УДК 553.2:556.3.01

# О ФОРМИРОВАНИИ УНИКАЛЬНО БОГАТЫХ РУД УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕСОГЛАСИЯ БАССЕЙНА АТАБАСКА (КАНАДА): ГИПОТЕЗА МНОГОЭТАПНОГО ТЕЛЕСКОПИРОВАННОГО ОТЛОЖЕНИЯ РУД

© 2022 г. А. А. Пэк<sup>а,</sup> \*, В. И. Мальковский<sup>а</sup>, В. А. Петров<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Старомонетный пер., 35, Москва, Ж-17, 119017 Россия \*e-mail: pek@igem.ru Поступила в редакцию 15.07.2021 г.

После доработки 01.08.2021 г. Принята к публикации 15.09.2021 г.

Месторождения типа несогласия в канадском протерозойском осадочном бассейне Атабаска с суммарными ресурсами >1.0 млн т урана при среднем содержании 3.58% урана являются наиболее яркими представителями крупномасштабных месторождений с уникально богатыми рудами. Геохронологические данные фиксируют в бассейне Атабаска длительный процесс формирования месторождений. последовательные этапы которого были разделены периодами времени в десятки и сотни миллионов лет. Предполагалось, что основная рудная минерализация сформировалась в самый ранний этап 1590 млн лет назад, последующие же, более молодые геохронологические датировки ~1400, 1270, 1150, 1000-850 млн лет, фиксировали дискретные этапы ремобилизации первичного урана. В статье предлагается гипотеза происхождения уникально богатых руд бассейна Атабаска в результате многоэтапного телескопированного отложения урана в структурных ловушках, созданных на начальном этапе формирования месторождений и впоследствии подновляемых сейсмотектоническими воздействиями. Обоснование многоэтапной интерпретации произведено с использованием методов компьютерного моделирования флюидодинамических условий образования основных структурных типов эксфильтрационных и инфильтрационных месторождений несогласия, локализованных в песчаниках и породах фундамента бассейна соответственно: анализа тектонодинамических обстановок периодического возобновления гидротермальной активности на последовательных этапах формирования месторождений; рассмотрения флюидодинамических процессов мобилизации урана из урансодержащих пород фундамента бассейна. Месторождения эксфильтрационного и инфильтрационного типов формировались в результате противоположно направленного восходящего и нисходящего движения минералообразующих флюидов по зонам разломов в межразломных термоконвективных ячейках. Поскольку процесс межразломной тепловой конвекции происходил в региональном геотермическом поле с фоновым геотермическим градиентом, движущие силы для термоконвективной циркуляции флюидов сохранялись в течение всей протяженной во времени многоэтапной геологической истории формирования месторождений бассейна Атабаска. Мобилизация урана из урансодержащих пород фундамента бассейна могла происходить при движении флюидов по трассе их межразломного перетекания с окислительными условиями в ассоциации с процессами отложения эксфильтрационной и инфильтрационной рудной минерализации на участках контура термоконвективной циркуляции флюидов с восстановительными условиями. Процесс многоэтапного отложения урана, мобилизуемого из фундамента бассейна как на первом, так и на последующих этапах формирования месторождений обусловливал положительную корреляцию ресурсов и содержания урана, которая представляет возможное объяснение происхождения уникально богатых руд месторождений бассейна Атабаска.

*Ключевые слова:* бассейн Атабаска, урановые месторождения, межразломная геотермическая конвекция флюидов

DOI: 10.31857/S001677702201004X

#### введение

Россия занимает по добыче урана пятое место в мире (Живов и др., 2012). Однако, несмотря на значительные (более 650 тыс. т) балансовые запасы (Машковцев и др., 2010), минерально-сырьевая база урана России имеет относительно невысокие качественные показатели: содержание урана на отечественных месторождениях измеряется лишь долями процента (Шумилин, 2015), хотя в мире есть крупномасштабные рудные объекты с процентными содержаниями урана в руде. Поэтому поиск месторождений с богатыми и, соответственно, более "дешевыми" по ценовым категориям ресурсами является актуальной задачей перспективного развития урановой промышленности России (Тарханов, Шаталов, 2009; Афанасьев и др., 2014; Машковцев и др., 2017).

В принятой МАГАТЭ классификации (Geological Classification..., 2018) наиболее ярким представителем крупномасштабных урановых месторождений с богатыми рудами являются месторождения "типа несогласия" (unconformity type), на долю которых в мировом производстве урана приходится около 25%. Основные месторождения несогласия выявлены в урановорудной провинции юго-западной части Канадского щита в протерозойском осадочном бассейне Атабаска с суммарными ресурсами >1.0 млн. тонн U и в урановорудном районе Аллигейтор-Риверс Северо-Австралийского щита в протерозойском осадочном бассейне Комболджи с суммарными ресурсами 460000 тонн U. В обоих бассейнах установлены месторождения мирового класса с запасами урана >100000 тонн, но отличительной особенностью месторождений несогласия в бассейне Атабаска являются уникально богатые руды с содержанием урана вплоть до его самых высоких в мире значений в месторождениях Мак-Артур Ривер (261 тыс. т с содержанием ~ 19.5% U) и Сигар-Лейк (135.04 тыс. т с содержанием ~16.59% U) (Geological Classification..., 2018). Среднее содержание урана в месторождениях несогласия бассейна Атабаска (3.58%) более чем в 8 раз превышает осредненное содержание урана (0.41%) в рудах австралийских месторождений несогласия (Unconformity-related..., 2018). В глобальной сводке на 2016 г. "Мировое распределение урановых месторождений – 2016" (World Distribution..., 2018), в которой обобщены данные по содержанию и запасам 1807 месторождений урана всех классификационных категорий МАГАТЭ, более 90% составляют месторождения с содержанием от 0.01 до 0.5% U. Таким образом, по среднему содержанию урана и его максимальным значениям месторождения несогласия бассейна Атабаска в Канаде контрастно отличаются как от месторождений урана других классификационных таксонов МАГАТЭ, так и от других месторождений несогласия. Эта их отличительная особенность позволяет предполагать, что в глобальной металлогении урана проблема происхождения уникально богатых руд месторождений бассейна Атабаска заключается в особых условиях их формирования в масштабе всего бассейна.

В докладе на Всероссийской конференции, посвященной 90-летию ИГЕМ РАН, авторами была выдвинута гипотеза, в которой предполагалось, что происхождение уникально богатых руд месторождений бассейна Атабаска могло быть следствием телескопированного отложения урана на последовательных этапах формирования месторождений, разделенных периодами времени в десятки и сотни миллионов лет (Пэк и др., 2020). Основанием для этого предположения послужила неоднозначная трактовка исследователями месторождений геохронологических данных о поэтапном омоложении возрастных датировок урановой минерализации, которая допускала возможность их альтернативной интерпретации: 1) как свидетельства ремобилизации ресурсов первичного урана и/или 2) его дополнительного привноса в области рудоотложения (Fayek et al.,  $2002_1$ ; Cuney, 2005; Jefferson et al., 2007<sub>1</sub>). При этом в литературе обсуждалась в основном первая трактовка. прелполагающая, что формирование основного ресурса урана и, соответственно, уникально высокого содержания урана в рудах бассейна Атабаска происходило на начальном этапе геохронологической истории формирования месторождений с переотложением урановорудной минерализации на последующих этапах (Alexandre et al., 2009). Вторая трактовка, допускавшая привнос на последовательных этапах формирования месторождений новых порций урана, насколько известно авторам, в литературе специально не обсуждалась.

В настоящей статье мы предприняли попытку обсуждения гипотезы поэтапного формирования уникально богатых руд месторождений бассейна Атабаска, используя для систематизации определяющих параметров этого процесса разработанную австралийскими учеными концепцию минеральных систем урановых месторождений (Skirrow et al., 2009). Концепция минеральных систем была предложена в (Wyborn et al., 1994) как мультидисциплинарный подход, ориентированный на анализ "всех геологических факторов, которые контролируют формирование и сохранность минеральных месторождений, с особым вниманием к процессам мобилизации рудных компонентов из их источника, транспортирования и аккумуляции в более концентрированной форме и сохранности в последующей геологической истории" (р. 109). Методология минеральных систем использовалась при анализе условий формирования рудных месторождений различных генетических типов (Pirajno, 2009; 2016; Hagemann et al., 2016; Huston, 2016). В приложении к металлогении урана она была использована в (Skirrow et al., 2009) для группировки минеральных систем урановых месторождений по параметрам, "подчеркивавшим общие черты в процессах формирования урановых месторождений", с особым вниманием к условиям транспорта урана водными флюидами: "в формировании почти всех крупных месторождений урана участвовали водные флюиды... различия в геологических обстановках формирования флюидов и путях их миграции предопределяли разнообразие типов урановых месторождений" (р. 2, 17). Принятая в (Skirrow et al., 2009) систематизация параметров урановых минеральных систем конкретизировала известную парадигму "источник — транспорт — отложение" с акцентом на процессах флюидного массопереноса. При изложении материала статьи мы будем использовать ее основные положения с учетом особенностей урановых месторождений бассейна Атабаска.

#### КРАТКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ БАССЕЙНА АТАБАСКА

Урановые месторождения несогласия бассейна Атабаска локализованы, как это отражено в их названии, вблизи региональной поверхности несогласия в подошве протерозойского осадочного бассейна (Пакульнис, Шумилин, 2005; Jefferson et al., 2007<sub>1</sub>; Kyser, Cuney, 2009). Фундамент бассейна сложен архейским-раннепротерозойским комплексом гранитоидов и метаосадочных пород, претерпевших складчатость и метаморфизм от гранулитовой до зеленосланцевой фаций. После завершения орогенного этапа и эрозии на архей-раннепротерозойском фундаменте сформировалась площадная кора выветривания и затем интракратонная впадина, заполненная среднепротерозойскими, в основном кластическими отложениями серии Атабаска, которые претерпели диагенетические преобразования при погружении осадков предположительно до глубины 5-6 км. Пространственное размещение месторождений контролируется крутопадающими разломами в фундаменте бассейна. При этом по структурной позиции месторождений по отношению к поверхности несогласия выделяются два их подтипа: месторождения, локализованные в песчаниках Атабаска на уровне и непосредственно выше поверхности несогласия, и месторождения, локализованные в зонах разломов в фундаменте бассейна на десятки и даже сотни метров ниже поверхности несогласия. Наряду с различием структурной позиции, эти подтипы месторождений отчетливо различаются также по минеральному составу и зональности околорудных изменений (Fayek, Kyser, 1997; Quirt, 2003; Jefferson et al., 2007<sub>1</sub>). Месторождения, рудная минерализация которых локализована по преимуществу в песчаниках Атабаска (Сигар-Лейк, Милуэст, часть рудных тел месторождений Ки-Лейк, Коллинс-Бэй, Мак-Клин, Клафф-Лейк), являются по существу полиметаллическими, характеризуются повышенными содержаниями Ni, Co, Cu, Pb, Mo. По зональности околорудных метасоматических преобразований для них характерна обширная внешняя зона глинистых (гидрослюдистых) изменений с

внутренней зоной хлоритовых изменений. Месторождения, локализованные в породах фундамента (Раббит-Лейк, основная рудная залежь Мак-Артур Ривер, Игл-Поинт, Доминик-Петер, Равен, Хорсшу, часть рудных тел Ки-Лейк), являются практически монометалльными урановыми, в них отмечается лишь повышенное содержание Си при следовых количествах остальных рудных металлов. Для околорудных преобразований характерна обратная зональность с внешней хлоритовой и внутренней глинистой зонами. Эта инвертированная структура зональности метасоматических ореолов рудных залежей, локализованных в различных структурных позициях по отношению к поверхности несогласия, интерпретировалась исследователями месторождений как следствие разнонаправленного - восходящего и нисходящего – движения минералообразующих флюидов по зонам рудоконтролирующих разломов.

