

УДК 553.2:556.3.01

## О РЕЖИМАХ МИГРАЦИИ ФЛЮИДОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕСОГЛАСИЯ В РАЙОНЕ АЛЛИГЕЙТОР-РИВЕРС (АВСТРАЛИЯ)

© 2024 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, 119017 Россия

E-mail: aaprek@mail.ru

Поступила в редакцию 10.04.2023 г.

После доработки 03.07.2023 г.

Принята к публикации 03.07.2023 г.

В мировом производстве урана месторождения несогласия принадлежит в настоящее время около 24%. Основные месторождения несогласия выявлены в урановорудной провинции Атабаска юго-западной части Канадского щита и в урановорудном районе Аллигейтор-Риверс Северо-Австралийского щита. Месторождения локализованы вблизи поверхностей структурно-стратиграфического несогласия в подошве осадочных бассейнов (бассейна Атабаска в Канаде и бассейна Комболджи в Австралии). Однако по ряду геолого-структурных параметров формирования канадским и австралийским месторождениям присущи существенные различия, которые дают основание классифицировать их как подтипы месторождений несогласия. В месторождениях канадского подтипа рудные тела локализируются как над, так и под поверхностью несогласия бассейна Атабаска, а руды месторождений австралийского подтипа локализируются исключительно под поверхностью несогласия в породах фундамента бассейна Комболджи. Статья посвящена реконструкции палеогидродинамических условий формирования австралийских месторождений несогласия. При анализе процессов флюидного массопереноса были последовательно рассмотрены компьютерные модели миграции флюидов для трех сценариев: 1) тепловая конвекция флюидов в зоне разлома с периодической восходящей и нисходящей свободной тепловой конвекцией флюидов в зоне разлома, 2) вынужденноконвективная миграция флюидов при субкритическом значении проницаемости и, соответственно, отсутствии свободной тепловой конвекции в зоне разлома, 3) режим смешанной конвекции с восходящим и нисходящим движением флюидов по зоне разлома. Авторы пришли к заключению, что процесс периодической термоконвективной циркуляции флюидов в зоне разлома не согласуется с представлением об инфильтрационном механизме формирования австралийских месторождений несогласия в зонах разломов в фундаменте бассейна Комболджи. Поэтому было предпринято рассмотрение возможного влияния на палеогидродинамику рудообразующей системы фациальной зональности объединенного водоносного горизонта в подошве кластических отложений субгруппы Комболджи, который играл роль основной трассы миграции урантранспортирующих флюидов. Анализ зонального распределения первичных обстановок осадконакопления и позднейших диагенетических преобразований пород водоносных и водоупорных горизонтов данного бассейна позволил обосновать представление об определяющем воздействии зонального снижения проницаемости пород объединенного водоносного горизонта на структуру циркуляции урантранспортирующих флюидов со сменой их латеральной миграции в подошве осадочных отложений субгруппы Комболджи на нисходящую инфильтрацию по поперечной зоне рудоконтролирующего разлома. Такая структура циркуляции урантранспортирующих флюидов была принята нами как гипотеза палеогидродинамических условий формирования австралийских месторождений несогласия исключительно в породах фундамента бассейна Комболджи. Однако дополнительно проведенные компьютерные расчеты позволили заключить, что тренд направленного изменения проницаемости пород по пути латерального движения урантранспортирующих флюидов является триггерным условием, которое в зависимости от направленности этого тренда может обуславливать как нисходящее, так и восходящее движение флюидов по зоне рудоконтролирующего разлома. В бассейне Комболджи в Австралии направленность этого тренда определялась изменением фациальной обстановки по пути региональной миграции диагенетических флюидов, а в бассейне Атабаска в Канаде определяющее воздействие могли оказывать локальные особенности топографического рельефа поверхности несогласия. Поэтому при альтернативном тренде изменения проницаемости по пути латеральной миграции урантранспортирующих флюидов предлагаемый транспортный механизм формирования австралийских месторождений несогласия мог предположительно вносить вклад также и в формирование как инфильтрационных, так и

эксфильтрационных канадских месторождений несогласия, для которых ранее была разработана палеогидродинамическая модель межразломной геотермической конвекции.

*Ключевые слова:* урановые месторождения несогласия, закон корреляции фаций, бассейн Комболджи, бассейн Атабаска

**DOI:** 10.31857/S0016777024020028, **EDN:** yrvkfx

## ВВЕДЕНИЕ

В мировом производстве урана месторождениям несогласия принадлежит около 24% (Живов и др., 2012). Основные месторождения несогласия выявлены в урановорудной провинции Атабаска юго-западной части Канадского щита с суммарными ресурсами >1.0 млн т U и в урановорудном районе Аллигейтор-Риверс провинции Пайн-Крик Северо-Австралийского щита с суммарными ресурсами 460 000 тонн U (Geological classification, 2018). Отнесение канадских и австралийских месторождений к типу месторождений несогласия основывается на подобии геолого-структурных обстановок их формирования: месторождения локализованы вблизи поверхностей структурно-стратиграфического несогласия в подошве осадочных бассейнов (бассейна Атабаска в Канаде и бассейна Комболджи в Австралии) с архей-протерозойским фундаментом, перекрытым средне-протерозойским осадочным чехлом. Однако наряду с общими чертами, канадским и австралийским месторождениям присущи также и существенные различия (Живов и др., 2012; Тарханов, Бугриева, 2017), которые дают основание классифицировать их как подтипы месторождений несогласия. В месторождениях канадского подтипа рудные тела локализуются как над поверхностью несогласия в породах осадочного заполнения бассейна, так и под поверхностью несогласия в зонах разломов в фундаменте бассейна, а руды месторождений австралийского подтипа локализуются исключительно в породах фундамента.

Первые месторождения несогласия были открыты почти одновременно: в Канаде в 1968 г. и в Австралии в 1969 г. В урановорудном районе Аллигейтор-Риверс Северной Австралии было выявлено четыре крупных урановых месторождения (табл. 1), обсуждению гипотез происхождения которых были посвящены специальные тематические секции состоявшегося в 1979 году в Сиднее Международного симпозиума по урановым месторождениям провинции Пайн-Крик (Uranium in the Pine Creek geosyncline, 1980).

На секции симпозиума “Модели урановой минерализации” австралийскими геологами Р.А. Биннсом и Дж. Фергюсоном были представлены контрастно различные интерпретации процессов формирования нового, ранее еще нигде в мире не встречавшегося типа месторождений. В докладе Биннса с соавторами (Binns et al., 1980) была предложена гипотеза гипогенного формирования месторождения Джабилука с отложением урана на восходящей ветви ячейки конвективной циркуляции флюидов. Предполагалось, что конвекция происходила в термическом поле теплогенерирующих ураноносных гранитоидных пород, которые были также основным источником урана, но при этом поверхности несогласия в подошве формации Комболджи какого-либо генетического значения не придавалось. В докладе Фергюсона с соавторами (Ferguson et al., 1980) была предложена гипотеза гипергенного формирования месторождений Джабилука, Рейнджер и Кунгарра с отложением первичной урановой минерализации нисходящими потоками метеорных вод. Предполагалось, что после пенеппенизации территории в коре выветривания карбонатных отложений происходило образование карстового рельефа, в глубь которого проникавшие структуры которого (“dolines”) поступали метеорные воды, выщелачивавшие уран из архейских гранитов и сланцев. При этом отложение урана происходило предположительно путем его адсорбции на глинистых минералах, гидроокислах железа или восстановления в анаэробной обстановке. Наряду с этими докладами, на секции симпозиума “Канадские месторождения” был представлен доклад канадских авторов с изложением основных положений новой по тому времени диагенетически-гидротермальной гипотезы формирования месторождений бассейна Атабаска, как предпочтительного объяснения происхождения месторождений несогласия: “в металлогенетическом аспекте диагенетически-гидротермальная гипотеза является предпочтительной по сравнению с приповерхностно-супергенной или магматически/метаморфической моделями” (Hoeve et al., 1980, p. 575). Результаты дальнейших исследований подтвердили справедливость этой

