнообразным. В частности, к осадочно-диагенетическим рудным объектам дополнительно присоединяется (МАГАТЭ) фосфатный тип, а к песчаниковому — лигнитово-угольный и карбонатный типы.

Учитывая подключение процессов вулканизма к «чистому» седиментогенезу в ураноносных осадочных бассейнах, т. е. эндогенных факторов рудогенеза к экзогенным (образование так называемых полигенных руд), сглаживается острота споров между нептунистами и плутонистами об источнике урана в ураноносных осадочных бассейнах. Нередко в осадочных бассейнах складываются такие геологические обстановки, когда правы и те [25] и другие [1]. Примером могут служить месторождения Ергенинского урановорудного бассейна, когда, наряду с отложением черных глин с костными остатками, в олигоцен-миоценовый осадочный бассейн вулканами привносились уран и редкие земли [24].

То же можно сказать и о геотектонических парадигмах приверженцев старой геосинклинальной школы [10], либо новой – тектоники литосферных плит [23]. И в том и другом случаях основой познания закономерностей образования и формирования осадочных ураноносных бассейнов остается литостратиграфия [21] с дополнительным привлечением биостратиграфических и радиологических методов исследования.

Геохимическое своеобразие разновозрастных урановорудных эпох. Практически все крупнейшие урановые месторождения в осадочных бассейнах комплексные. Промышленное значение имеют в них, наряду с типично литофильным ураном, элементы сидерофильной и халькофильной групп. Существование подобных ассоциаций не может быть объяснено близостью физико-химических свойств парагенных элементов. Вклад мантийного источника в качестве непосредственного поставщика рудных элементов нередко проблематичен. Объяснение многообразия геохимического облика комплексных месторождений частными вариациями геологической обстановки малоэффективно. Более продуктивно предположение о едином биогеохимическом процессе формирования многих горных пород и руд, вытекающее из фундаментального положения В. И. Вернадского о земной коре как оболочке, переработанной под воздействием живого вещества. Урановые месторождения могут служить особо показательным примером, так как их формирование в большинстве случаев отчетливо связано с преобразованием геологических формаций, обогащенных органическим веществом. Рассмотрим в хронологическом порядке на примере типовых крупнейших месторождений урана факты, свидетельствующие о связи рудообразования с преобразованием органического вещества, обращая внимание на геохимическое своеобразие рудных ассоциаций каждой эпохи.

Самые древние урановые месторождения представлены Au-U конгломератами PR₁ района Витватерсранд в Южной Африке. В качестве одного из важнейших условий накопления Au и U здесь отмечается наличие водорослевых матов (цианобактерий), развивающихся в речных конусах выноса. Рудные участки в пределах седиментационных рифов ограничены ареалами распространения углерода в виде зерен, прожилок и тонких пропластков. Наиболее богатые рудные скопления приурочены к так называемым углеродистым жилам. Основными урановыми минералами являются уранинит и тухолит. В ряде рудных пластов системы Трансвааль преобладает тухолит – смесь уранинита и твердых углеводородов, преимущественно метаморфизованных гуминовых кислот. Au-U конгломераты весьма характерны для эпикратонных впадин не только Африканского, но и Канадского (Эллиот-Лейк, Бланд-Ривер), Бразильского (Сьера-ди-Жакобина), Балтийского (Коли-Калтимо) щитов и др. Вклад каждого из элементов ассоциации С-Au-U в составе конгломератов варьирует в разных районах, но в целом масштабы накопления этого парагенезиса в отложениях AR–PR₁ уникальны.

Следующая крупная эпоха уранового рудообразования связана с активизацией PR₁ троговых структур и формированием Fe-U месторождений среди железисто-кремнистых формаций. Происхождение Fe-U оруденения связывается с накоплением

рудных элементов в обогащенной C_{орг} песчано-конгломератовой толще и последующим преобразованием в ходе регионального метаморфизма. Среди пород железорудной формации имеются не только мощные прослои графитовых гнейсов, но и промышленные месторождения графита.