В обоих кратко охарактеризованных выше подтипах месторождений отложение урана происходило в результате его осаждения на восстановительном барьере. Образование рудных залежей над поверхностью несогласия происходило в результате реакционного взаимодействия окислительных ураноносных растворов, циркулировавших в толще песчаников, с восстановительными растворами, которые привносились в область рудоотложения при восходящем движении флюидов по зоне рудоконтролирующего разлома. Образование рудных тел под поверхностью несогласия происходило при нисходящем движении окислительных ураноносных растворов по зоне рудоконтролирующего разлома в результате реакционного взаимодействия с восстановительными агентами в фундаменте бассейна (восстановительными растворами, графитовым веществом, минералами двухвалентного железа). Чтобы подчеркнуть принципиальное различие в условиях формирования этих подтипов месторождений несогласия, в англоязычной литературе для их обозначения использовались термины "egress" и "ingress" (дословно "выход" и "вход"), обозначающие направление движения растворов по зонам рудоконтролирующих разломов (Jefferson et al., 2007<sub>1</sub>; Шумилин, 2011). В качестве наиболее близкого по смыслу аналога мы приняли обозначения – рудообразующие системы и соответственно месторождения эксфильтрационного (egress style) и инфильтрационного (ingress style) типов (фиг. 1).

Движущие силы и физический механизм разнонаправленной циркуляции флюидов по зонам рудоконтролирующих разломов при отложении урановых руд месторождений инфильтрационного и эксфильтрационного типов канадские исследователи относили к числу ключевых, но еще не проясненных вопросов: "Как балансировались потоки флюидов в процессах их нисходящего (ingress) и восходящего (egress) течения в разломы и



**Фиг. 1.** Схема зональности метасоматических ореолов и структуры циркуляции флюидов при формировании месторождений эксфильтрационного и инфильтрационного типов (по Jefferson et al., 2007).

из разломов фундамента?" (Jefferson et al., 2007<sub>1</sub>, p. 297). Однако, по свидетельству геохронологических данных, на последовательных этапах формирования месторождений наряду с отложением рудной минерализации, происходило также ее переотложение. Поэтому вопросы о природе движущих сил и физическом механизме циркуляции флюидов относятся не только к процессам формирования рудного запаса месторождений, но ко всем событиям периодического проявления флюидной активности в течение необычно протяженной во времени геологической истории формирования урановых руд в бассейне Атабаска, последовательные этапы которой были разделены периодами времени в десятки и сотни миллионов лет.

#### МНОГОЭТАПНОСТЬ ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ДАТИРОВОК

Первые геохронологические датировки урановой минерализации в бассейне Атабаска были приведены в статье (Hoeve, Sibbald, 1978), опубликованной через 10 лет после открытия первого в бассейне месторождения Раббит-Лейк: "возраст первичной минерализации руд месторождений Клафф-Лейк, Ки-Лейк и Раббит-Лейк отвечает периоду времени приблизительно от 1000 до 1250 млн лет" (р. 1467). К настоящему времени, согласно компиляции в (Chi et al., 2018), число публикаций с геохронологическими данными о возрасте руд месторождений бассейна Атабаска составляет порядка 80.

В статье (Cumming, Krstic, 1992) были приведены сводные данные лаборатории геохронологии канадского университета Альберта по значениям абсолютного возраста восьми месторождений бассейна Атабаска: Сигар-Лейк. Клафф-Лейк. Коллинс-Бей, Даун-Лейк, Игл-Пойнт, Мак-Артур Ривер, Мидуэст, Раббит-Лейк. Для всех месторождений был определен возраст урановой минерализации от 1324  $\pm$  13 до 1379  $\pm$  6 млн лет за исключением месторождения Мак-Артур Ривер, для которого было получено значение возраста 1514 ± 18 млн лет. Принятая авторами интерпретация этих возрастных датировок предполагала, что "отложение первоначальной руды, по крайней мере в случае месторождения Мак-Артур Ривер, происходило около 1514 млн лет назад, отложение же основной части урана или его ремобилизация происходили в течение сравнительно узкого временного интервала от 1325 до 1380 млн лет" (Cumming, Krstic, 1992, р. 1637). В целом же "...Процессы переработки-переотложения руд происходили ~1280, ~1000, ~575 и ~225 млн лет назад. Они могли проявляться в масштабе всего бассейна, затрагивая в какой-то степени все изученные авторами месторождения" (р. 1623).

В статье (Alexandre et al., 2009) приведены систематизированные сведения о результатах определения U/Pb возраста vpанинита и <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar датирования глинистых минералов из проявлений урановорудной минерализации в породах фундамента бассейна и в песчаниках формации Атабаска. По результатам U/Pb датирования уранинита и <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar датирования синрудного иллита формирование первичной рудной минерализации происходило в период времени около 1590 млн лет назад практически одновременно во всех месторождениях бассейна Атабаска, локализованных как в породах фундамента, так и в формации песчаников. Более древние значения возраста отложения первичной рудной минерализации авторы объясняют тем, что "ранее опубликованные значения абсолютного возраста урановых месторождений типа несогласия могли быть искажены в результате потерь радиогенного Pb и Ar, что приводит к занижению оценок возраста и тем самым объясняет значительные вариации в ранее опубликованных датировках" (Alexandre et al., 2009, p. 42).

Для U/Pb датирования использовались образцы с массивным уранинитом из рудного тела в породах фундамента месторождения Мак-Артур Ривер и образцы из рудопроявлений Вирджин-Ривер и Саутвест с рассеянной вкрапленностью заполнения открытых пор и трещин в отложениях серии Атабаска. Для <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar датирования использовались образцы с синрудным иллитом и хлоритом в месторождениях, локализованных в породах фундамента бассейна.

Результаты U/Pb датирования зафиксировали значения возраста уранинита  $1540 \pm 19$  млн лет из месторождения Mak-Артур Ривер и  $1594 \pm 64$  млн лет из рудопроявления Саутвест. Самые древние синрудные иллиты имеют аналогичный  $^{40}$ Ar/ $^{39}$ Ar возраст  $1583 \pm 15$  млн лет. Средневзвешенное значение для этих возрастов составляет  $1588 \pm 15$  млн лет. "Поскольку это значение возраста устойчиво воспроизводится как в месторождениях, локализованных в породах фундамента, так и в месторождениях, локализованных в формации песчаников, он, скорее всего, отвечает времени формирования основного уранинита месторождений бассейна Атабаска" (Alexandre et al., 2009, р. 53).

Наряду с определением возраста основной рудной минерализации авторами было определено также время основных предрудных и пострудных событий, связанных с циркуляцией флюидов в геохронологической истории бассейна Атабаска. Возраст предрудных событий, совпадающих с диагенетическими преобразованиями кластических пород заполнения бассейна, составил в среднем 1675 ± 15 млн лет. В период времени око-

ло 1590 млн лет произошло отложение первичного уранинита, которое предположительно было инициировано процессами тектонической активизации в южном Вайоминге. Затем последовали дискретные проявления процессов циркуляции флюидов, запечатленные в многоэтапных событиях нарушения изотопных систем уранинита и глинистых минералов. Первое такое пострудное событие с возрастом 1525 млн лет, определенное по результатам <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar датирования, было предположительно связано с Мазатзалским орогенезом на современной территории юго-запада США и северной Мексики. Следующее возмущающее событие с возрастом около 1400 млн лет, затронувшее все фазы, датированные <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar методом, предположительно инициировалось другими орогеническими процессами также на современном юго-западе США. Возраст 1275 млн лет назад, зафиксированный изотопными системами всех глинистых минералов и уранинита месторождения Мак-Артур Ривер, близко соответствует времени внедрения основных даек роя Мак-Кензи, которые пересекали бассейн Атабаска 1267 ± 2 млн лет назад. Датировки от 1150 до 1050 млн лет соответствуют Гренвилльскому орогенезу, тогда как возраст от 1000-950 до 850 млн лет может быть отнесен к сборке и распаду суперконтинента Родиния.

Таким образом, геохронологические данные фиксируют в бассейне Атабаска длительный процесс формирования урановых руд и пострудных преобразований, последовательные этапы которого были разделены периодами времени в десятки и сотни миллионов лет. При интерпретации этой геологически длительной эволюции бассейна (Alexandre et al., 2009) предполагают, что основная рудная минерализация сформировалась в самый ранний начальный этап 1590 млн лет назад. Последующие же более молодые геохронологические датировки ~1400, 1270, 1150, 1000-850 млн лет назад фиксировали дискретные этапы ремобилизации первичного урана, которые "были отражением крупномасштабных, возможно, охватывавших весь континент событий, внешних по отношению к бассейну... в частности, удаленных орогенических и тектонических событий". Поэтому многоэтапная история формирования месторождений бассейна Атабаска "должна изучаться как целое, а не как серия разрозненных локальных систем" (р. 58). Это заключение (Alexandre et al., 2009) согласуется с приведенным во Введении представлением авторов настоящей статьи о том, что проблема происхождения уникально богатых руд месторождений бассейна Атабаска заключается в особых условиях их формирования в масштабе всего бассейна.

Интерпретация в (Alexandre et al., 2009) геохронологических данных предполагала по существу одноэтапный процесс формирования рудного

запаса месторождений бассейна Атабаска: "...пострудные события, начиная примерно с 1590 млн лет тому назад, важны, в первую очередь, с точки зрения сохранения уранинитовой минерализации и ремобилизации урана" (р. 57). Альтернативным предположением, которое мы предлагаем обсудить, могла бы быть гипотеза многоэтапного отложения урана. Но из-за отсутствия однозначных критериев для различения процессов отложения и/или переотложения урана геохронологические датировки не могут служить основанием для выбора из альтернативных сценариев одноэтапного или многоэтапного формирования рудного ресурса урановых месторождений бассейна Атабаска. Однако приведенные выше геохронологические данные уверенно обосновывают представление о многоэтапном проявлении на месторождениях в локальных областях отложения/переотложения рудной минерализации устойчиво воспроизводившихся процессов гидротермальной активности, которые позволяют предполагать общность природы движущих сил и механизма циркуляции минералообразующих флюидов.