**Таблица 1.** Урановые месторождения несогласия района Аллигейтор-Риверс (Тарханов, Бугриева, 2017)

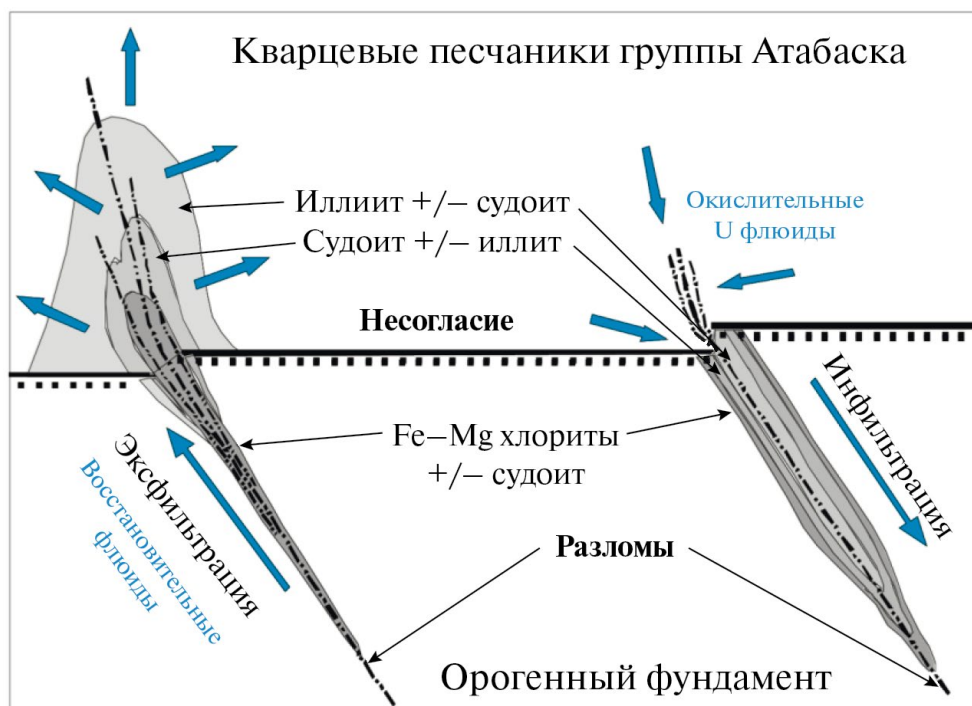
№ п/п	Месторождение	Запасы, т U	Среднее содержание урана, %	Год открытия	Примечание
1	Джабилука	141000	0.45	1971	Резерв
2	Рейнджер	119238	0.24	1969	Действующее
3	Набарлек	8967	1.3	1970	Отработано
4	Кунгарра	14000	0.56	1970	Резерв

прогнозной для конца 1970-х гг. сравнительной оценки ранних генетических гипотез – гипергенная и гипогенная модели не получили подтверждения материалами наблюдений и пришедшая им на смену диагенетически-гидротермальная гипотеза утвердилась как ведущая парадигма в концепции генезиса месторождений несогласия. В настоящее время она разделяется большинством исследователей канадских месторождений и принимается как референтная база при разработке генетических моделей формирования как канадских, так и австралийских месторождений несогласия (Kyser, Cune, 2009, p. 166).

В диагенетически-гидротермальной интерпретации гипотезы формирования месторождений несогласия предполагается, что урановые месторождения формировались, как это отражено в их названии, вблизи региональной поверхности несогласия между архейским–раннепротерозойским складчатым метаморфизованным фундаментом и среднепротерозойским неметаморфизованным полого залегающим осадочным чехлом, накоплению которого предшествовал длительный период эрозии, сопровождавшийся образованием пенеплена и площадной коры выветривания мощностью до нескольких десятков метров. Непосредственным источником урана были окислительные ураноносные флюиды осадочных бассейнов, которые претерпели диагенетические преобразования при погружении осадков предположительно до глубины 5–6 км. При этом первичным источником урана могли быть урансодержащие минералы осадочного заполнения и/или фундамента бассейнов. Отложение урана происходило в результате его осаждения из окислительных диагенетических ураноносных флюидов на восстановительном барьере. Локализация месторождений контролировалась зонами разломов в фундаменте бассейнов.

Перечисленные выше положения диагенетически-гидротермальной гипотезы принимаются в настоящее время если не всеми, то подавляющим большинством исследователей месторождений несогласия. Для месторождений несогласия канадского подтипа важнейшим результатом

проведенных исследований стало обоснование представления о разнонаправленном – восходящем и нисходящем – движении минералообразующих флюидов по зонам рудоконтролирующих разломов (Fayek, Kyser, 1997; Jefferson et al., 2007; Unconformity-related ..., 2018). Основанием для этого заключения послужило установленное в месторождениях бассейна Атабаска различие по минеральному составу и зональности метасоматических окорудных ореолов в месторождениях, с одной стороны, локализованных в песчаниках группы Атабаска на уровне поверхности несогласия и непосредственно выше него, и, с другой, локализованных в зонах разломов на десятки и даже сотни метров ниже поверхности несогласия в фундаменте бассейна. Месторождения, рудная минерализация которых локализована по преимуществу в песчаниках Атабаска, являются по существу полиметалльными с высоким содержанием Ni, Co, Cu, Pb, Zn и Mo, а в отдельных месторождениях с Au, Ag, Se и ЭПГ (Jefferson et al., 2007). По зональности окорудных метасоматических преобразований для них характерна обширная внешняя зона глинистых (гидрослюдистых) изменений с хлоритовой внутренней зоной. Месторождения, локализованные в породах фундамента, являются практически монометалльными урановыми. По зональности окорудных преобразований для них характерна обратная зональность с внешней хлоритовой и внутренней глинистой зонами. 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. Предполагается, что образование рудных тел над поверхностью несогласия происходило в результате реакционного взаимодействия окислительных ураноносных флюидов, циркулировавших в песчаниках Атабаска, с восстановительными флюидами, восходившими по зоне рудоконтролирующего разлома. Образование



Фиг. 1. Схема зональности метасоматических ореолов в месторождениях инфильтрационного и эксфильтрационного типов (по Jefferson et al., 2007).

рудных тел под поверхностью несогласия происходило при нисходящем движении ураноносных флюидов по зоне рудоконтролирующего разлома в результате их реакционного взаимодействия с восстановительными агентами (восстановительными флюидами, графитовым веществом, минералами двухвалентного железа) в фундаменте бассейна. Для того, чтобы подчеркнуть принципиальное различие в условиях формирования месторождений с разнонаправленным движением флюидов по зонам рудоконтролирующих разломов, для них в англоязычной литературе использовались термины “egress” и “ingress” (Jefferson et al., 2007), обозначающие дословно месторождения “выхода” и “входа” (Шумилин, 2011). В качестве не тождественного, но близкого по смыслу аналога этих терминов в (Пэк, Мальковский, 2015) были приняты обозначения – рудообразующие системы и, соответственно, месторождения эксфильтрационного (egress style) и инфильтрационного (ingress style) типов (фиг. 1).