В урановорудных провинциях областей протоктивизации важнейшее значение имеют Co-Ni-U полигенные месторождения, связанные с поверхностями региональных несогласий. Крупнейшие месторождения этого типа сосредоточены в провинции Атабаска Канадского щита. В рудах месторождений Ки-Лейк, Клафф-Лейк, Мидуэст-Лейк, Раббит-Лейк, Доон-Лейк, Сигар-Лейк преобладают уранинит и настуран с кобальт-никелевыми сульфоарсенидами. Возраст основной эпохи оруденения 1,35–1,15 млрд лет. Вмещающие породы представлены преимущественно углеродистыми метаосадками с высокими содержаниями Co, Ni, Fe, As. В основании разрезов присутствуют графитизированные гнейсы, возможно, первично представлявшие собой черные сланцы. В ряде случаев (Клафф-Лейк, Мак-Клин, Доминик-Петер) руды обогащены органическим веществом с биогенной изотопной меткой. В других случаях (Раббит-Лейк) углеродистое вещество в рудной зоне полностью уничтожено, и отмечается интенсивная гематитизация. Определенный антагонизм гематита и углерода объясняется окислительным характером рудоносных растворов, обогащенных кислородом и способствующих переводу Fe²⁺ в Fe³⁺ и «выгоранию» углерода [18].

Аналогичные соотношения гематита и углеродистого вещества отмечаются в рудных зонах месторождений несогласия Северо-Австралийской урановорудной провинции. Территория провинции охватывает PR₁ внутрикратонный блок Пайн-Крик с месторождениями преимущественно Cu-Au-U специализации. Вмещающими оруденение породами являются образования PR₁ формаций Голден-Дайк и Кулпин – мощные толщи углеродистых сланцев. Предполагается заимствование части рудного вещества из углеродистых сланцев, частичный привнос из магматогенных источников и преобразование рудных скоплений в близповерхностных условиях.

Изотопное датирование месторождений Северной Австралии указывает на их полихронность – 1,6–0,9–0,5 млрд лет. Минеральный состав рудных тел австралийских месторождений отличается от канадских большей обогащенностью сульфидами меди (халькопиритом, ковеллином, халькозином). Особый интерес представляет феноменальное по масштабам Cu-Au-U месторождение Олимпик-Дам рудного района Роксби-Даунс в Южной Австралии. Здесь вмещающая оруденение толща состоит главным образом из различных по генезису брекчий мощностью до одного километра.

Для Cu-U стратиформных месторождений рифея и венда промышленные содержания Au уже не столь характерны. Известным примером Cu-U ассоциации являются месторождения Медного пояса Южной Африки (Шинколовбе, Калонгве, Нчанга, Нкана и др.). Оруденение локализуется в пределах рудной серии терригенно-карбонатных отложений рифея системы Катанга. Главная часть пород рудной серии представлена углеродисто-кремнистыми сланцами, глинистыми сланцами и аргиллитами. Накопление высоких содержаний Cu и сопутствующих металлов происходило преимущественно в обо-

гашенных органическим веществом породах, формировавшихся в мелководных морских бассейнах с застойным режимом и придонным сероводородным заражением. Возраст уранового оруденения 620–520 млн лет. Рудная минерализация имеет эпигенетический характер, и, хотя происхождение месторождений связывается с полигенным источником, главным поставщиком рудных компонентов считаются обогащенные металлами и углеродистым веществом породы рудной серии.

Образование эндогенных месторождений палеозойских и мезозойских урановорудных провинций связано с преобразованием докембрийского гранито-гнейсового фундамента, полингенным гранитообразованием, вулканизмом, гидротермальной проработкой осадочных отложений. Все эти процессы, хотя и могли быть инициированы мантией, но вовлекали в миграцию прежде всего коровое вещество, т. е. породы, чаще всего прошедшие в своем развитии осадочно-биогеохимический цикл.