### ДВИЖУЩИЕ СИЛЫ И МЕХАНИЗМЫ ЦИРКУЛЯЦИИ ФЛЮИДОВ

В качестве возможных движущих сил и механизмов циркуляции флюидов при формировании месторождений несогласия в бассейне Атабаска в литературе рассматривались в основном следующие процессы: 1) *свободной тепловой конвекции*, обусловленной изменением плотности флюидов в термоградиентом поле области фильтрации и 2) *вынужденной конвекции*, обусловленной тектонической деформацией пород бассейна.

Гипотеза тепловой конвекции флюидов как возможного механизма формирования урановых месторождений несогласия была предложена в (Hoeve, Quirt, 1987). В качестве инициирующего условия для возникновения свободной тепловой конвекции предполагалась локальная температурная аномалия, связанная с повышенной теплопроводностью графитсодержащих разломов — "примеси даже незначительного количества графита могут значительно повысить теплопроводность пород" (стр. 166).

Первой широко цитируемой до настоящего времени работой, в которой гипотеза термоконвективного механизма формирования месторождений несогласия была рассмотрена с использованием методов компьютерного моделирования динамики флюидов, была статья (Raffensperger, Garven, 1995). Численные расчеты свободной тепловой конвекции флюидов производились для модели обобщенного образа осадочного бассейна канадских и австралийских месторождений несогласия. Конвективное течение локализовалось в основном в пределах мощного горизонта

песчаников. Возможность глубоко проникающей конвекции флюидов по зонам высокопроницаемых разломов в метаморфические породы фундамента в (Raffensperger, Garven, 1995) не рассматривалась. Поэтому для поиска ответа на поставленный выше вопрос механизме 0 разнонаправленной циркуляции флюидов при формировании месторождений несогласия в бассейне Атабаска нами была принята гипотеза термоконвективной системы с межразломной свободной тепловой конвекцией флюидов, концептуальная модель которой была предложена в (Simms, Garven. 2004).

Гипотеза межразломной конвекции. При наличии в области фильтрации субпараллельных высокопроницаемых разломов структура конвекции самоорганизуется в конвективную ячейку с нисходящей ветвью течения по одному разлому и восходящей ветвью течения по другому разлому. Перетекание флюидов от нисходящей к восходящей ветвям течения происходит по вмещающим межразломным породам. Для такой конвективной ячейки в (Simms, Garven, 2004) был предложен термин "fault-bounded convection cell" ("ограниченная разломами ячейка конвекции"), для которого в русском языке, отклоняясь от буквального перевода, будем использовать не тождественные, но близкие по смыслу к англоязычному оригиналу термины "межразломная конвективная ячейка" или "ячейка межразломной конвекции".

В статье (Simms, Garven, 2004) межразломная циркуляция флюидов была установлена по результатам численных расчетов. Для теоретического анализа этого процесса в (Malkovsky, Pek, 2015) была рассмотрена проблема условий возникновения конвективной неустойчивости в трехмерной молели конвективной ячейки. включаюшей два параллельных высокопроницаемых разлома и слой заключенных между ними пород с меньшей проницаемостью. Проведенное исследование показало, что в такой межразломной конвективной ячейке могут реализоваться два типа конвекции: А и В (фиг. 2). При конвекции типа В контуры циркуляции флюидов локализованы в зонах разломов и параллельны им, т.е. реализуется процесс внутриразломной конвекции без существенного выхода флюидов в межразломное пространство за исключением, возможно, зон динамического влияния разломов. При конвекции типа А по одному из разломов происходит только нисходящее, а по другому разлому – только восходящее течение с обменом флюидами через область пород, заключенную между разломами, т.е. в области фильтрации реализуется процесс межразломной конвекции. Определяющими параметрами для развития межразломной конвекции являются относительные значения проницаемости  $k_{\rm f}/k_{\rm r}$  и ширины  $\delta/h$  зон разломов (где  $k_{\rm f}$  и  $k_{\rm r}$  – значения



Фиг. 2. Схема конвективной циркуляции растворов в межразломной конвективной ячейке.

проницаемости зон разломов и вмещающих пород между разломами,  $\delta$  и h – ширина и высота зон разломов). При принятых в теоретической модели (Malkovsky, Pek, 2015) типовых значениях  $k_{\rm f}/k_{\rm r} = 10-50$  и  $\delta/h \le 10^{-2}$  оптимальным условием для развития межразломной конвекции является значение относительной ширины конвективной ячейки 2l/h = 0.6 - 0.8 (где 2l – расстояние между разломами, см. фиг. 2). При этом межразломная циркуляция растворов может происходить даже при низкой проницаемости пород между разломами, недостаточной для развития конвекции в отсутствие разломов. Этот результат теоретического анализа конвективной неустойчивости, согласующийся с результатами качественных оценок структуры конвекции в (Simms, Garven, 2004), позволил предполагать, что процесс межразломной конвекции может быть привлечен как возможное объяснение для ответа на поставленный выше вопрос о том, как "балансировались" потоки флюидов при формировании эксфильтрационных и инфильтрационных месторождений бассейна Атабаска. Для обоснования этого предположения нами было проведено численное моделирование процесса свободной тепловой межразломной конвекции флюидов в концептуальной модели условий формирования урановых месторождений бассейна Атабаска (Pek, Malkovsky, 2016; Пэк, Мальковский, 2017).

В качестве модели геологической структуры области фильтрации был принят трехслойный разрез (фиг. 3), в котором средний слой представляет хорошо проницаемый водоносный горизонт мощностью 100 м, сложенный в основном кварцевыми песчаниками серии Атабаска, нижний слой – низкопроницаемые метаморфические породы фундамента, верхний – экранирующие низкопроницаемые песчано-глинистые сланцы (Jefferson et al., 2007<sub>1</sub>; Пакульнис, Шумилин, 2005). Нижняя граница слоя песчаников отвечает поверхности несогласия, от нее в породы фундамента проникают два вертикальных высокопроницаемых разлома протяженностью 5 км и поперечной мощностью 100 м. В начальный момент времени давление флюидов в области моделирования — гидростатическое, давление на верхней границе области моделирования – фиксированное, боковые границы – непроницаемые. Температура линейно возрастает с глубиной с геотермическим градиентом 30°С/км. Для температуры на границе поверхности несогласия, по данным о результатах изучения флюидных включений (Куser, Cuney, 2009), принято значение 200°С. В качестве начального условия для развития в области моделирования тепловой конвекции, в соответствии с представлениями (Hoeve, Quirt, 1987), была принята повышенная теплопроводность одного из разломов (разлома F<sub>1</sub> на фиг. 3) при фоновом значении теплопроводности остальных структурных элементов модели. Задача моделирования заключалась в расчете структуры термоконвективных течений флюидов в зависимости от вариаций переменных параметров модели.

По результатам тестовых расчетов была определена базовая модель, после чего рассматривалось последовательное воздействие на структуру течения флюидов изменения значений ее варьируемых параметров: расстояния между разлома-



Фиг. 3. Схема области моделирования.

ми L, вертикальной протяженности разломов H, проницаемости разломов  $k_f$ , проницаемости горизонта песчаников  $k_s$  и пород фундамента бассейна  $k_b$ .

На фиг. 4 приведен пример структуры межразломной конвекции флюидов в базовой расчетной модели с представительными для бассейна Атабаска значениями геометрических и фильтрационных параметров. Можно видеть, что в модели самоорганизуется ячейка межразломной конвекции. Контур межразломной циркуляции флюидов включает: сосредоточенный восходящий поток эксфильтрации растворов по разлому  $F_1$  модели, латеральное перетекание растворов по горизонту песчаников до входа в зону разлома  $F_2$ , сосредоточенный нисходящий поток инфильтрации растворов по разлому  $F_2$  и замыкающее конвективную ячейку рассредоточенное перетекание растворов по породам фундамента между зонами разломов  $F_2$  и  $F_1$ . Образование рудных тел над поверхностью несогласия в этой модели происходит в результате смешения восходящего по зоне разлома *F*<sub>1</sub> эксфильтрационного потока восстановительных растворов с окислительными ураноносными растворами, циркулирующими в толще песчаников. Образование рудных тел под поверхностью несогласия происходит в результате реакционного взаимодействия нисходящих по зоне разлома F<sub>2</sub> инфильтрационных окислительных ураноносных растворов с восстановительными агентами в фундаменте бассейна. Вследствие пространственной разобщенности восстановительных барьеров, образование обоих типов рудной минерализации происходит на различных участках области рудолокализации, но гипотеза межразломной конвекции позволила нам предложить объяснение условиям

гидродинамической сопряженности рудообразующих процессов.

При моделировании, наряду с определением структуры циркуляции, рассчитывались также значения скорости течения флюидов. В структуре конвекции флюидов на фиг. 4 нисходящая ветвь конвективной ячейки по разлому F<sub>2</sub> может быть аппроксимирована линейным потоком, ограниченным в поперечном сечении шириной зоны разлома. Поэтому данные о скорости течения флюидов по нисходящей ветви конвекции были использованы для оценки потенциальной рудопродуктивности механизма термоконвективной циркуляции рудообразующих флюидов. При принятых в базовой модели значениях параметров и содержании урана в рудообразующих флюидах бассейна Атабаска  $10^{-4}$  моль/л (Richard et al, 2011) для формирования месторождения инфильтрационного типа с запасами ~50000 урана потребуется около 160 тысяч лет, при увеличении на порядок значений проницаемости зон разломов этот срок сокращается до 16 тысяч лет.

Таким образом, приведенные в (Pek, Malkovsky, 2016; Пэк, Мальковский, 2017) результаты позволили предложить трактовку термоконвективного механизма гидродинамически сопряженного процесса отложения эксфильтрационной и инфильтрационной рудной минерализации, согласующуюся с геологически реалистичными оценками запасов и длительности формирования урановых месторождений бассейна Атабаска. Однако в геохронологическом контексте эта трактовка предполагает одноэтапный процесс рудоотложения. Поэтому для альтернативной гипотезы многоэтапного отложения урана необходимо рассмотреть возможность дискретной реализации механизма термоконвективной межразломной циркуляции флюидов, который сопровождался, как было сказано



Фиг. 4. Структура конвекции флюидов в базовой модели.  $k_{\rm b} = 10^{-16} \,{\rm m}^2$ ,  $k_{\rm s} = 10^{-14} \,{\rm m}^2$ ,  $k_{\rm c} = 10^{-16} \,{\rm m}^2$ ,  $k_{\rm f} = 10^{-14} \,{\rm m}^2$ ,  $H = 5000 \,{\rm m}$ ,  $L = 4000 \,{\rm m}$ .