Однако оставался непроясненным (knowledge gaps) ключевой вопрос о структуре циркуляции и механизме движения флюидов при формировании эксфильтрационных и инфильтрационных месторождений: “Как балансировались потоки флюидов в процессах их нисходящего (ingress) и восходящего (egress) течения в разломы и из разломов фундамента?” (Jefferson et al., 2007, p. 297).

В качестве возможного объяснения палеогидродинамических условий эксфильтрационной и инфильтрационной циркуляции флюидов в зонах рудоконтролирующих разломов в (Пэк, Мальковский, 2015) была предложена гипотеза термоконвективной системы с межразломной свободной тепловой конвекцией растворов в породах фундамента и осадочного заполнения бассейна. Для ее обоснования были проведены: теоретический анализ условий конвективной неустойчивости флюидов в трехмерной модели межразломной конвективной ячейки (Malkovsky, Pек, 2015) и затем систематическое численное моделирование структуры циркуляции флюидов в концептуальной модели условий формирования урановых месторождений бассейна Атабаска (Pек, Malkovsky, 2016). Полученные результаты позволили предложить модель межразломной геотермической, т.е. обусловленной геотермическим градиентом, термоконвективной циркуляции рудообразующих флюидов. С использованием расчетных значений скорости фильтрации рудообразующих растворов оценка времени формирования модельного месторождения с запасами 50 тыс. т U составила первые сотни тысяч лет (Пэк, Мальковский, 2017). Таким образом, палеогидродинамическая модель межразломной геотермической конвекции позволила обосновать геологически и физически непротиворечивое представление о структуре

циркуляции флюидов при формировании запасов урана месторождений в бассейне Атабаска (ПЭК и др., 2022).

Модель межразломной геотермической конвекции, разработанная для месторождений несогласия канадского подтипа, не объясняет основной отличительной особенности месторождений несогласия австралийского подтипа – отсутствия в месторождениях бассейна Комболджи, в отличие от месторождений в бассейне Атабаска, рудной минерализации в песчаниках над поверхностью несогласия. Поэтому даже при наличии между канадскими и австралийскими месторождениями многих общих черт концептуальная модель палеогидротермальной рудообразующей системы в бассейне Комболджи должна отличаться от модели для бассейна Атабаска отсутствием эксфильтрационной ветви формирования рудной минерализации.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Как отмечалось выше, в диагенетически-гидротермальной трактовке генезиса месторождений несогласия непосредственным источником урана были окислительные диагенетические ураноносные флюиды осадочных бассейнов, как это изначально предполагалось в широко цитируемой до настоящего времени статье (Hoeve, Sibal, 1978), положившей начало такой интерпретации. В австралийских месторождениях несогласия бассейна Комболджи идентифицируются три типа рудообразующих флюидов: первичные диагенетические Na-рассолы с переменным содержанием Mg, вторичные Ca-рассолы с низким содержанием Mg и относительно слабосоленые, но более высокотемпературные флюиды предположительно метеорного происхождения. По данным о содержании галогенов, рассольные флюиды формировались как остаточные рассолы после осаждения галита при испарении морской воды (Derome et al., 2007). Для слабосоленых флюидов предполагалась “циркуляция по глубоким разломам фундамента, которая приводила к их разогреву и вероятному реакционному взаимодействию с графитом с образованием небольших количеств  $\text{CH}_4$ ” (Derome et al., 2003, с. 271). Повышенное по сравнению с морской водой содержание Ca и пониженное содержание Mg в обоих рассолах “могли быть обусловлены двумя основными реакционно-обменными взаимодействиями с породами фундамента бассейна – альбитизацией Ca-плагиоклаза (обеднение Na) и интенсивной хлоритизацией (обеднение Mg)” (Derome et al.,

2007, с. 250). Предполагалось, что такое взаимодействие рассолов с породами фундамента происходило, как в бассейне Атабаска, по механизму фильтрационного обмена флюидами по зонам разломов между песчаниками осадочного заполнения и фундаментом бассейна. Разработанная в (Derome et al., 2003, фиг. 8) для бассейна Комболджи концептуальная модель такого фильтрационного обмена включала две последовательно сопряженные ячейки межразломного перетекания рассолов по трем гидродинамически сообщающимся разломам. По первому разлому происходила нисходящая инфильтрация окислительных Na-содержащих рассолов из песчаников водоносного горизонта в породы фундамента. По породам фундамента эти рассолы перетекали к зоне второго разлома, обогащаясь при этом Ca и U: “Na–Ca и Ca–Na рассолы, циркулируя в породах фундамента, могли извлекать уран из ураносодержащих минералов” (с. 273). По зоне второго разлома происходило возвратное истечение Ca–U-содержащих рассолов в водоносный горизонт с окислительными Na-содержащими рассолами. Образующиеся при их смешении Na–Ca–U-содержащие рассолы затем вовлекались в нисходящую инфильтрацию по зоне третьего разлома, в котором осаждали уран при смешении с восходящими слабосолеными флюидами: “смешение U-содержащих рассолов с горячими слабосолеными флюидами с примесью ассоциирующего с ними  $\text{CH}_4$  могло быть частью общего процесса, который обуславливал осаждение урана” (с. 274).

По результатам компьютерного моделирования процессов миграции флюидов в обобщенных численных моделях ураноносных осадочных бассейнов восходящую и нисходящую миграцию флюидов по зонам разломов в фундаменте бассейна могли инициировать тектонические режимы региональной деформации соответственно субгоризонтального сжатия и растяжения (Cui et al., 2012). Для формирования в бассейне Комболджи месторождений инфильтрационного типа инициирующим условием нисходящего движения флюидов по зоне рудоконтролирующего разлома могла быть региональная деформация растяжения: “После образования бассейна Комболджи... произошло региональное событие с деформацией растяжения, которое может объяснить, почему большинство урановых месторождений несогласия локализованы в бассейне Комболджи в его фундаменте” (Cui et al., 2012, с. 160). Однако региональный тектонический режим деформации растяжения должен был в общем случае инициировать нисходящее движение флюидов также и по

разлому, для которого в модели (Derome et al., 2003) предполагалось восходящее движение, но проблема движущих сил миграции флюидов в этой модели не обсуждалась. Поэтому предположение о последовательно разнонаправленной – нисходящей, восходящей и вновь нисходящей – циркуляции флюидов по гидродинамически сопряженным разломам при формировании месторождений несогласия в бассейне Комболджи требует дополнительного флюидодинамического обоснования.