Co-Ni специализация глинисто-алевролитовых и черносланцевых пачек монотонной и пестрой серии молданубикума (PR₁₋₂), впоследствии преобразованных в ходе регионального метаморфизма, возможно, отразилась в составе так называемой пятиэлементной формации Co-Ni-Ag-Bi-U месторождений Чешского срединного массива. Для минеральных комплексов поздневарисских (260 ± 15 млн лет) и древнекембрийских (180 ± 20 млн лет) месторождений Западно-Европейской урановорудной провинции характерно присутствие битумов и уран-антракосолитовый парагенезис. В газово-жидких включениях рудных и породообразующих минералов гидротермальных месторождений обнаружено наличие различных органических соединений в ассоциации с ураном. Если летучие углеводороды распространены во всех породах, то аминовые соединения типа аминов и нитрилов низкомолекулярного веса встречаются только в ассоциации с урановыми минералами. Экспериментально установленное повышение растворимости урана в растворах аминовых и нуклеиновых кислот указывает на благоприятные условия миграции урана в присутствии органических соединений.

Очевидно, не случайно широкое распространение сложных углеводородистых соединений и битумов в урановорудных объектах PZ и MZ континентальных вулканогенных поясов. Здесь наиболее типичным спутником урана является Mo. На примере Mo-U и многих других типов гидротермальных месторождений с преобладанием CO₂ в растворах, формирующих продуктивные минеральные ассоциации, оформилось представление об определяющей роли углерода в рудообразующем процессе.

Для состава самых молодых (песчаниковый тип) урановых месторождений, локализованных в терригенных толщах MZ и KZ чехла активизированных древних и молодых платформ, чрезвычайно характерен ванадий, представленный обычно карнотитом. Для рудовмещающих толщ V-U месторождений Колорадо-Вайомингской, Мали-Нигерской, Аргентинской, Западно-Австралийской провинций отмечается обилие растительных остатков сингенетического органического вещества преимущественно гумусного типа. Ряд крупных месторождений расположен по периферии нефтегазоносных районов и содержит в качестве основного восстановителя битумы (Амброзия-Лейк, Джекпайл и др.).

В схеме формирования месторождений, образованных преимущественно пластовыми и грунтовыми поверхностными водами, предполагается также возможность подъема глубинных артезианских вод, способствующих выносу рудных элементов из подстилающих осадочных толщ, обогащенных органическим веществом. Своеобразные поверхностные V-U месторождения блока Иилгарн в Западной Австралии (Йилирри, Сентипид, Лейк-Уэй, Лейк-Мейтленд) и подобные месторождения Намибии и Мавритании сформировались в результате подъема углеводородных рассолов застойных участков и испарения временных потоков в руслах палеодолин в условиях аридного климата.

Таким образом, имеем следующий обобщенный ряд наиболее типичных элементов-спутников в крупных урановых месторождениях: AR-PR₁ – Au; PR – Fe, Co, Ni; R-V – Cu; PZ-KZ – Mo, V. Перечисленные геологические эпохи соответствуют основным металлогеническим эпохам для названных металлов, т. е. значение этого ряда выходит за частные рамки урановой металлогении. Около 50 % золота, добытого человеком за всю историю, извлечено из AR-PR₁ конгломератов. Осадочные и метаморфические месторождения Fe, Co, Ni наиболее типичны для PR. Более 70 % промышленных запасов Cu в медистых песчаниках приходится на R-V. 98 % Mo извлекается из MZ-KZ месторождений, связанных с коровыми гранитоидами.

Для формирования месторождений этих типов, как и большинства других полезных ископаемых, необходимо было участие углерода и углеводородов как в транспортировке рудогенных элементов, так и в ходе рудоотложений [4–8, 12, 14].

Биогеохимические факторы формирования комплексного уранового оруденения в осадочных бассейнах.

Весьма существен факт отчетливой сопоставимости приведенного ряда металлогенической специализации геологических эпох с рядом элементов, намеченных Е. А. Бойченко и др. [4–6] при рассмотрении изменений в концентрировании металлов живыми клетками в ходе эволюции биосферы (табл. 1). Важнейшей особенностью живого вещества является избирательность накопления химических элементов. Из пяти царств органического мира (бактерии, протисты, грибы, растения и животные) более 99 % биомассы составляют бактерии и растения. Большую часть геологической истории главным поставщиком биомассы были водные растения – водоросли, так как наземные растения появились лишь в конце силура. Общее количество металлов, поглощенное растениями и перешедшее в осадочные породы, оценивается $n \times 10^{16}$ т, что на четыре порядка превышает суммарные запасы всех металлов, сконцентрированные в месторождениях. Степень концентрирования элементов в клетках растений по сравнению с содержанием в окружающей среде достигает величин 10^4 – 10^5 .