выше, устойчиво воспроизводившимися процессами отложения/переотложения рудной минерализации.

Если процессы флюидного тепломассопереноса на последовательных этапах формирования месторождений интерпретировать как дискретные проявления гидротермальной активности флюидодинамической системы бассейна Атабаска, то в соответствии с уже приводившейся ранее выдержкой из статьи (Alexandre et al., 2009) поэтапная геохронологическая история такой системы "должна изучаться как целое, а не как серия разрозненных локальных систем" (р. 58). Следуя этой рекомендации, объединяющей разобщенные во времени, но, тем не менее, устойчиво воспроизводившиеся процессы флюидного тепломассопереноса, флюилодинамическая система бассейна Атабаска должна была обладать общностью движущих сил и механизмов циркуляции флюидов в течение почти миллиарда лет.

Межразломная геотермическая конвекция. Свободная тепловая конвекция вызывается термогравитационными (архимедовыми) движущими силами, обусловленными зависимостью плотности флюида от температуры. В обсуждаемой гипотезе формирования урановых месторождений бассейна Атабаска процесс межразломной свободной тепловой конвекции флюидов инициировался, как это предполагалось в (Hoeve, Ouirt, 1987), локальным повышением температуры, которое возникало вследствие повышенной теплопроводности зоны графитсодержащих разломов. Однако приведенные в (Malkovsky, Pek, 2015) результаты теоретического анализа условий возникновения конвективной неустойчивости в трехмерной модели межразломной конвективной

ячейки (см. фиг. 2) показали, что наличие в области фильтрации локальной температурной аномалии не является необходимым условием. При субкритических значениях проницаемости пород области моделирования, недостаточных для развития свободной тепловой конвекции в отсутствие разломов, триггерным условием для возникновения межразломной термоконвективной циркуляции является увеличение проницаемости зон разломов до значений, превышающих критические условия для возникновения межразломной тепловой конвекции. Поэтому при наличии в палеогидротермальной системе высокопроницаемых разломов межразломная термоконвективная циркуляция флюидов может инициироваться и поддерживаться в региональном геотермическом поле с фоновым геотермическим градиентом, т.е. как процесс, который может быть определен терминологически как межразломная геотермическая конвекция. Если свободная тепловая конвекция флюидов происходит по механизму геотермической конвекции, то длительность действия ее движуших сил определяется временем существования геотермического градиента. Поэтому во флюидодинамической системе с межразломной геотермической конвекцией, гидродинамические условия для периодической термоконвективной циркуляции флюидов могли возобновляться в бассейне Атабаска неоднократно в течение геологически длительного периода времени. Однако триггерным условием для их активизации, наряду с действием движущих сил, является, как о том было сказано выше, повышенная проницаемость зон разломов.

Проницаемость зон разломов. Поскольку геохронологические данные о поэтапной гидротер-

мальной активности зафиксированы в рудной минерализации месторождений, структура разнонаправленной циркуляции флюидов по зонам разломов на последовательных этапах геологической истории бассейна Атабаска была, скорее всего, аналогичной установленной при образовании эксфильтрационных и инфильтрационных месторождений (см. фиг. 1). Значительные рудные запасы этих месторождений свидетельствуют о высокой проницаемости зон разломов в период рудоотложения. Поэтому можно предполагать, что процессы поэтапной циркуляции флюидов происходили также по зонам высокопроницаемых разломов. Периодическая активизация проницаемости зон разломов предположительно ассоциировалась в бассейне Атабаска с "удаленными орогеническими и тектоническими событиями" (Alexandre et al., 2009). Реактивация смещений по разломам и увеличение их проницаемости, обусловленные тектоническими деформациями пород, неизбежно оказывали влияние также на процессы тепловой конвекции и на движущие силы для миграции флюидов. Поэтому в работах по компьютерному моделированию исследователями месторождений было проведено систематические изучение влияния на структуру циркуляции флюидов процессов свободной тепловой конвекции и режимов тектонической деформации бассейна Атабаска.

Так, в статье (Cui et al., 2012) были рассмотрены процессы циркуляции флюидов в обобщенных численных моделях свободной тепловой конвекции и тектонических режимов субгоризонтального сжатия и растяжения канадских бассейнов Атабаска и Телон, а также австралийского бассейна Комболджи. В отсутствие деформаций в высокопроницаемом горизонте песчаников формируются ячейки конвекции как в модели (Raffensperger, Garven, 1995). В условиях воздействия деформаций тепловая конвекция в песчаниках угнетается. Деформации растяжения инициируют нисходящее движение урансодержащих окислительных флюидов из горизонта песчаников по зонам разломов в фундамент бассейна с потенциальной возможностью формирования месторождений инфильтрационного типа. Деформации сжатия инициируют восходящее движение восстановительных флюидов по зонам разломов до их смешения с урансодержащими флюидами в горизонте песчаников с потенциальной возможностью формирования месторождений эксфильтрационного типа. Таким образом, в (Cui et al., 2012) были воспроизведены возможные варианты восходящего и нисходящего движения флюидов по зонам разломов с потенциальной возможностью формирования месторождений несогласия, но при различных режимах тектонических деформаций.

Однако если предполагать, что региональные режимы тектонических деформаций сжатия и

растяжения сменяли друг друга в масштабе бассейна Атабаска поэтапно, то они должны были бы зафиксироваться в поэтапном различии возрастных датировок месторождений инфильтрационного и эксфильтрационного типов. Отсутствие таких систематических различий свидетельствует скорее в пользу представления о пространственновременной сопряженности процессов формирования месторождений, чем о поэтапной разобщенности процессов их формирования.

Поскольку в бассейне Атабаска основными типами тектонической активизации зон разломов в синрудный и пострудный периоды были сдвиговые и взбросовые перемещения (Jefferson et al., 2007<sub>1</sub>), в статьях (Li et al., 2017, 2018) было проведено систематическое рассмотрение влияния режимов тектонического сжатия территории бассейна на структуру тепловой конвекции флюидов. В статье (Li et al., 2017) проведен численный расчет влияния на течение флюидов последовательно возраставшего горизонтального сжатия трехслойной модели с нижним слоем, представлявшим низкопроницаемые породы фундамента бассейна, средним слоем – проницаемые песчаники и верхним слоем – низкопроницаемые экранирующие породы. Напряжения сжатия прилагались к боковым поверхностям модели, содержавшей наклонный высокопроницаемый разлом в фундаменте бассейна, до достижения итоговой 2% деформации. Варьируемыми параметрами были задаваемые в начальных условиях углы падения разлома и амплитуды вертикального смещения по нему поверхности несогласия. Полученные результаты позволили заключить, что приложение напряжений сжатия вызывает сначала восходящее движение флюидов по зонам разломов, как в моделях (Cui et al., 2012), обусловленное более быстрым нарастанием порового давления в малопроницаемых породах фундамента по сравнению с более проницаемыми песчаниками. При достижении уровня деформации > 0.6% дилатансионное увеличение трещинно-порового пространства и декомпрессия в зонах разломов обусловливает приток в них нисходящих флюидов из горизонта песчаников. Таким образом, режим нарастающего тектонического сжатия может приводить к последовательному формированию месторождений сначала эксфильтрационного, а затем инфильтрационного типов. Изменения значений варьируемых параметров не оказывают значительного влияния на характер циркуляции флюидов.

В статье (Li et al., 2018) в качестве прототипов для моделирования были приняты территориально близко расположенные месторождения Феникс и Грифон с общим для них полем региональных тектонических напряжений сжатия, но с различной локализацией рудной минерализации по отношению к поверхности несогласия: на месторождении Феникс – в песчаниках Атабаска, на месторождении Грифон – в породах фундамента. Локализация обоих месторождений контролируется зонами разломов со смещениями поверхности несогласия: на месторождении Феникс – менее 10 м, на месторождении Грифон – до 60 м. Результаты компьютерных расчетов деформационных преобразований и миграции флюидов, произведенных с учетом реологического контраста в петрофизических свойствах пород месторождений в фундаменте бассейна, позволили воспроизвести различия в масштабе взбросовых смещений и в структуре движения флюидов по зонам разломов: восходящего на месторождении Феникс и нисходящего на месторождении Грифон. Таким образом, если в (Li et al., 2017) было показано, что в реактивируемых разломах фундамента смена эксфильтрационного и инфильтрационного режимов рудоотложения может быть обусловлена последовательно нарастающей тектонической деформацией сжатия, то в (Li et al., 2018) авторы дополняют эти результаты объяснением возможности формирования в общем для месторождений тектоническом поле сжимающих напряжений одновременно эксфильтрационной и инфильтрационной рудной минерализации в зависимости от реакции разрывных нарушений на деформации сжатия и локальных различий в петрофизических свойствах пород фундамента бассейна.

В статье (Li et al., 2020) приведены результаты численного моделирования миграции флюидов при различных сочетаниях действия движущих сил тектонической деформации и свободной тепловой конвекции в обобщенной модели канадских и австралийских месторождений несогласия. Постановка задачи моделирования близка к принятой в (Li et al., 2017). Последовательно рассматривались базовые модели: 1) только тепловой конвекции, 2) тепловой конвекции с последующей деформацией сжатия и 3) деформации сжатия с последующей тепловой конвекцией. В моделях с только тепловой конвекцией циркуляция флюидов самоорганизуется в ячейки конвекции, локализованные в горизонте песчаников, как это представлено в (Raffensperger, Garven, 1995; Cui et al., 2012). В моделях с сочетанием тепловой конвекции с последующей деформацией сжатия варьировались значения скорости деформации. При быстрой деформации тепловая конвекция подавляется уже начиная с деформации 0.5%, после чего во всей модели устанавливается восходящее движение флюидов; при деформации 2% в горизонте песчаников появляются признаки термоконвективных течений, но продолжает господствовать компрессионный режим общего сжатия с восходящим движением флюидов; при деформации 3% процессы дилатансии вызывают нисходящее движение флюидов по зоне разлома как в (Li et al., 2017), но при этом в горизонте песчаников фиксируются отчетливые структуры термоконвективной циркуляции флюидов. В моделях с медленной деформацией сжатия с последующей тепловой конвекцией, в отличие от модели с быстрой деформацией, не происходит подавления тепловой конвекции. В области моделирования вплоть до деформации 2% на фоне общего сжатия происходит восходящее движение флюидов по зоне разлома, но при сохранении их термоконвективной циркуляции в горизонте песчаников; при деформации 3% процессы дилатансии приводят к развитию структуры циркуляции флюидов, как и при быстрой деформации с нисходящим движением флюидов по зоне разлома при сохранении термоконвективной циркуляции в горизонте песчаников. В моделях, имитировавших сочетание деформации сжатия с последующей тепловой конвекцией, сначала достигался уровень общей деформации 3%, после чего инициировался процесс свободной тепловой конвекции. При этом во всех случаях происходил возврат к структуре термоконвективной циркуляции флюидов, как в модели с только тепловой конвекцией флюилов.