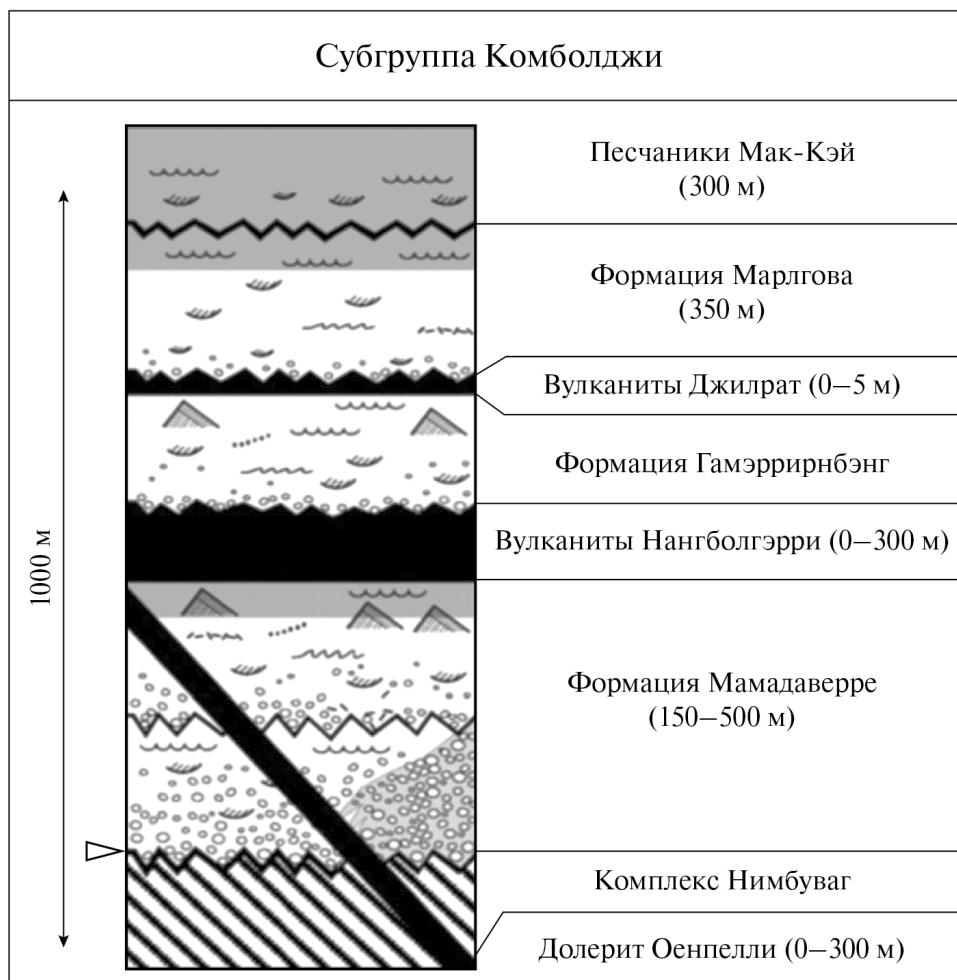
В статье (Skirrow et al., 2016) при разработке геолого-генетической модели формирования месторождения Рейнджер была предложена новая для месторождений несогласия гипотеза о возможном извлечении урана из регионально развитой вдоль поверхности несогласия зоны гематит-иллит-хлоритового преобразования пород метаморфического фундамента бассейна Комболджи. Пониженное содержание урана в этой зоне ранее объяснялось его выносом поверхностными и грунтовыми водами при выветривании: по результатам анализа геохимического баланса элементов было установлено “снижение содержания урана (около 5 ppm)... в сапролите, по сравнению с протолитом”, что предположительно свидетельствовало о выносе урана “в гидросферу при выветривании» (Needham, 1988, с. 36). Однако позднее установленная повышенная температура новообразования глинистой минерализации этой зоны свидетельствовала о пост-комболджийском времени ее формирования. Детальные исследования на урановых месторождениях района, включая Рейнджер, выявили различие в условиях формирования двух типов иллитов – диагенетических со структурой 2M<sub>1</sub> и гидротермальных со структурой 1M: “2M<sub>1</sub> иллиты формировались при температуре, превышавшей 200°C... 1M иллиты формировались при более низкой температуре от 150 до 170°C” (Beaufort et al., 2005, с. 533). О температурах около 200°C свидетельствуют также результаты анализа условий формирования алюминий-фосфат-сульфатных (alumino-phosphate-sulfate, APS) минералов, образовавшихся в основном при диагенетическом и гидротермальном разложении монацита по обеим сторонам от поверхности несогласия, в том числе на участках, удаленных от рудных тел (Gaboreau et al., 2005). С учетом этих данных в (Skirrow et al., 2016) было выдвинуто предположение о возможном поступлении урана в рудообразующую систему месторождения Рейнджер из регионально развитой вдоль поверхности несогласия зоны преобразования пород метаморфического фундамента бассейна Комболджи мощностью

около 50 м с выщелачиванием из нее около 5 ppm урана, как это ранее предполагалось в гипотезе палеовыветривания.

При разработке геолого-генетической модели этой новой для месторождений несогласия трактовки представлений о возможном источнике урана ее авторы (Skirrow et al., 2016) руководствовались концепцией “минеральной системы”, конкретизирующей классическую парадигму “источник → перенос → отложение” в приложении к урановым месторождениям (Skirrow et al., 2009). При этом, наряду с опорой на данные о месторождении Рейнджер, были использованы сведения также и о других месторождениях несогласия урановорудного района Аллигейтор-Риверс. Поэтому для разработанной модели было принято более общее название: “Модель эволюции минеральной системы месторождений несогласия урановорудного района Аллигейтор-Риверс” (Skirrow et al., 2016, фиг. 20).

В 2019 г. в докладе на конференции “Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле” авторами настоящего сообщения в соавторстве с австралийскими геологами была выдвинута гипотеза режимов миграции флюидов при формировании урановых месторождений несогласия в районе Аллигейтор-Риверс (Мальковский и др., 2019). Она предполагает, как и в (Skirrow et al., 2016), мобилизацию урана диагенетическими флюидами из регионально прослеживающейся под поверхностью несогласия зоны изменения пород фундамента бассейна Комболджи с последующим вовлечением образующихся ураноносных флюидов в режим смешанной конвекции, “включающей процесс региональной латеральной миграции флюидов с их термоконвективной циркуляцией в зонах разломов” (Мальковский и др., 2019, с. 216–217). Руководствуясь концепцией минеральной системы, в приведенном ниже детальном анализе этой гипотезы в качестве ее определяющих компонентов были приняты сведения: 1) об источнике урана, 2) о структуре флюидопроводимости, 3) о движущих силах течения флюидов.

Источники урана. При оценке потенциальной рудопродуктивности минеральной системы одним из основных параметров являются сведения об областях, из которых происходил или мог происходить вынос рудных компонентов для формирования рудного запаса месторождений. По вопросу об источнике урана месторождений несогласия до настоящего времени сохраняется дискуссия с альтернативными предположениями



**Фиг. 2.** Литостратиграфическая колонка субгруппы Комболджи (по Niatt et al., 2007).

о поступлении урана из пород осадочного заполнения бассейнов или из их фундамента (Kyser, Cuneu, 2009). Предложенная в (Skirrow et al., 2016) гипотеза о возможном поступлении урана из регионально прослеживающейся под поверхностью несогласия зоны изменения пород фундамента бассейна Комболджи дополняет эту дискуссию обозначением области в фундаменте бассейна, из которой происходил рассредоточенный вынос почти половины исходного содержания урана. Этот источник урана также может быть дополнен его рассредоточенной мобилизацией в водоносном горизонте над поверхностью несогласия из валунных конгломератов и крупнозернистых песчаников переотложения пород фундамента бассейна, полимиктовый состав которых “отражает нижележащие литологии, включая метаморфические породы” (Niatt et al., 2021, с. 1067). Представления о мобилизации урана из его рассредоточенных источников в урансодержащих метаморфических породах по путям движения флюидов над и под поверхностью несогласия не

исключают возможности его поступления из осадочных и вулканических пород заполнения бассейна, но дают дополнительные основания считать высокую ураноносность метаморфических пород фундамента бассейна положительным признаком при оценке потенциальной рудопродуктивности минеральной системы месторождений несогласия.