В ходе исторического преобразования биосферы, благодаря формированию все более эффективных механизмов фотосинтеза, происходило обогащение гидросферы и атмосферы кислородом, усиливающим окислительные процессы в верхней части земной коры (табл. 2). В рудных минералах, содержащих поливалентные металлы, все большую роль стали играть высоковалентные соединения. Этим можно объяснить распространение в MZ-KZ

Таблица 1

Смена наиболее характерных металлов-биокатализаторов в ходе эволюции растений [4–6]

Эпоха	Этапы эволюции	Растения-концентраторы металлов	Биокатализаторы	Степень концентрации в растениях по сравнению с гидросферой
AR	Пробионты	Цианобактерии (синезеленые водоросли)	Fe	105
PR	Прокариоты	Красные водоросли	Co Ni	104 104
R–V	Эукариоты, ранние метафиты	Зеленые водоросли	Cu	104
PZ–KZ	Многочлетные, наземные растения	Бурые водоросли, покрытосеменные	V Mo	103 102

урановых слюдок с U^{6+} не только как вторичных минералов, но и как первичных образований низкотемпературных гидротермальных месторождений, например, в урановые месторождения Бутугычак (Колыма), Северное (Чукотка) и др. В последние годы в составе гидротермальных жил палеозойских месторождений все шире диагностируется нингионит – водный фосфат U и Ca, содержащий U^{5+} [9].

На последовательных этапах эволюции от архея до современного периода живые клетки, стремясь к совершенствованию процессов обмена веществ, выбирали из окружающей среды такие элементы, которые все более эффективно выполняли функции биокатализаторов, металлоферментов. В итоге

изменялся набор металлов, концентрирующихся клетками разного эволюционного уровня, оставая в истории осадочных пород свой биогеохимический след. Каждая крупная геологическая эпоха получила биогеохимическую индивидуальность, затушеванную последующими процессами метаморфизма и магматизма. Физический смысл участия металлов в процессе фотосинтеза сводится к поставке свободных электронов для энергетических преобразований внутри клетки в ходе обмена веществ (метаболизма). Направленность эволюции в сторону всё менее энергоёмких процессов обмена веществ позволяет предположить, что избирательность накопления металлов живой клеткой контролировалась при прочих равных условиях потенциалом ионизации – энергией, которая необходима для отделения электрона от невозбужденного атома. Ряд понижающихся потенциалов ионизации (табл. 2) соответствует ряду специализации биохимических эпох. Согласованность этого ряда с отмеченным порядком явления основных спутников урана позволяет предполагать неслучайный характер генетической связи процессов формирования урановых месторождений с $C_{орг}$. Сам уран, наряду с As, Sb, Hg и др., принадлежит к элементам-токсикантам, блокирующим жизненно важные ферменты, и не мог накапливаться широко в большом количестве в живой клетке, как это предполагает С. Г. Неручев [15] в гипотезе «урановых ударов по биосфере», когда содержания элемента в Мировом океане должны были бы возрасти в сотни тысяч раз. Уран аккумулируется после прекращения жизнедеятельности организмов, что приводит к изменению физико-химических параметров среды миграции, формируя восстановительные барьеры.