По результатам проведенных моделирующих расчетов в работе (Li et al., 2020) авторы приходят к заключению, что основным механизмом циркуляции флюидов в многоэтапной геохронологической истории формирования месторождений несогласия был процесс свободной тепловой конвекции. "Действие движущих сил тектонической деформации было относительно кратковременным и скорее всего не могло обеспечить притока количества флюидов, необходимого для формирования крупных урановых месторождений несогласия". "Предполагается, что во время периода тектонической активизации, связанного с удаленным тектоническим событием, реактивация деформации сжатия создавала проницаемость зон разломов в фундаменте бассейна, вызывая приток флюидов к зонам дилатансии, после чего в асейсмические периоды господствовала тепловая конвекция".

Обоснование в (Li et al., 2020) представления о механизме активизации проницаемости зон разломов ("во время сейсмических периодов косейсмические разрывы зон разломов создавали проницаемость с развитием трещин и зон разрушения"), созвучное с нашими представлениями о сейсмодислокационном механизме миграции рудоносных растворов при формировании урановых (Петров и др., 2008) и золоторудных (Злобина и др., 2020) месторождений, показывает, что в периоды воздействия на флюидодинамическую систему бассейна Атабаска удаленных орогенических и тектонических событий проницаемость зон разломов могла возрастать до значений, удовлетворяющих критическому условию для инициации и поддержания межразломной геотермической конвекции флюидов. Однако такая интерпре-

тация еще не достаточна для проведения различий между альтернативными трактовками одноэтапного или многоэтапного формирования уникально богатых руд урановых месторождений бассейна Атабаска, поскольку остается невыясненным основной вопрос о процессах отложения и/или переотложения урана.

# ОТЛОЖЕНИЕ И/ИЛИ ПЕРЕОТЛОЖЕНИЕ УРАНА

Вследствие отсутствия однозначных критериев для различия процессов отложения и переотложения урана, геохронологические датировки приводятся в литературе многими исследователями месторождений с упоминанием о возможности их альтернативной интерпретации: "...каждая стадия урановой минерализации может представлять новую стадию отложения минералов из урансодержащих растворов или локальную перекристаллизацию и изменение изотопных систем ранее образовавшихся минералов в результате миграции флюидов под воздействием конкретных глобальных тектонических событий" (Fayek et al., 2002<sub>2</sub>, p. 1563). Такая интерпретация геохронологических данных обусловлена тем, что в рудах с последовательно отлагавшимися генерациями уранинита затруднительно выявить вклад "дополнительного" урана на фоне его пространственного совмещения с омоложением возрастных датировок первичного уранинита. Это затруднение возникает вследствие отличительно присущего месторождениям бассейна Атабаска телескопированного отложения продуктов последовательных этапов рудной минерализации: хотя "в одном и том же месторождении могут встречаться оксиды U различного возраста... остается не ясным, нужны ли многочисленные стадии отложения урана для объяснения больших запасов и высокого содержания руд этих месторождений" (Cuney, 2005, рр. 246-247). Однако уникальный пример месторождения Кианна из группы месторождений тренда Ши-Крик в западной части бассейна Атабаска (Sheahan et al., 2016) позволяет предложить свидетельство геологически обоснованного исключения из модальности процесса телескопированного отложения уранинита с обоснованием формирования эксфильтрационных и инфильтрационных рудных тел месторождения в пространственно разобщенных областях рудоотложения.

Кианна является в настоящее время единственным примером месторождения, в котором в одном объекте полноценно представлены рудные тела всех трех основных типов структурной локализации месторождений бассейна Атабаска (endmember styles of mineralization): 1) эксфильтрационное "подвешенное" (perched) рудное тело в горизонте песчаников примерно в 30 м над поверхностью несогласия, 2) эксфильтрационное рудное тело, локализованное непосредственно над и под поверхностью несогласия, и 3) два инфильтрационных рудных тела в породах фундамента – "верхнее" в интервале глубин от 50 до 175 м и "нижнее" в интервале глубин от 230 до 240 м от поверхности несогласия. Поэтому "месторождение Кианна обеспечивает уникальную возможность для изучения на одном месторождении всех трех стилей рудной минерализации, которые ранее наблюдались в различных участках по всему бассейну, и связать эти стили в одну согласованную металлогеническую модель" (Sheahan et al., 2016, р. 226).

По геохронологическим данным формирование урановой минерализации месторождения происходило в 6 этапов. Наиболее древний возраст 1495  $\pm$  26 млн лет зафиксирован в уранините U1 верхнего инфильтрационного тела. В образцах уранинита U2 из нижнего инфильтрационного тела установлен возраст 1280  $\pm$  30 млн лет. Возраст уранинита U3 в верхнем инфильтрационном теле 1088  $\pm$  22 млн лет, уранинита U4 в верхнем инфильтрационном теле 1088  $\pm$  22 млн лет, уранинита U4 в верхнем инфильтрационном теле 855  $\pm$  27 млн лет. U–Pb возраст уранинита U5 в образцах из "подвешенной" рудной минерализации и из рудного тела, локализованного вдоль поверхности несогласия, 739  $\pm$  58 млн лет. Возраст уранинита U6 из этих эксфильтрационных рудных тел 482  $\pm$  11 млн лет.

Текстурные взаимоотношения между U1 и U4 допускают возможность переотложения U2–U4 после отложения первичной минерализации U1 ~ ~ 1500 млн лет назад. Однако у исследователей месторождений не вызывает сомнений инфильтрационное происхождение U1–U4 в рудных телах, "сформировавшихся в результате инфильтрации (ingress) урансодержащих окислительных флюидов при их миграции по зонам разломов и взаимодействии с породами фундамента" (Sheahan et al., 2016, p. 248). U5 в рудном теле, локализованном вдоль поверхности несогласия, возможно также подвергался переотложению около ~ 750 млн лет назад, но его образование происходило по механизму формирования эксфильтрационных месторождений: "восстановительные флюиды продвигались из фундамента вверх по разлому пока не вступали во взаимодействие на поверхности несогласия с ураноносными окислительными флюидами бассейна с отложением в зоне несогласия уранинитовой минерализации эксфильтрационного типа" (Sheahan et al., 2016, р. 249). U6 в "подвешенной" рудной минерализации отлагался с образованием кайм обрастания зерен U5, что "свидетельствовало о наличии в бассейне окисленных урансодержащих флюидов около 500 млн лет назад" (Sheahan et al., 2016, p. 247).

Таким образом, пример месторождения Кианна позволяет обосновать представление о возможном привносе урана в месторождения бассейна Атабас-



**Фиг. 5.** График корреляции ресурсов и содержаний урана для месторождений несогласия Канады (Живов и др., 2012; рис. 5.7).

ка не только на начальном, но также и на последуюших этапах геологической истории формирования месторождений с разрывом во времени, как на месторождении Кианна, до ~ 1 млрд лет. Предполагаемые (inferred) ресурсы месторождения Кианна более 500000 тонн при содержании 1.36% U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>. Этот весьма значительный рудный ресурс распределен между четырьмя рудными телами, совокупный объем которых определяет в итоге относительно невысокое среднее содержание урана в рудах месторождения. Однако представляется вполне очевидным, что если бы этот рудный ресурс был сосредоточен в одном рудном теле с многократно меньшим объемом области рудолокализации, то содержание урана в рудах месторождения было бы соответственно многократно более высоким. Отмечавшееся выше характерное для месторождений бассейна Атабаска телескопирование продуктов последовательных этапов отложения/переотложения рудной минерализации свидетельствует о практически неизменном объеме областей минералоотложения, созданных на начальном этапе формирования месторождений. Поэтому, если привнос новых порций урана происходил в основном в те же области, в которых были локализованы продукты предшествующих этапов отложения урановой минерализации, то он должен был приводить к сопряженному увеличению в месторождениях ресурсов и содержания урана. Именно такая положительная корреляция ресурсов и содержания урана была выявлена в (Живов и др., 2012) для месторождений бассейна Атабаска (фиг. 5) по результатам анализа базы данных Мирового распределения урановых месторождений (World Distribution..., 2009). Эту необычную для рудных месторождений корреляцию запасов и содержания руд, наряду с приводившимися ранее сведениями о повышенном осредненном содержании урана в рудах месторождений бассейна Атабаска и его уникально высоком содержании в месторождениях Мак-Артур Ривер и Сигар-Лейк, мы рассматриваем как аргумент, свидетельствующий в пользу гипотезы о многоэтапности формирования урановой минерализации на фоне телескопированного поступления рудоносных растворов в первоначально образованные и подновляемые сейсмотектоническими воздействиями структурные ловушки. Однако предположение о возможности привноса в месторождения новых порций урана в течение более чем 1 млрд лет с очевидностью ставит вопрос об его источнике.

#### ИСТОЧНИКИ УРАНА

В продолжающейся уже более 40 лет дискуссии утвердились две основные гипотезы, предполагающие поступление урана в результате его мобилизации из песчаников Атабаска и/или из пород метаморфического фундамента бассейна (Hoeve, Sibbald, 1978; Fayek, Kyser, 1997; Cuney et al., 2003; Hecht et al., 2003; Jefferson et al., 2007<sub>1</sub>; Kyser, Cuney, 2009). Песчаники Атабаска рассматривались канадскими геологами как основной источник урана, поскольку окислительные поровые флюиды песчаников были основным транспортным агентом для переноса, мобилизации и отложения урана. В настоящее время содержание урана в песчаниках Атабаска ≤ 1 г/т с локализацией урана на 50-80% в зернах обломочного циркона (Cuney et al., 2003). Однако, поскольку отложения бассейна Атабаска формировались в результате эрозии метаморфических пород Гудзонского орогена с содержанием урана в источнике сноса от 5 до 20 г/т (Jefferson et al., 2007<sub>1</sub>), они могли быть исходно также обогащены ураном. В статье (Fayek, Kyser, 1997) был произведен балансовый расчет, который позволил заключить, что при предположении исходного содержания урана в песчаниках Атабаска 70 г/т количество мобилизованного урана многократно превосходило суммарные ресурсы месторождений бассейна. Предполагалось, что мобилизация урана происходила в результате его выщелачивания из урансодержащего циркона: "окислительные рассолы бассейна вполне

могли растворять обломочный циркон, что приводило к высвобождению урана из его структуры" (с. 654). Однако эта оценка не согласуется с позднее установленными данными, свидетельствовавшими не о выщелачивании, а об обогащении ураном диагенетически измененных зерен обломочного циркона (Cuney et al., 2003). Из числа других урансодержащих минералов песчаников Атабаска основным минералом для мобилизации урана был монацит, диагенетическая трансформация которого сопровождалась образованием алюмофосфатных минералов, обедненных U, но обогащенных Th и редкоземельными элементами (Jefferson et al., 2007<sub>1</sub>).