Структура флюидопроводимости. Отложения бассейна Комболджи стратиграфически коррелируют с нижней частью разреза группы Катерине-Ривер (Katherine River Group) обширного среднепротерозойского осадочного бассейна Мак-Артур (McArthur Basin). Поэтому в современной литературе (после 1999 года; Ahmad, Hollis, 2013) их классифицируют как субгруппу Комболджи взамен ранее использовавшегося термина “формація Комболджи” (Kyser, Cuneu, 2009). Литостратиграфическая колонка осадочных и вулканических пород субгруппы Комболджи приведена на фиг. 2.

Как и в канадском бассейне Атабаска, вертикальная мощность заполнения бассейна

Комболджи была в период рудообразования много больше (до 4—8 км; Polito et al., 2011), чем сохранившиеся к настоящему времени отложения субгруппы Комболджи. Комплекс Нимбуваг (Nimbuwah) в подошве субгруппы Комболджи, в котором локализованы месторождения несогласия урановорудного района Аллигейтор-Риверс, представлен интенсивно дислоцированными метаморфическими породами палеопротерозойского фундамента. Нижний горизонт стратиграфической колонки на фиг. 2 представлен отложениями формации Мамадаверре с галечно-валунными конгломератами в нижней части разреза с переходом по восстанию к крупнозернистым, среднезернистым и затем мелкозернистым полимиктовым кварц-полевошпатовым песчаникам. Вулканы Нангболгэрри представлены в основном субэральными базальтами с миндалевидной текстурой и пирокластическими отложениями, которые с небольшим межформационным несогласием залегают на нижежащих песчаниках Мамадаверре. Отложения формации Гамэррирнбэнг представлены в подошве разреза полимиктовыми конгломератами с переходом по восстанию к среднезернистым кварцевым песчаникам. Вулканы Джилрат представлены маломощным горизонтом туфопесчаников, туфов и пористых базальтов предположительно субэраляного происхождения. Отложения формации Марлгова — среднезернистые хорошо отсортированные кварцевые песчаники, которые предположительно отлагались в приливной зоне. Отложения формации Мак-Кей — средне- и мелкозернистые кварцевые песчаники, которые предположительно отлагались в прибрежной и отчасти в приливной зонах. Силлы и лополиты Оенпелли мощностью до 250 м, внедрившиеся в породы субгруппы Комболджи по геохронологическим данным в период 1725—1720 млн лет (Polito et al., 2004), представлены оливиновыми и кварцевыми долеритами с краевыми зонами микрокристаллических долеритов.

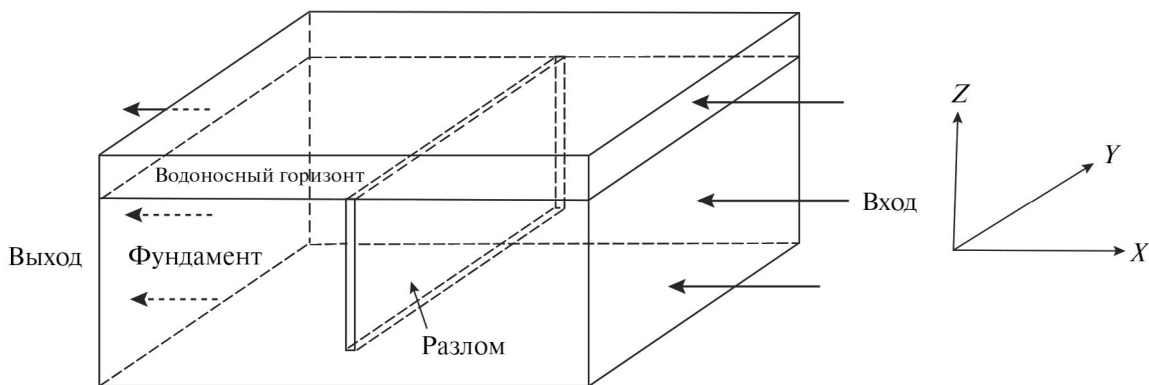
На структуру флюидопроводимости в осадочном заполнении бассейна Комболджи определяющее влияние оказывали процессы диагенетического преобразования кластических отложений, приводившие к формированию диагенетических водоупорных и водоносных горизонтов (Kyser, 2007; Hiatt et al., 2007, 2021; Polito et al., 2011). Формирование диагенетических водоупорных горизонтов происходило в результате закупорки кварцем порового пространства изначально высокопористых хорошо отсортированных кварцевых (90—100%) песчаников, практически не содержащих глинистого цемента, на глубинах от 1 до 5 км при температуре <math>< 130^{\circ}\text{C}</math> (Hiatt et al.,

2007). Источниками кварцевого цемента могли быть процессы приповерхностного выветривания и растворения кварцевых зерен под давлением (pressure solution). Формирование диагенетических водоносных горизонтов происходило при образовании в изначально низкопористых плохо отсортированных конгломератах и крупнозернистых песчаниках вторичной пористости в результате растворения зерен детритового полевого шпата, глинистой составляющей и новообразованного кварца при температуре от 150 до 230°C, отвечавшей глубине погружения в осадочном бассейне от 4 до 8 км (Polito et al., 2011). При этом выявляется устойчивая связь между локализацией водоносных горизонтов в кластических отложениях субгруппы Комболджи с рудной минерализацией в фундаменте бассейна. “Все урановые месторождения локализованы под поверхностью несогласия в породах фундамента под диагенетическими водоносными горизонтами. Над этими водоносными горизонтами залегают экранирующие диагенетические водоупорные фации морских песчаников, что позволяет предположить, что миграция минерализующих флюидов происходила в бассейне по напорным водоносным горизонтам. Там, где диагенетические водоносные горизонты пересекали породы фундамента, содержавшие графит или другие восстановители, происходило осаждение U в виде уранинита” (Kyser, 2007, с. 250).

Для мобилизации урана из его рассредоточенных источников над и под поверхностью несогласия основными компонентами структуры флюидопроводимости в бассейне Комболджи были водоносный горизонт над поверхностью несогласия и региональная зона пост-комболджийского изменения пород фундамента под поверхностью несогласия, которые могли использоваться диагенетическими флюидами как объединенный водоносный горизонт для их напорного движения. В фундаменте бассейна Комболджи основными компонентами структуры флюидопроводимости были зоны разломов, которые фокусировали процессы фильтрационного обмена флюидами между объединенным водоносным горизонтом и фундаментом бассейна. Эти зоны при нисходящем движении по ним урансодержащих флюидов локализовали в фундаменте бассейна рудную минерализацию вследствие повышенного содержания в них графитового вещества и минералов восстановителей с двухвалентным железом.

Движущие силы течения флюидов. По приведенной в (Skirrow et al., 2016) оценке потенциальной рудопродуктивности минеральной системы с источником урана в кровле урансодержащих





Фиг. 3. Схема области моделирования.