Заключение. При рассмотрении пространственно-временной эволюции ураноносных осадочных бассейнов в истории Земли выделены два рубежа принципиального изменения атмосферы

Таблица 2

Связь окислительных процессов в биосфере с геохимическим своеобразием уранового рудообразования

Эпоха	Кислород в атмосфере (%)	Eh при pH = 7 в гидросфере (эВ)	Биокатализаторы (ккал/г-атом)	Тип уранового месторождения с наиболее существенными попутными компонентами руд
AR	0,02	– 0,2	Au 212,6	Au-U конгломератовый (Витватерсранд, Ю. Африка)
PR	0,2	+ 0,3	Fe 181,5 Co 181,2 Ni 175,9	Fe-U метаморфогенный (Кривой Рог, Украина) Co-Ni-U в несогласиях (Сигар-Лейк, Канада)
R–V	2,0	+ 0,5	Cu 178,0 Ag 174,5	Cu-U в песчаниках (Шинколобве, Африка)
PZ–KZ	20	+ 0,8	Se 224,9 Re 181,5 Ge 181,7 Bi 167,9 Mo 167,7 V 155,4 Sc 150,8 Y 147,1 Ce 129,1	Re-U – пластово-инфильтрационные чусарусуйского типа (Инкай, Казахстан) Se-Re-U – гидрогенные кызылкумского типа с эндогенной эксфильтрацией (Учкудук, Узбекистан) V-Cu-Sc-U – гидрогенные карнотитовые, колорадский тип (Грантс, США) Ge-Mo-V-U – урано-угольные пластовые, грунтово-инфильтрационные (Кольджат, Казахстан) Mo-Se-Re-Y-Sc-U – палеодолины с гидротермальной стадией (Далматовское, Витимское, Россия) P-Sc-TR-U – вулканогенно-осадочные скопления костного детрита (Меловое, Казахстан; Шаргадыкское, Россия) V-U приповерхностные в калькретах (Йилирри, Австралия)

и биосферы и разделяемых ими три интервала геологического времени, каждому соответствовали свои геолого-промышленные типы урановых месторождений в осадочных и вулканогенно-осадочных породах. Ураноносные бассейны архея – протерозоя с кластогенным ураном на первом этапе их образования и формирования с возникновением кислородной атмосферы в позднем протерозое сменяются осадочными бассейнами с черносланцевым типом ураноносных отложений. Выход растительности на континенты в силуре – девоне послужил всемерному развитию новых видов геохимических барьеров для урана на фоне продуктивных гидрогенных процессов инфильтрационной и эксфильтрационной направленности. По мере эволюции бассейнов в ходе геологического времени намечается поступательное увеличение в них разнообразия типов урановых месторождений.

Оценка влияния биосферы на геохимический облик осадочных образований указывает на изменчивость в рамках укрупненных геологических периодов геохимической специализации вмещающих пород и руд. Эта изменчивость связывается с биогеохимическим механизмом накопления металлов водными растениями за период более чем 4 млрд лет и с выходом растений на сушу, дополняемая биомассой растений континентов. Устанавливается тенденция избирательного накопления живой клеткой металлов-биокатализаторов, связанная с рядом уменьшающегося с геологическим возрастом потенциала ионизации рудных элементов, участвующих в метаболизме живой клетки. Благодаря биосферному фактору каждая крупная геологическая эпоха получила биогеохимическую индивидуальность, затушеванную последующими процессами метаморфизма и магматизма. Накопленные биосом металлы наследуются эпигенетическими рудными процессами, наложенными на осадочные толщи, и формируют металлогеническое своеобразие различных геологических периодов. В ходе геологического времени смена элементов-спутников крупнейших урановых месторождений хорошо увязывается со спецификой соответствующих биогеохимических эпох: AR-PR₁ – золото; PR – железо, кобальд, никель; R-V – медь; PZ-KZ – молибден, ванадий (табл. 2).

Отметим, что выявленная закономерность далеко не абсолютна и носит статистический характер с целым рядом некоторых отклонений от общей схемы. Тем не менее установленная зависимость геохимической специализации осадочных формаций, обогащенных органическим веществом, от геологической эпохи их формирования позволяет сделать ряд прогнозных предположений. В частности, можно предполагать, что главным источником металлов в гидротермальных месторождениях пятиэлементной формации (Co-Ni-Ag-Bi-U) является метаморфизованный субстрат осадочных пород PR₁. Для гидротермальных месторождений серебра в молодых континентальных вулканогенных поясах архейский фундамент неблагоприятен, так как в его составе нет специализированных на Ag бывших осадочных пород. Для Mo-U месторождений этих поясов предпочтительна переработка R-PZ толщ, так как молибден охотнее концентрируется в рифейских водорослях и в наземной растительности PZ₂₋₃. Не подлежит сомнению разнообразие источников рудных элементов и многофакторность реализации рудообразующего процесса. Влияние

эволюции биосферы на рудосферу не ограничивается экзогенной минерагенией. Вещественный состав руд многих типов эндогенных гидротермальных месторождений также несет в себе биогенную составляющую.