В фундаменте бассейна источником урана могли быть обогащенные Th, K и U высококалиевые щелочные гранитоиды и пегматиты. Основным носителем урана в них был также монацит, из которого уран мог выщелачиваться диагенетическими рассолами с 75% эффективностью (Сиney et al., 2003). Процесс выщелачивания урана сопровождался образованием четких контактов между реликтовым монацитом и новообразованными мелкими зернами Th-силикатов и происходил, по-видимому, по механизму "растворения монацита с переотложением Th-силикатов в том же объеме" (Hecht, Cuney, 2000, p. 792).

Наряду с процессами вышелачивания монацита, которые прослеживаются на глубину до 200 м от уровня поверхности несогласия, возможным источником урана в фундаменте бассейна могли быть рудопроявления оксидов урана более древнего возраста. На месторождении Миллениум в одной из текстурных разновидностей урановой минерализации был установлен рассеянный уранинит с U/Pb возрастом от 1770 до 1650 млн лет, т.е. старше первого этапа отложения урановых руд в бассейне Атабаска. Эти возрастные датировки, близкие к возрастному диапазону формирования жильных рудных тел месторождений соседнего урановорудного района Биверлодж, засвидетельствовали "наличие в фундаменте бассейна источника урановой минерализации, предшествовавшего первичным событиям минералоотложения в бассейне Атабаска" (Fayek et al., 2010, p. 5).

В концепции одноэтапного формирования месторождений бассейна Атабаска реалистично предполагать, что уран мог поступать в рудообразующую систему как из песчаников Атабаска, так и из фундамента бассейна: "монацит определенно играл роль источника РЗЭ, Sr и U, будь то из пород заполнения, фундамента бассейна или обоих" (Kyser, Cuney, 2009, р. 178). Однако для гипотезы о многоэтапном отложении урана необходимо, чтобы привнос урана происходил не только на начальном, но и на последующих этапах формирования месторождений. Если такое периодическое поступление дополнительных порций урана происходило с интервалами времени в десятки и сотни миллионов лет, то его единственным геологически реалистическим источником могли быть урансодержащие породы фундамента бассейна.

Приведенное в предыдущих разделах статьи краткое изложение представлений о механизме, лвижуших силах и триггерных условиях межразломной геотермической конвекции флюидов при формировании месторождений бассейна Атабаска допускает возможность их многократной реализации в варианте с мобилизацией урана из пород фундамента бассейна, но при условии изменения начальных параметров процесса тепловой конвекции флюидов. В принятой в (Pek, Malkovsky, 2016; Пэк, Мальковский, 2017) постановке задачи молелирования было залано наличие в межразломной ячейке графитсодержащего разлома с восстановительными условиями для миграции флюидов, повышенная теплопроводность которого предопределяла ориентацию вектора в контуре термоконвективной ширкулящии флюилов против часовой стрелки, но не была обязательным условием для инициирования конвекции. Как было установлено в (Malkovsky, Pek, 2015), триггерным условием для процесса межразломной геотермической конвекции флюидов является наличие в области моделирования высокопроницаемых разломов. Поэтому при наличии таких разломов термоконвективная циркуляция флюидов в бассейне Атабаска могла инициироваться также и при отсутствии в контуре циркуляции флюидов восстановительных условий для осаждения рудной минерализации. В такой системе с окислительными условиями процесс фронтального просачивания флюидов по межразломной трассе через урансодержащие породы фундамента мог обусловить мобилизацию урана с его последующим переносом по восходящей ветви конвекции из фундамента в вышележащий горизонт песчаников. Для иллюстрации возникающих при этом структур циркуляции флюидов нами было проведено моделирование процесса геотермической конвекции в постановке задачи моделирования, аналогичной приведенной на фиг. 3, но при одинаковых значениях теплопроводности зон разломов и значениях отношения их проницаемостей  $k_{\rm F1}/k_{\rm F2}$ , отклоняющихся на порядок от невозмущенного  $k_{\rm F1}/k_{\rm F2} = 1$  значения (фиг. 6). Можно видеть, что изменение отношения проницаемостей зон разломов приводит к инверсии ориентации векторов термоконвективной циркуляции флюидов. При одинаковых значениях геометрических параметров и проницаемости зон разломов ориентация векторов контура термоконвективной циркуляции флюидов самоустанавливается произвольно по или против часовой стрелки.



**Фиг. 6.** Инверсия вектора термоконвективной циркуляции флюидов при отклонении на порядок отношения  $kF_1/kF_2$  значений проницаемости *k* зон разломов от их невозмущенного  $kF_1/kF_2 = 1$  значения (пояснения в тексте).

В бассейне Атабаска присутствуют многочисленные разрывные нарушения локализованные в породах как с окислительными, так и с восстановительными свойствами (Annesly, Madore, 2005). Поэтому можно предполагать, что во флюидодинамической системе бассейна Атабаска имелись благоприятные условия для инициации многочисленных межразломных термоконвективных ячеек как с окислительными условиями в контурах циркуляции флюидов, так и с восстановительными барьерами на восходящей и нисходящей ветвях конвекции. В таком случае, процессы поэтапного привноса урана из урансодержащих пород фундамента бассейна и его отложения с формированием урановых месторождений могли происходить в бассейне Атабаска одновременно.

# ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Вследствие уже неоднократно упоминавшегося отсутствия однозначных критериев для разделения процессов отложения и переотложения урана, концепция его многоэтапного отложения может обсуждаться лишь как гипотеза. Однако приведенная в статье трактовка процессов транспорта урана в системе с межразломной свободной тепловой конвекцией флюидов позволяет все же предложить возможное объяснение некоторым ключевым аспектам проблемы происхождения уникально богатых руд урановых месторождений бассейна Атабаска.

Действие движущих сил геотермической конвекции определяется временем существования геотермического градиента. Поэтому в системе с

фоновым геотермическим полем процесс межразломной геотермической конвекции флюидов мог неоднократно возобновляться в течение всей протяженной во времени многоэтапной геологической истории формирования рудной минерализации месторождений бассейна Атабаска.

Для геотермической конвекции с межразломной циркуляцией флюидов одним из основных ограничивающих условий является проницаемость зон разломов. В периоды воздействия на флюидодинамическую систему бассейна Атабаска удаленных орогенических событий сейсмотектонические деформации могли вызывать увеличение проницаемости зон разломов до значений, превышающих ее пороговое значение, которые инициировали термоконвективную циркуляцию флюидов. Если в дальнейшем проницаемость зон разломов вследствие кольматации трещинных каналов фильтрации отлагающимся минеральным веществом снижалась и становилась ниже ее порогового значения, то конвекция прекращалась. В следующем эпизоде сейсмотектонических деформаций, обновлявших или создававших новые трещинные каналы фильтрации, проницаемость зон разломов вновь увеличивалась до пороговых значений, инициируя возрождение геотермической конвекции. Такой периодически возобновлявшийся циклический процесс с пороговыми условиями возникновения и завершения термоконвективной циркуляции минералообразующих флюидов отвечал началу и завершению эпизодов отложения/переотложения рудной минерализации на последовательных этапах геологической истории формирования месторождений бассейна Атабаска. Этот циклический процесс во многом сходен с инициируемым сейсмическими событиями клапанным гидродинамическим механизмом разломо- и рудообразования (Sibson, 1996, 2001; Cowie et al., 1998; Nguyen et al., 1998; Cox, 2005, 2016).

Если последовательные эпизоды сейсмотектонических деформаций изменяли в ячейке межразломной конвекции соотношение значений проницаемости зон разломов, как показано на фиг. 6, то вследствие инверсии ориентировки векторов термоконвективной циркуляции флюидов направления их восходящего и нисходящего движения могли в одном и том же разломе последовательно сменять друг друга. Механизм изменения гидравлической проницаемости для зон сейсмически активных разломов описан в (Seront et al., 1998; Lin et al., 2003; Boullier et al., 2004; Ito, Kiguchi, 2005; Boullier, 2011 и др.). Возможность такой сейсмогенно обусловленной инверсии направления движения флюидов позволяет объяснить нередкие случаи формирования на одном и том же месторождении рудных тел с типами инфильтрационной и эксфильтрационной урановой минерализации (Jefferson et al.,  $2007_2$ ).

По результатам изучения флюидных включений в месторождениях бассейна Атабаска идентифицируются два представительных типа (endmembers) рудообразующих флюидов: первичные диагенетические NaCl (Cl > Na > Ca > Mg > K) и вторичные CaCl<sub>2</sub> (Cl > Ca  $\approx$  Mg > Na > K) рассолы с солержанием солей 20-25 и 25-40%, соответственно. Последние предположительно сформировались в результате реакционного взаимодействия первичных диагенетических NaCl-рассолов с Са-содержащими породами фундамента бассейна (Richard et al., 2016). "Оба рассола имеют высокое содержание металлов, но CaCl<sub>2</sub> рассол на порядок более обогащен Си, Рb, Zn, Mn и U" (р. 266), что предположительно могло быть обусловлено тем, что "CaCl<sub>2</sub> рассол выщелачивал металлы из фундамента более эффективно, чем NaCl рассол" (р. 265).

В статье (Martz et al., 2019), посвященной проблеме формирования минералообразующих CaCl<sub>2</sub> рассолов, авторы конкретизируют представление о фильтрационном обмене флюидами между песчаниками и породами фундамента бассейна. "Образование CaCl<sub>2</sub> рассола в результате взаимодействия между исходным NaCl рассолом и породами фундамента означает, что исходный рассол сначала просачивался вниз в зону разлома в период его тектонической активизации в фундаменте бассейна. Затем этот рассол химически прореагировал с породами фундамента с образованием насыщенного CaCl<sub>2</sub> рассола. Этот образовавшийся рассол в конечном итоге был вытеснен вверх из фундамента обратно в песчаники, где он смешивался с повсеместно распространенными пластовыми водами (то есть с исходным рассолом, богатым NaCl)" (Martz et al., 2019, р. 137). В качестве возможных механизмов миграции флюидов предполагались процессы тектонической деформации и свободной тепловой конвекции, но в основном для локальных обстановок зон динамического влияния разломов с мощностью от 20 до 40 м. Однако по результатам изучения флюидных включений CaCl<sub>2</sub> рассолы с повышенным содержанием урана были широко распространены как в песчаниках, так и в породах фундамента (Richard et al., 2016). Поэтому вопрос об условиях их формирования предстает как проблема объяснения происхождения этой важной разновидности минералообразующих флюидов в масштабе бассейна Атабаска.