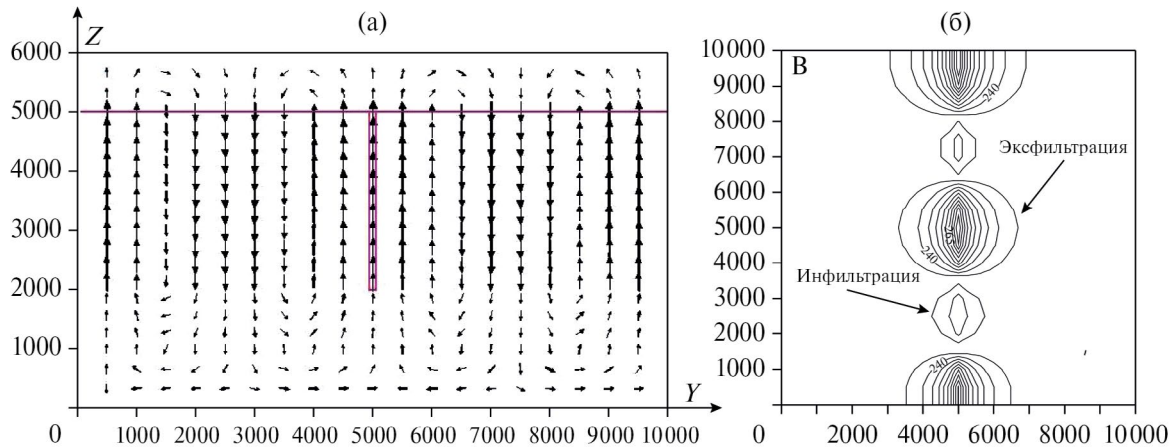
пород фундамента бассейна Комболджи поступление урана из зоны под поверхностью несогласия могло вносить значимый вклад в формирование рудного ресурса месторождений урановорудного района Аллигейтор-Риверс при условии латеральной миграции диагенетических рассолов по площади, измеряемой десятками квадратных километров (с. 493). В качестве транспортного механизма предполагалась тепловая конвекция рассолов по площади их латеральной миграции и затем по зоне крутопадающего рудоконтролирующего разлома в температурном поле долеритов Оенпелли (Skirrow et al., 2016, фиг. 20), внедрение которых близко совпадает во времени с формированием урановой минерализации на месторождении Рейнджер. Однако дискретное пространственное распределение лополитов, силлов и даек долеритов Оенпелли (Needham, 1988, фиг. 7) не согласуется с предположением о термоконвективной ареальной миграции потока диагенетических рассолов под поверхностью несогласия. Поэтому мы предположили, что возможным объяснением механизма циркуляции флюидов для рассредоточенной мобилизации урана из пород кровли фундамента бассейна мог быть процесс вынужденной конвекции флюидов по зоне объединенного водоносного горизонта в подошве формации Мамадаверре в напорном гидравлическом режиме, как это предполагалось в (Kyser, 2007). Причиной гидравлического напора могла быть разность высотных отметок между областями питания водоносного горизонта и районами локализации месторождений, поскольку «расчлененность топографического рельефа на территории бассейна Комболджи составляла по крайней мере 1 км» (Hiatt et al., 2021, с. 1061). Когда латеральный поток флюидов, мигрировавших по водоносному горизонту над поверхностью несогласия и по зоне выщелачивания урана под

поверхностью несогласия, пересекал зону крутопадающего разлома в фундаменте бассейна, он мог инициировать нисходящую ветвь циркуляции ураносодержащих флюидов с образованием инфильтрационной рудной минерализации.

С учетом приведенных выше изменений, для постановки задачи компьютерного моделирования режима миграции флюидов при формировании урановых месторождений несогласия в районе Аллигейтор-Риверс была принята версия гипотезы (Skirrow et al., 2016) с мобилизацией урана из его рассредоточенных источников в ураносодержащих метаморфических породах субгруппы Комболджи, предполагающая в качестве ее основных компонентов: 1) свободную тепловую конвекцию флюидов в зоне рудоконтролирующего разлома, 2) топографически инициированную напорную миграцию флюидов по объединенному водоносному горизонту над и под поверхностью несогласия и 3) эффекты воздействия на напорную миграцию флюидов изменений флюидопроводимости диагенетического водоносного горизонта в подошве формации Мамадаверре.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Будем исходить из предположения, что латеральный поток диагенетических флюидов, мигрирующих по объединенному водоносному горизонту в подошве субгруппы Комболджи, пересекает ортогонально ориентированную зону вертикального разлома в фундаменте бассейна. В таком случае вектор внутриразломной термоконвективной циркуляции флюидов в плоскости разлома будет ориентирован ортогонально по отношению к вектору вынужденноконвективного потока флюидов вдоль поверхности несогласия. Поэтому для расчетов взаимодействия процессов вынужденноконвективного и свободноконвективного



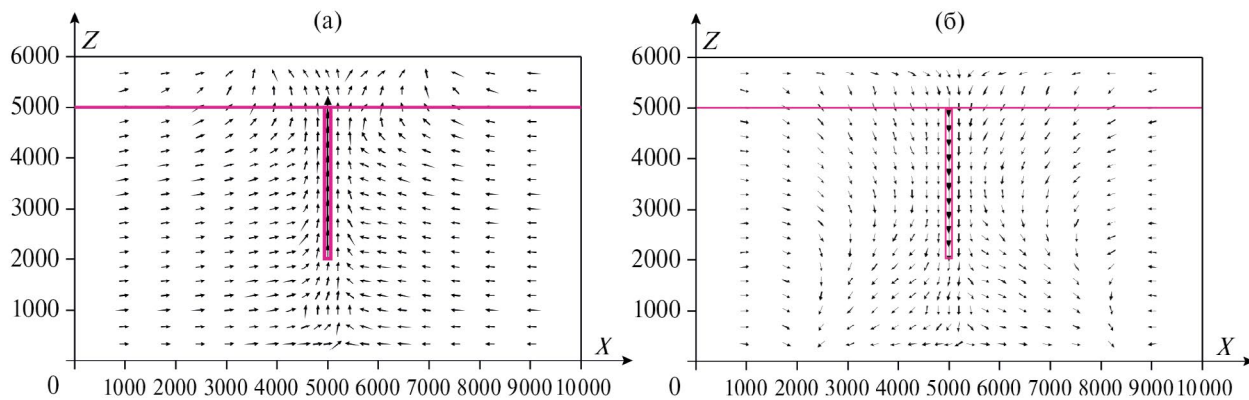
**Фиг. 4.** Периодическая структура свободной тепловой конвекции флюидов в зоне разлома. (а) — ориентация векторов термоконвективной циркуляции флюидов вдоль зоны разлома по профильному сечению  $YZ$ . (б) — распределение температуры в горизонтальном сечении вдоль подошвы объединенного водоносного горизонта.  
 $k_b = 1 \times 10^{-16} \text{ м}^2$ ;  $k_s = 1 \times 10^{-15} \text{ м}^2$ ;  $k_f = 1 \times 10^{-14} \text{ м}^2$ ;  $h_f = 3 \text{ км}$ .

флюидного теплопереноса была необходима трехмерная постановка задачи моделирования. Ее упрощенная схема приведена на фиг. 3 с размерами по осям  $X_{\text{lim}} = Y_{\text{lim}} = 10 \text{ км}$ ,  $Z_{\text{lim}} = 6 \text{ км}$ .