1. *Абрамович И.И.* Металлогения. – М.: ГЕОКАРТ; ГЕОС, 2010. – 328 с.
2. *Басков Е.А., Петров В.В., Иванова Т.К.* Гидрогеология осадочных бассейнов. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1996. – 51 с. – (Осадочные бассейны России; Вып. 2.)
3. *Беленицкая Г.А., Романовский С.И., Феоктистов В.П.* Тектоно-седиментологическое моделирование и прогнозно-минерагенический анализ основных геодинамических групп рудоносных осадочных бассейнов России. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2001. – 144 с. – (Осадочные бассейны России; Вып. 5).
4. *Бойченко Е.А.* Соединения металлов в эволюции растений в биосфере // Изв. АН СССР. Серия биол. 1976. № 3. – С. 378–385.
5. *Бойченко Е.А., Удельнова Т.М., Заринь В.Э.* Значение металлов в эволюции биогеохимических функций растений // Палеонтология докембрия и раннего кембрия. – Л.: Наука, 1979. – С. 246–249.
6. *Бойченко Е.А.* Значение литофильных соединений металлов в эволюции фотосинтеза // Изв. АН СССР. Серия биол. 1985. № 4. – С. 500–507.
7. *Вассоевич Н.Б.* О понятии и термине «осадочные бассейны» // Бюл. МОИП. Отд. геол. 1979. Т. 54. Вып. 4. С. 114–118.
8. *Горжеский Д.И.* О роли органического вещества в рудообразовании // Известия вузов. Геол. и разведка. 1987. № 1. – С. 29–41.
9. Геологи ВСЕГЕИ в создании урановорудной базы страны // ред. Ю.М. Шувалов, Ю.Б. Миронов, А.М. Карпунин. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2006. – 160 с.
10. *Домарев В.С.* Формации рудных месторождений в истории земной коры. – Л.: Недра, 1984. – 168 с.
11. *Казанский В.И., Лаверов Н.П., Тугаринов А.И.* Эволюция уранового рудообразования. – М.: Атомиздат, 1978. – 208 с.
12. *Карпунин А.М.* К вопросу о геохронометрии уранового рудообразования в фанерозое // Материалы по геологии урановых месторождений. 1989. № 121. – С. 103–112.
13. *Карпунин А.М., Миронов Ю.Б., Бузовкин С.В., Соболев Н.Н.* Эпохи уранового седиментогенеза черносланцевого типа в осадочных бассейнах Земли // Отечеств. геология. 2012. № 1. – С. 18–28.
14. Минерагения осадочных бассейнов континентов и периконтинентальных областей. – М., 1998. – 590 с.
15. *Неручев С.Г.* Уран и жизнь в истории Земли. – СПб.: ВНИГРИ, 2007. – 328 с.
16. *Петров Н.Н., Аубакиров Х.Б., Плеханов В.И.* и др. Урановые месторождения Казахстана (экзогенные). – Алматы: Гылым, 1995. – 264 с.
17. *Печенкин И.Г., Грушевой Г.В.* Металлогения ураноносных осадочных бассейнов Евразии. – М.: РИС «ВИМС», 2015. – 224 с.
18. *Пинский Э.М., Лебедев Б.А.* Участие рифейского нефтеобразования в формировании уникальных урановых месторождений типа несогласий в осадочном бассейне Атабаска // Регион. геология и металлогения. 2007. № 32. – С. 167–179.
19. Радиогидрогеологические исследования при прогнозировании и поисках урановых месторождений, связанных с зонами пластового окисления / науч. ред. Г.М. Шор. – Л.: Недра, 1988. – 168 с.
20. Рифовые, соленосные и черносланцевые формации России. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2015. – 624 с. – (Труды ВСЕГЕИ. Нов. серия; Т. 355).
21. *Салон Л.И.* Геологическое развитие Земли в докембрии. – Л.: Недра, 1982. – 342 с.