Приведенные на фиг. 6 схемы циркуляции флюидов в межразломой конвективной ячейке с окислительными условиями позволяют нам предположить, что процесс фронтального просачивания флюидов по протяженной в несколько километров трассе их межразломной миграции создавал благоприятные условия для мобилизации урана из урансодержащих пород фундамента бассейна Атабаска. Однако в процессе такой миграции мог происходить также Na-Ca-обмен просачивавшихся диагенетических флюидов с Са-содержащими минералами пород фундамента: "взаимодействие NaCl рассолов с богатыми кальцием минералами (например, плагиоклаз-, пироксен-, амфиболсодержащие породы в литологии фундамента) является наиболее вероятным объяснением богатых CaCl<sub>2</sub> рассолов" (Derome, 2005, р. 1542). Если такой процесс реализовывался, то проблема происхождения CaCl<sub>2</sub> рассолов с высоким содержанием урана получает естественное объяснение как результат сопряженного выщелачивания U и Ca из пород фундамента бассейна. Как и в охарактеризованном выше случае мобилизации урана, CaCl<sub>2</sub> рассолы, формирующиеся на трассе их миграции по межразломной ветви конвективной ячейки, затем переносятся по восходящей ветви конвекции в вышележащий горизонт песчаников.

Поскольку в межразломной конвективной ячейке по контуру термоконвективной циркуляции флюидов возможны различные сочетания окислительных и восстановительных условий, то в модели с межразломной геотермической конвекцией допустима реализация следующих сценариев:

вынос U и CaCl<sub>2</sub> рассолов из фундамента бассейна в горизонт песчаников происходит как без отложения урановой минерализации, так и с ее отложением в эксфильтрационных и инфильтрационных рудных телах;

если в термоконвективной ячейке отсутствуют восстановительные барьеры, то процесс циркуляции в ней окислительных NaCl флюидов приводит к выносу из нее U и CaCl<sub>2</sub> рассолов в горизонт песчаников без отложения урановой минерализации;

если на входе в термоконвективную ячейку нисходящее движение диагенетических урансодержащих NaCl флюидов происходит по зоне разлома с восстановительными условиями, то в зоне этого разлома могут формироваться инфильтрационные рудные тела;

после сброса в зоне разлома рудной минерализации NaCl флюиды переходят в субгоризонтальное рассредоточенное движение по межразломным породам с окислительными условиями. На этой протяженной трассе фильтрации они выщелачивают уран и в результате Na-Ca-катионного обмена с породами фундамента трансформируются в CaCl<sub>2</sub> рассолы;

если на восходящей ветви конвекции господствуют окислительные условия, то эти урансодержащие рассолы переносятся по зоне разлома в горизонт песчаников, в котором смешиваются с NaCl-флюидами;

если в зоне разлома на восходящей ветви конвекции господствуют восстановительные условия, то может реализоваться процесс отложения рудной

2022

Руководствуясь методологией минеральных систем урановых месторождений (Skirrow et al., 2009), мы предлагаем гипотезу многоэтапности формирования уникально богатых руд месторождений

минерализации на восстановительном барьере из подтекающих к разлому урансодержащих CaCl<sub>2</sub> рассолов. По структуре циркуляции флюидов на фиг. 6, этот процесс должен происходить, скорее всего, в корневой зоне разлома с образованием еще не зафиксированного на месторождениях наиболее удаленного от поверхности несогласия типа рудной минерализации инфильтрационного типа. После сброса рудной минерализации в корневой зоне разлома восходящие по разлому флюиды становятся восстановительными и разгружаются в горизонт песчаников с потенциальной возможностью формирования эксфильтрационных рудных тел.

Приведенные сценарии термоконвективной циркуляции минералообразующих флюидов могут интерпретироваться как возможное объяснение и одноэтапного, и многоэтапного процессов формирования рудной минерализации. По вопросу об источниках урана в литературе утвердились представления о привносе урана в области рудоотложения окислительными урантранспортирующими флюидами из двух его основных источников – песчаников Атабаска и пород фундамента бассейна. В одноэтапной интерпретации предполагается, что после начального этапа формирования рудного запаса месторождений возможность поступления урана из этих источников была утрачена. О возможности истощения рудного потенциала песчаников Атабаска после завершения начального этапа или первых двух предположенных в (Alexandre et al., 2009) рудоформирующих этапов свидетельствует крайне низкое содержание в них урана в настоящее время. Поскольку породы фундамента, в отличие от пород осадочного заполнения бассейна, сохраняли свой потенциальный рудный ресурс на всех этапах вплоть до настояшего времени. правомерно задаться вопросом – если источник урана в фундаменте вносил вклад в формирование рудного ресурса месторождений на начальном этапе, то почему этот ресурс не продолжал вносить свой вклад на последующих этапах? Гипотеза многоэтапного формирования рудной минерализации месторождений не отрицает возможности переотложения урана начального этапа, но допускает также и возможность соучастия мобилизуемого из фундамента бассейна урана в формировании рудного запаса месторождений как на начальном, так и на последующих этапах. Если это предположение справедливо, то пространственная локализация дополнительных порций урана в структурных ловушках, созданных на начальном этапе формирования месторождений, могла приводить к формированию их уникально богатых руд.

бассейна Атабаска за счет телескопированного поступления рудоносных растворов в первоначально образованные и полновляемые сейсмотектоническими воздействиями структурные ловушки. В этом контексте нами с позиций взаимосвязи сейсмотектоники и флюидодинамики обсуждаются вопросы природы движущих сил и механизма геотермической конвекции минералообразующих флюидов, процессов мобилизации урана из урансодержащих пород фундамента бассейна и образования в системах межразломных термоконвективных ячеек инфильтрационных и эксфильтрационных месторождений урана. Авторы надеются, что предложенная в статье интерпретация многоэтапной геологической истории формирования урановых месторождений бассейна Атабаска будет способствовать разработке физически обоснованного представления об особых условиях их формирования в масштабе всего бассейна, а также в других районах со сходными геологическими условиями.

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН "Тектонодинамические обстановки и физико-химические условия формирования минеральных систем основных промышленно-генетических типов урановых месторождений".

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Афанасьев Г.В., Миронов Ю.Б., Пинский Э.М.* Урановые месторождения и провинции типа несогласия // Региональная геология и металлогения. 2014. № 60. С. 52–59.

Злобина Т.М, Петров В.А. Прокофьев В.Ю. Абрамов С.С., Котов А.А., Вольфсон А.А., Лексин А.Б. Сейсмогенная природа флюидодинамических структурных парагенезов Уряхского золоторудного поля (Северо-Восточное Забайкалье) // Геология руд. месторождений. 2020. Т. 62. № 4. С. 291–320.

*Живов В.Л., Бойцов А.В., Шумилин М.В.* Уран: геология, добыча, экономика. М.: РИС "ВИМС", 2012. 304 с.

Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К., Шумилин М.В., Щеточкин В.Н. Уран российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.

Машковцев Г.А., Алтунин О.В., Гребенкин Н.А., Коротков В.В., Овсянникова Т.М., Ржевская А.К. Первоочередные задачи и современные технологии геологоразведочных работ на уран // Разведка и охрана недр. 2017. С. 8–22.

Пакульнис Г.В., Шумилин М.В. Месторождения урана типа "несогласия" района Атабаска (Канада). Аналитический обзор зарубежных публикаций // Минеральное сырье. № 17. М.: ВИМС, 2005. 102 с.

Петров В.А., Леспинас М., Хаммер Й. Тектонодинамика флюидопроводящих структур и миграция радионуклидов в массивах кристаллических пород // Геология руд. месторождений. 2008. Т. 50. № 2. С. 99–126. Пэк А.А., Мальковский В.И. Роль тепловой конвекции флюидов в формировании урановых месторождений типа несогласия: бассейн Атабаска (Канада) // Геология руд. месторождений. 2017. Т. 59. № 3. С. 201–219.

Пэк А.А., Мальковский В.И., Петров В.А. Тепловая конвекция минералообразующих флюидов как возможный механизм многоэтапного формирования уникально богатых руд урановых месторождений несогласия бассейна Атабаска (Канада) // "Породо-, минерало- и рудообразование: достижения и перспективы исследований". Труды к 90-летию ИГЕМ РАН. Электронное издание. Москва. ИГЕМ РАН, 2020. С. 203–206.

Тарханов А.В., Шаталов В.В. Уран 2009. Ресурсы, потребности и производство // Минеральное сырье. Серия геолого-экономическая. № 29. М.: ВИМС, 2010. 39 с.

Шумилин М.В. Урановые месторождения "несогласия". Перспективы открытия в России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2011. № 5. С. 70–75.

Шумилин М.В. Новые данные о месторождениях урана типа несогласия в Канаде и их значение для поисков аналогов в России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2015. № 4. С. 72–77.

*Alexandre P., Kyser K., Thomas D., Polito P, Marlat J.* Geochronology of unconformity-related uranium deposits in the Athabasca Basin, Saskatchewan, Canada and their integration in the evolution of the basin // Mineral. Deposita. V. 44. 2009. P. 41–59.

Annesley I.R., Madore C., Portella P. Geology and thermotectonic evolution of the western margin of the Trans-Hudson Orogen: evidence from the eastern sub-Athabasca basement, Saskatchewan // Can. J. of Earth Sci. 2005. V. 42. P. 573–597.

*Boullier A.-M.* Fault-zone geology: lessons from drilling through the Nojima and Chelungpu faults // Geology of the Earthquake Source. Geological Society London Special Publications. 2011. V. 359. 42 p.

Boullier A.-M., Fujimoto K., Othani T., Roman-Cross G., Lewin E., Ito H., Pezard P., Ildefonse B. Textural evidence for recent co-seismic circulation of fluids in the Nojima fault zone, Awaji island, Japan // Tectonophysics. 2004. V. 378. P. 165–181.

*Chi G., Li Z., Chu H., Bethune K.M., Quirt D., Ledru P., Normand C., Card C., Bosman S., Davis W.J., Potter E.G.* A shallow-burial mineralization model for the unconformity-related uranium deposits in the Athabasca basin // Econ. Geol. 2018. V. 113. P. 1209–1217.

*Cox S.F.* Coupling between deformation, fluid pressures, and fluid flow in ore-producing hydrothermal systems at depth in the crust // Economic Geology 100th Ann. V. 2005. P. 39–75.

*Cox S.F.* Injection-driven swarm seismicity and permeability enhancement: implication for the dynamics of hydrothermal ore systems in high fluid-flux, overpressured faulting regimes // Econ. Geol. 2016. V. 111. № 3. P. 559–587.

*Cowie P.A.* A healing-reloading feedback control on the growth rate of seismic faults // J. Struct. Geol. 1998. V. 20.  $N_{2}$  8. P. 1075–1087.