Верхний слой модели с вертикальной мощностью 1 км представляет объединенный водоносный горизонт над и под поверхностью несогласия, нижний слой с вертикальной мощностью 5 км представляет породы фундамента бассейна Комболджи. Верхняя и нижняя границы модели непроницаемые. Поток флюидов поступает в область моделирования по сечению правого торца модели (Вход) и разгружается по ее левому торцу (Выход). На этих торцах области моделирования для имитации условий напорного режима потока флюидов предусмотрена возможность задания значений пьезометрического давления  $p_{\text{вход}}$  и  $p_{\text{выход}}$ , разность которых, отнесенная к длине  $X_{\text{lim}}$  пути миграции флюидов по трассе “вход → выход” вдоль оси  $X$ , определяла значение линейного градиента гидравлического напора  $\text{grad } p = (p_{\text{вход}} - p_{\text{выход}}) / X_{\text{lim}}$  в области моделирования. На торцевых сечениях верхнего слоя области предусмотрена также возможность задания различных значений проницаемости пород  $k_s^{\text{вход}}$  и  $k_s^{\text{выход}}$  с градиентом линейного изменения флюидопроводимости  $\text{grad } k_s = (k_s^{\text{вход}} - k_s^{\text{выход}}) / X_{\text{lim}}$  по пути движения флюидов в объединенном водоносном горизонте. При равенстве этих торцевых значений проницаемости верхнего горизонта модели они определяли постоянное значение проницаемости  $k_s$  пород объединенного водоносного горизонта, т.е. соблюдалось равенство  $k_s = k_s^{\text{вход}} = k_s^{\text{выход}}$ . В середине области задана вертикальная зона разлома в интервале от

подошвы верхнего слоя до некоторой глубины в породах фундамента, структура течения флюидов в которой рассчитывалась для ортогонального с осью  $X$  (при  $X = 5 \text{ км}$ ) профильного сечения модели  $YZ$ . Эта зона разлома, частично перекрывающая трассу “вход → выход” в породах фундамента бассейна, приводит к реорганизации структуры течения флюидов по оси  $X$ , которая рассчитывалась для ортогональных к оси  $Y$  вертикальных сечений области (“сечения  $XZ$ ”). По результатам расчетов, наряду с определением векторов скорости течения флюидов в профильных сечениях, перпендикулярных осям  $X$  и  $Y$  (соответственно “сечения  $YZ$  и  $XZ$ ”), рассчитывалось также распределение температуры в сечении  $XZ$  и в горизонтальной плоскости  $YX$  в подошве  $Z = 5 \text{ км}$  объединенного водоносного горизонта.

Основные параметры модели следующие: проницаемость  $k_s$  (при  $k_s^{\text{вход}} = k_s^{\text{выход}}$ ) и вертикальная мощность  $\Delta h_s$  объединенного водоносного горизонта в подошве формации Мамадаверре, проницаемость  $k_b$  пород фундамента бассейна Комболджи, проницаемость  $k_f$ , ширина  $\Delta h_f$  и вертикальная протяженность  $h_f$  зоны разлома в средней части модели, геотермический градиент  $G_T$  и теплофизические свойства пород структурных элементов области моделирования. Во всех расчетах были приняты постоянные значения температуры на верхней границе модели  $T_{\text{окм}} = 200^\circ\text{C}$ , геотермического градиента  $G_T = 30^\circ\text{C}/\text{км}$ , мощности объединенного водоносного горизонта  $\Delta h_s = 1 \text{ км}$ , ширины зоны разлома  $\Delta h_f = 200 \text{ м}$ . Значения варьируемых параметров модели приведены в подписях к результатам моделирования.



**Фиг. 5.** Структура термоконвективной циркуляции флюидов в вертикальных сечениях модели  $XZ$  в интервалах вдоль оси  $Y$  на фиг. 4а с восходящим 3500—5500 м и нисходящим 6000—8000 м движением флюидов вдоль трассы  $Y = 4500$  м (5а) и  $Y = 7000$  м (5б) соответственно. Пояснения в тексте.  $k_b = 1 \times 10^{-16} \text{ м}^2$ ;  $k_s = 1 \times 10^{-15} \text{ м}^2$ ;  $k_f = 1 \times 10^{-14} \text{ м}^2$ ;  $h_f = 3 \text{ км}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В приведенной выше трехмерной постановке задачи моделирования по результатам тестовых расчетов была выделена базовая модель со значением проницаемости пород фундамента бассейна  $k_b = 10^{-16} \text{ м}^2$ , которое отвечает оценке “пороговой” проницаемости для возникновения термоконвективных течений флюидов (Ingebritsen, Manning, 2010). После этого рассматривались сценарии с последовательным воздействием на структуру течения флюидов изменения значений ее варьируемых параметров: 1) проницаемости зоны разлома  $k_f$ , 2) изменения по трассе движения флюидов “вход → выход” значений гидравлического напора (заданием значений  $p_{\text{вход}}$  и  $p_{\text{выход}}$  на торцах модели) и 3) изменения значений проницаемости объединенного водоносного горизонта по пути движения флюидов (заданием значений  $k_s^{\text{вход}}$  и  $k_s^{\text{выход}}$  на торцах водоносного горизонта). Все результаты расчетов даны для фиксированного времени развития процесса 500 000 лет.

Тепловая конвекция флюидов в зоне разлома. В упоминавшемся выше докладе авторов (Мальковский и др., 2019) с тем же названием, что и у настоящей статьи, было высказано предположение, что “при достижении критических значений параметров, отвечающих условиям возникновения тепловой конвекции, в зоне разлома развивается периодическая структура внутриразломной термоконвективной циркуляции флюидов”, которая может обуславливать нисходящую инфильтрацию флюидов по зоне рудоконтролирующего разлома, “согласующуюся с представлением об инфильтрационном формировании австралийских месторождений несогласия района Аллигейтор-Риверс”

(с. 216). Процесс свободной тепловой конвекции инициируется в модели после достижения критического значения проницаемости в зоне разлома (Мальковский, Пэк, 2004) равного  $k_f = 8 \times 10^{-15} \text{ м}^2$ . На фиг. 4 для сценария *только тепловая конвекция* приведен пример расчета флюидного теплопереноса в зоне вертикального разлома с проницаемостью  $k_f = 1 \times 10^{-14} \text{ м}^2$ , который был задан в модели в интервале от подошвы объединенного водоносного горизонта  $Z = 5 \text{ км}$  до глубины  $Z = 2 \text{ км}$  в фундаменте бассейна.

Структура потока согласуется с представлением о периодической внутриразломной термоконвективной циркуляции флюидов, но не с предположением о свободной тепловой конвекции флюидов в зоне рудоконтролирующего разлома как ведущем транспортном механизме формирования инфильтрационных месторождений несогласия.

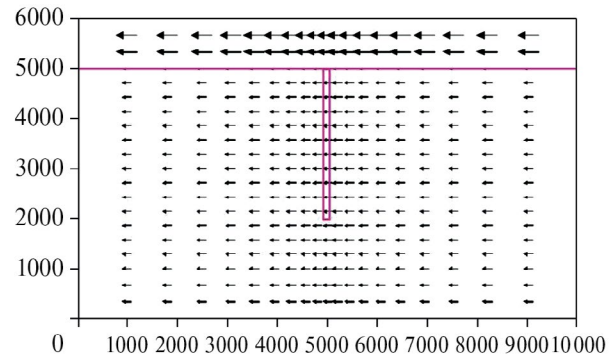
Векторы термоконвективной циркуляции флюидов на фиг. 4а приведены по профильному сечению  $YZ$  зоны разлома с пропорциональным отражением в их графическом представлении величины скорости течения флюидов. Можно видеть, что вдоль зоны разлома по оси  $Y$  происходит периодическая смена восходящего и нисходящего движения флюидов. Такая периодическая инверсия вдоль зоны разлома режимов эксфильтрации и инфильтрации флюидов должна была приводить к сопряженному разнонаправленному изменению температуры вдоль поверхности несогласия. На фиг. 4б приведены результаты расчета в горизонтальном сечении модели  $YX$  распределения температуры в подошве объединенного водоносного горизонта  $Z = 5 \text{ км}$  в локальных полях термоконвективной эксфильтрации и инфильтрации

флюидов по зоне разлома на фиг. 4а. При значении температуры на верхней границе области моделирования  $T_{6\text{км}} = 200^\circ\text{C}$ , геотермическом градиенте  $G_T = 30^\circ\text{C}/\text{км}$  и вертикальной мощности объединенного водоносного горизонта  $\Delta h_s = 1$  км фоновое значение геотермической температуры в подошве объединенного водоносного горизонта  $T_{5\text{км}} = 230^\circ\text{C}$ . По результатам расчета температуры, приведенным на фиг. 4б, в поле эксфильтрации флюидов происходит увеличение температуры до  $280^\circ\text{C}$ .