22. Урановые месторождения Казахстана (эндогенные) / Н.Н. Петров, В.Г. Язиков, Б.Р. Бериеболов. — Алматы: Гылым, 2000. — 532 с.
23. Феоктистов В.П., Иогансон А.К., Неклюдов А.Г. Металлогения осадочных бассейнов. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1997. — 75 с. — (Осадочные бассейны России; Вып. 3).
24. Шарков А.А. Условия образования и генезис стратиформных ураново-редкометалльных месторождений Восточного Паратетиса. — М., 2011. — 184 с.
25. Шумилин М.В. Историческая металлогения урана (опыт глобального анализа). — Иркутск: Изд-во Репроцентр, 2015. — 255 с.
1. Abramovich I.I. Metallogeniya [Metallogeny]. Moscow: GEOKART; GEOS. 2010. 328 p.
2. Baskov E.A., Petrov V.V., Ivanova T.K. Osadochnye bassejny Rossii. Вып. 2. Gidrogeologiya osadochnyh bassejnov [Sedimentary basins of Russia. Iss. 2. Hydrogeology of sedimentary basins]. St. Petersburg: VSEGEI. 1996. 51 p.
3. Belenickaya G.A., Romanovskij S.I., Feoktistov V.P. Tektono-sedimentologicheskoe modelirovanie i prognozno-mineragenicheskij analiz osnovnyh geodinamicheskikh grupp rudonosnyh osadochnyh bassejnov Rossii [Tectono-sedimentological modeling and prognostic-mineragenic analysis of the main geodynamic groups of ore-bearing sedimentary basins of Russia]. St. Petersburg: VSEGEI. 2001. 144 p. (Osadochnye bassejny Rossii. Iss. 5. MPR RF, VSEGEI).
4. Bojchenko E.A. Metal compounds in the evolution of plants in the biosphere. *Izvestiya AN SSSR. Ser. biol.* 1976. No 3, pp. 378–385. (In Russian).
5. Bojchenko E.A., Udel'nova T.M., Zarin' V.Eh. The importance of metals in the evolution of biogeochemical functions of plants. *Paleontologiya dokembriya i rannego kembriya.* Leningrad: Nauka. 1979. Pp. 246–249. (In Russian).
6. Bojchenko E.A. The importance of lithophile metal compounds in the evolution of photosynthesis. *Izvestiya AN SSSR. Ser. biol.* 1985. No 4. Pp. 500–507. (In Russian).
7. Vassoevich N.B. On the concept and term "sedimentary basins". *Byulleten' MOIP. Otd. geol.* 1979. Vol. 54. Iss. 4, pp. 114–118. (In Russian).
8. Gorzhevskij D.I. On the role of organic matter in ore formation. *Izestiya vuzov. Geol. i razved.* 1987. No 1, pp. 29–41. (In Russian).
9. Geologi VSEGEI v sozdanii uranovorudnoj bazy strany [Geologists of VSEGEI in the creation of uranium ore base of the country]. Eds. Yu.M. Shuvalov, Yu.B. Mironov, A.M. Karpunin. St. Petersburg: Izd-vo VSEGEI. 2006. 160 p.
10. Domarev V.S. Formacii rudnyh mestorozhdenij v istorii zemnoj kory [Formations of ore deposits in the history of the earth's crust]. Leningrad: Nedra. 1984. 168 p.
11. Kazanskij V.I., Laverov N.P., Tugarinov A.I. Ehvoljuciya uranovogo rudoobrazovaniya [The evolution of uranium ore formation]. Moscow: Atomizdat. 1978. 208 p.
12. Karpunin A.M. On the question of the geochronometry of uranium ore formation in the Phanerozoic. *Materialy po geologii uranovyh mestorozhdenij.* 1989. No 121, pp. 103–112. (In Russian).
13. Karpunin A.M., Mironov Yu.B., Buzovkin S.V., Sobolev N.N. Epochs of uranium sedimentogenesis of black shale type in sedimentary basins of the Earth. *Otechestvennaya geologiya.* 2012. No 1, pp. 18–28. (In Russian).