*Cui T., Yang J., Samson I.M.* Tectonic deformation and fluid flow: implications for the formation of unconformity-related uranium deposits // Econ. Geol. 2012. V. 10. P. 147–63.

2022

Nº 1

*Cumming G.L., Kristic D.* The age of unconformity uranium mineralization in the Athabasca Basin, northern Saskatchewan // Can. J. Earth Sci. 1992. V. 29. P. 1623–1639.

*Cuney M.* World-class unconformity-related uranium deposits: Key factors for their genesis // Proceedings of the Eighth Biennial SGA Meeting. 2005. P. 245–248.

Cuney M., Brouand M., Cathelineau M., Derome D., Freiberger R., Hecht L., Kister P., Lobaev V., Lorilleux G., Peiffert C., Bastoul A.M. What parameters control the high grade – large tonnage of the Proterozoic unconformity related uranium deposits? // Proc. Conf. Uranium Geochemistry 2003 (M. Cuney, ed.). Université Henri Poincaré. Nancy. France, 2003. P. 123–126.

Derome D., Cathelineau M., Cuney M., Fabre C., Lhomme T., Banks D.A. Mixing of sodic and calcic brines and uranium deposition at McArthur River, Saskatchewan, Canada: a Raman and laser induced breakdown spectroscopic study of fluid inclusions // Econ. Geol. 2005. V. 100. P. 1529–1545.

*Fayek M., Kyser K.* Characterization of multiple fluid events and rare-earth-element mobility associated with formation of unconformity-type uranium deposits in the Athabasca Basin, Saskatchewan // Can. Mineral. 1997. V. 35. P. 627– 658.

*Fayek M., Harrison T.M., Ewing R.C., Grove M., Coath C.D.* O and Pb isotopic analyses of uranium minerals by ion microprobe and U–Pb ages from the Cigar Lake deposit // Chem. Geol. 2002<sub>1</sub>. V. 185. P. 205–225.

*Fayek M., Kyser K., Riciputi L.* U and Pb isotope analysis of uranium minerals by ion microprobe and the geochronology of the McArthur River and Sue Zone uranium deposits, Saskatchewan, Canada // Can. Mineral. 2002<sub>2</sub>. V. 40. P. 1553–1569.

*Fayek M., Camacho A., Beshears C., Jiricka D., and Halaburda J.* Two Sources of Uranium at the Millennium Uranium Deposit, Athabasca Basin, Saskatchewan, Canada // GeoCanada 2010 – Working with the Earth. Expanded abstracts. 2010.

Geological Classification of Uranium Deposits and Description of Selected Examples. IAEA TECDOC-1842. IAEA, Vienna. 2018. 417 p.

*Hagemann S.G., Lisitsin V.A., Huston D.L.* Mineral system analysis: Quo vadis //Ore Geology Reviews. 2016. V. 76. P. 504–522.

*Hecht L., Cuney M., Brouand M., Deloule E.* Tracing the sources of unconformity-type utanium deposits? // Proc. Conf. Uranium Geochemistry 2003 (M. Cuney, ed.). Université Henri Poincaré. Nancy. France. 2003. P. 177–180.

*Hoeve J., Sibbald T.I.I.* On the genesis of Rabbit Lake and other unconformity-type uranium deposits in northern Saskatchewan, Canada // Econ. Geol. 1978. V. 73. № 8. P. 1450–1473.

*Hoeve J., Quirt D.H.* A stationary redox front as a critical factor in the formation of high-grade, unconformity-type uranium ores in the Athabasca Basin, Saskatchewan, Canada // Bulletin de Minéralogie. 1987. V. 110. P. 157–171.

Huston D.L., Mernagh T.R., Hagemann S.G., Doublier M.P., Fiorentini M., Champion D.C., Jaques A.L., Czarnota K., Cayley R., Skirrow R., Bastrakov E. Tectono-metallogenic systems – The place of mineral systems within tectonic evolution, with an emphasis on Australian examples // Ore Geol. Rev. 2016. V. 76. P. 168–210. *Ito H., Kiguchi T.* Distribution and properties of fractures in and around the Nojima Fault in the Hirabayashi GSJ borehole. In: Petrophysical properties of crystalline rocks (edited by *Harvey P.K., Brewer T.S., Pezard P.A., Petrov V.A.)* // Geological Society London Special Publications. 2005. V. 240. P. 61–74.

Jefferson C.W., Thomas D.J., Gandhi S.S., Ramaekers P., Delaney. G., Brisbin D., Cutts C., Quirt D., Portella P., Olson R.A. Unconformity-associated uranium deposits of the Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta // In: Goodfellow W.D. (Ed). Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication. 2007<sub>1</sub>. No 5. P. 273–305.

*Jefferson C.W., Thomas, D., Quirt, D., Mwenifumbo C. J., Brisbin, D.* Empirical Models for Canadian Unconformity-Associated Uranium Deposits // Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration. 2007<sub>2</sub>. P. 741–769.

*Kyser K., Cuney M.* Unconformity-related uranium deposits // In: *Cuney M., Kyser K.* (Eds.). Recent and Not-so-recent Development in Uranium Deposits and Implications for Exploration // Short Course Series. Mineralogical Association of Canada, Quebec. 2009. P. 161–219.

*Li Z., Chi G., Bethune K.M., Thomas D., Zaluski G.* Structural controls on fluid flow during compressional reactivation of basement faults: insights from numerical modeling for the formation of unconformity-related uranium deposits in the Athabasca Basin, Canada // Econ. Geol. 2017. V. 112. P. 451–466.

*Li Z., Chi G., Bethune K.M., Eldursi K., Thomas D., Quirt D., Ledru P.* Synchronous egress and ingress fluid flow related to compressional reactivation of basement faults: the Phoenix and Gryphon uranium deposits, southeastern Athabasca Basin, Saskatchewan, Canada // Mineral. Deposita. 2018. V. 53. P. 277–292.

*Li Z., Chi G., Bethune K.M., Eldursi K., Quirt D., Ledru P., Thomas D.* Interplay between thermal convection and compressional fault reactivation in the formation of unconformity-related uranium deposits // Mineral. Deposita. 2020. https://doi.org/10.1007/s00126-020-01011-6

*Lin A., Tanaka N., Uda S., Satish-Kumar M.* Repeated coseismic infiltration of meteoric and seawater into deep fault zones: a case study of the Nojima fault zone, Japan // Chem. Geol. 2003. V. 202. P. 139–153.

*Malkovsky V.I., Pek A.A.* Onset of fault-bounded free thermal convection in a fluid-saturated horizontal permeable porous layer // Transport in Porous Media. 2015. V. 110. P. 25–39.

*Martz P., Mercadier J., Cathelineau M., Boiron M-C., Quirt D., Doney A., Gerbeaud O., De Wally E., Ledru P.* Formation of U-rich mineralizing fluids through basinal brine migration within basement-hosted shear zones: A large-scale study of the fluid chemistry around the unconformity-related Cigar Lake U deposit (Saskatchewan, Canada) // Chem. Geol. 2019. V. 508. P. 116–143.

*Nguyen P.T., Cox S.F., Harris L.B., Powell C.McA.* Fault-valve behaviour in optimally oriented shear zones: an example at the Revenge gold mine, Kambalda, Western Australia // J. Struct. Geol. 1998. V. 20. № 12. P. 1625–1640.

*Pek A.A., Malkovsky V.I.* Linked thermal convection of the basement and basinal fluids in formation of the unconfor-

2022

ГЕОЛОГИЯ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ том 64 № 1

mity-related uranium deposits in the Athabasca Basin, Saskatchewan, Canada // Geofluids. 2016. V. 16. Is. 5. P. 925– 940.

*Pirajno F.* Hydrothermal Processes and Mineral Systems. Springer Science and Business Media B.V., 2009. 1250 p.

*Pirajno F.* A classification of mineral systems, overviews of plate tectonic margins and examples of ore deposits associated with convergent margins // Gondwana Research. 2016. V. 33. P. 44–62.

*Quirt D.Q.* Athabasca unconformity-type uranium deposits: one deposit type with many variations // Uranium Geochemistry 2003: Proceedings of an International Conference, Nancy-France, 2003. P. 309–312.

*Raffensperger J.P., Garven G.* The formation of unconformity-type uranim ore deposits. 2. Coupled hydrochemical modeling // Am. J. Sci. 19952. V. 295. P. 639–696.

*Richard A., Rozsypal C., Mercadier J., Banks D.A., Cuney M., Boiron M.C., Cathelineau M.* Giant uranium deposits formed from exceptionally uranium-rich acidic brines // Nature Geoscience. 2012. № 5. P. 142–146.

Richard A., Cathelineau M., Boiron M.-C., Mercadier J., Banks D., Cuney M. Metal-rich fluid inclusions provide new insights into unconformity-related U deposits (Athabasca Basin and Basement, Canada) // Mineral. Deposita. 2016. V. 51. P. 249–270.

Seront B., Wong T.-F., Caine J.S. et al. Laboratory characterization of hydromechanical properties of a seismogenic normal fault system // J. Struct Geol. 1998. V. 20. № 7. P. 865–881.

Sheahan C., Fayek M., Quirt D., Jefferson C.W. A Combined ingress-egress model for Kianna unconformity-related uranium deposit, Shea Creek Project, Athabasca Basin, Canada // Econ. Geol. 2016. V. 111. P. 225–257.

Sibson R.H. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes // J. Struct. Geol. 1996. V. 18. № 8. P. 1031–1042.

*Sibson R.H.* Seismogenic framework for ore deposition // Rev. Economic Geology. 2001. V. 14. P. 25–50.

Simms M.A., Garven G. Thermal convection in faulted extensional sedimentary basins: theoretical results from finite-element modeling // Geofluids. 2004. V. 4. P. 109–130.

*Skirrow R.G., Jaireth S., Huston D.L., Bastrakov E.N., Schofield A., van der Wielen S.E., Barnicoat A.C.* Uranium mineral systems: Processes, exploration criteria and a new deposit framework // Geoscience Australia Record. 2009/20, 2009. 44 p.

Unconformity-related Uranium Deposits. IAEA-TEC-DOC-1857. IAEA, Vienna. 2018. 295 p.

World Distribution of Uranium Deposits (UDEPO) with Uranium Deposit Classification, 2009 Edition. IAEA-TEC-DOC-1629. IAEA, Vienna. 2009. 126 p.

World Distribution of Uranium Deposits (UDEPO), 2016 Edition. IAEA TECDOC-1843. IAEA, Vienna. 2018. 247 p.

*Wyborn L.A.I., Heinrich C.A., Jaques A.L.* Australian Proterozoic mineral systems: essential in gredients and mappable criteria // Aus IMM Publication Series 4/94. 1994. P. 109–115.