14. Minerageniya osadochnyh bassejnov kontinentov i perikontinental'nyh oblastej [Minerageny of sedimentary basins of continents and pericontinental areas]. Moscow. 1998. 590 p.
15. Neruchev S.G. Uran i zhizn' v istorii Zemli [Uranus and life in the history of the Earth]. St. Petersburg: VNIGRI. 2007. 328 p.
16. Petrov N.N., Aubakirov H.B., Plekhanov V.I. et al. Uranovye mestorozhdeniya Kazahstana (ehkzogennye) [Uranium deposits of Kazakhstan (exogenous)]. Almaty: Gylym. 1995. 264 p.
17. Pechenkin I.G., Grushevoj G.V. Metallogeniya uranonosnyh osadochnyh bassejnov Evrazii [Metallogeny of uranium-bearing sedimentary basins of Eurasia]. Moscow: VIMS. 2015. 224 p.
18. Pinsky Eh.M., Lebedev B.A. The participation of Riphean oil formation in the formation of unique uranium deposits of the type of disagreement in the sedimentary basin of Athabasca. *Region. geologiya i metallogeniya.* 2007. No 32, pp. 167–179. (In Russian).
19. Radiogidrogeologicheskie issledovaniya pri prognozirovanii i poiskah uranovyh mestorozhdenij, svyazannyh s zonami plastovogo okisleniya [Radiohydrogeological investigations in forecasting and searching for uranium deposits associated with zones of formation oxidation]. Scientific ed. M.G. Shor. Leningrad: Nedra. 1988. 168 p.
20. Rifovye, solenosnye i chernoslancevye formacii Rossii [Reef, saline and black shale formations of Russia]. St. Petersburg: Izd-vo VSEGEI. 2015. 624 p. (Tr. VSEGEI. Nov. seriya. Vol. 355).
21. Salop L.I. Geologicheskoe razvitie Zemli v dokembrii [Geological development of the Earth in the Precambrian]. Leningrad: Nedra. 1982. 342 p.
22. Uranovye mestorozhdeniya Kazahstana (ehndogennye) [Uranium deposits of Kazakhstan (exogenous)] Eds. N.N. Petrov, V.G. Yazikov, B.R. Beriebolov. Almaty: Gylym. 2000. 532 p.
23. Feoktistov V.P., Ioganson A.K., Neklyudov A.G. Metallogeniya osadochnyh bassejnov [Metallogeny of sedimentary basins]. St. Petersburg. 1997. 75 p. (MPR RAN, VSEGEI).
24. Sharkov A.A. Usloviya obrazovaniya i genezis stratiformnyh uranovo-redkometal'nyh mestorozhdenij Vostochnogo Paratetisa [Conditions of formation and genesis of stratiform uranium-rare metal deposits of Eastern Paratethys]. Moscow: Ros. geol. ob-vo. 2011. 184 p.
25. Shumilin M.V. Istoricheskaya metallogeniya urana (opyt global'nogo analiza) [Historical metallogeny of uranium (experience of global analysis)]. Irkutsk: Reproncentr. 2015. 255 p.

Миронов Юрий Борисович — доктор геол.-минерал. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ¹. <Yuri_Mironov@vsegei.ru>
 Пинский Эдуард Маркович — доктор геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹. <Eduard_Pinsky@vsegei.ru>
 Карпунин Анатолий Михайлович — канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹. <Anatoly_Karpunin@vsegei.ru>

Mironov Yuriy Borisovich — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department, VSEGEI¹. <Yuri_Mironov@vsegei.ru>
 Pinsky Eduard Markovich — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher, VSEGEI¹. <Eduard_Pinsky@vsegei.ru>
 Karpunin Anatolij Mihajlovich — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, VSEGEI¹. <Anatoly_Karpunin@vsegei.ru>

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия.
 A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, 199106, Russia.