Это относительно значительное (на  $50^\circ\text{C}$  по сравнению с невозмущенным значением  $230^\circ\text{C}$ ) увеличение температуры отражает эффект поступления тепла в восходящую ветвь конвекции из высокотемпературных частей разреза вплоть до нижней границы области моделирования с геотермической температурой  $380^\circ\text{C}$ . В поле инфильтрации минимальное значение температуры равно  $220^\circ\text{C}$ , т.е. происходит ее снижение по сравнению с невозмущенным значением на  $10^\circ\text{C}$ , отражающее эффект ограничения на поступление тепла в нисходящую ветвь конвекции из водоносного горизонта над поверхностью несогласия с начальной геотермической температурой на верхней границе области моделирования  $200^\circ\text{C}$ . Поскольку мощность зоны изменения пород фундамента бассейна составляет всего 50 м, расчетные значения температуры на фиг. 4б в подошве объединенного водоносного горизонта с вертикальной мощностью  $\Delta h_s = 1$  км можно с основанием интерпретировать как показательные для вариаций температуры на поверхности несогласия.

При принятой постановке задачи моделирования периодическая структура свободной тепловой конвекции обуславливает чередование в зоне разлома по координате  $Y$  интервалов с восходящим и нисходящим движением флюидов (см. фиг. 4а). Результаты расчета для этих интервалов структуры циркуляции флюидов в ортогональных к оси  $Y$  вертикальных сечениях  $XZ$  показывают, что периодическая структура конвекции не ограничена зонами разломов, но при фокусировании восходящего и нисходящего движения флюидов в зоне разлома охватывает также и всю область моделирования (фиг. 5а и 5б).

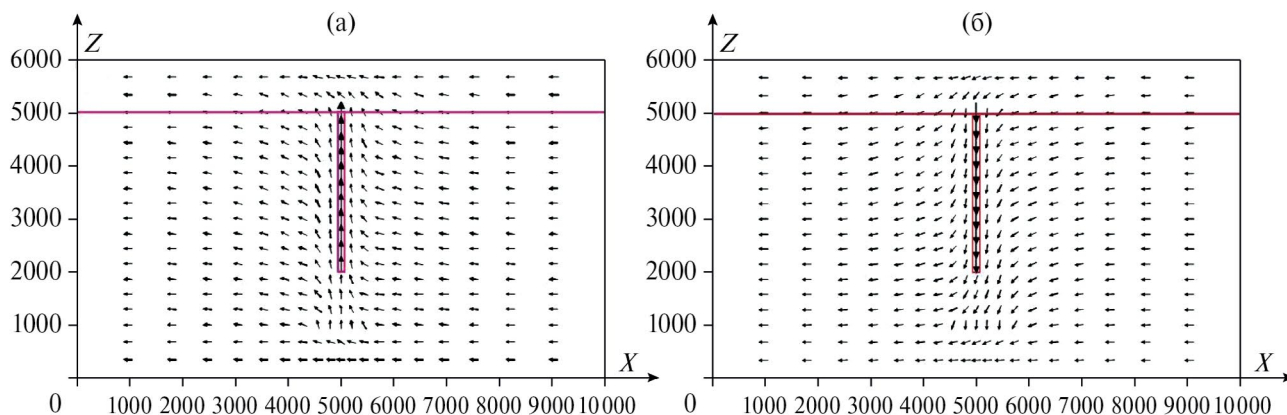
На фиг. 5а приведен пример расчета циркуляции флюидов в сечении модели  $XZ$  с восходящим движением флюидов в интервале 3500—5500 м (см. фиг. 4а) вдоль трассы  $Y = 4500$  м, на фиг. 5б — с нисходящим движением флюидов в интервале 6000—8000 м (см. фиг. 4а) вдоль трассы  $Y = 7000$  м. Сфокусированное по зоне разлома нисходящее движение флюидов на фиг. 5б наглядно



**Фиг. 6.** Структура вынужденноконвективного напорного течения флюидов при градиенте гидравлического напора  $grad p = 2$  МПа/10 км.  $k_b = 1 \times 10^{-16} \text{ м}^2$ ;  $k_s = 1 \times 10^{-15} \text{ м}^2$ ;  $k_f = 1 \times 10^{-15} \text{ м}^2$ ;  $h_f = 3$  км.

иллюстрирует, что периодическая структура свободной тепловой конвекции допускает возможность нисходящего движения флюидов по зоне рудоконтролирующего разлома, которое, однако, не согласуется, как предполагалось в (Мальковский и др., 2019), с “представлением об инфильтрационном формировании месторождений несогласия района Аллигейтор-Риверс” (с. 216). Определяющим условием рассогласования с возможностью такой генетической интерпретации является гидродинамическая сопряженность ветвей нисходящей и восходящей конвекции, отчетливо зафиксированная в нижней части структуры периодической конвекции на фиг. 4а процессом перетекания флюидов из нисходящей ветви конвекции в восходящую. Если исходить из предположения, что флюиды нисходящей ветви конвекции отлагали в зоне разлома рудную минерализацию, то по сопряженной восходящей ветви конвекции должны были разгружаться “отработанные” флюиды, которые могли отлагать парагенную, но безрудную минерализацию. В приложении к обстановкам формирования месторождений такое предположение означает, что по простиранию зоны рудоконтролирующего разлома должны были локализоваться (и при том одновременно) структурно сопряженные области с относительно низкотемпературной инфильтрационной рудной минерализацией и тесно ассоциирующей с ней более высокотемпературной эксфильтрационной безрудной минерализацией.

Такой сценарий не согласуется с концептуальным представлением об устойчиво нисходящей инфильтрации урантранспортирующих флюидов, как это предполагалось в (Derome et al., 2003; Skirrow et al., 2016). Это отрицательное заключение о периодической свободной тепловой конвекции



**Фиг. 7.** Структура циркуляции флюидов в режиме смешанной конвекции в вертикальных сечениях модели  $XZ$  с восходящим и нисходящим движением флюидов, как на фиг. 5, вдоль трассы  $Y = 4500$  м (7а) и  $Y = 7000$  м (7б) соответственно.  $k_b = 1 \times 10^{-16}$  м<sup>2</sup>;  $k_s = 1 \times 10^{-15}$  м<sup>2</sup>;  $k_f = 1 \times 10^{-14}$  м<sup>2</sup>;  $h_f = 3$  км,  $grad p = 2$  МПа/10 км.

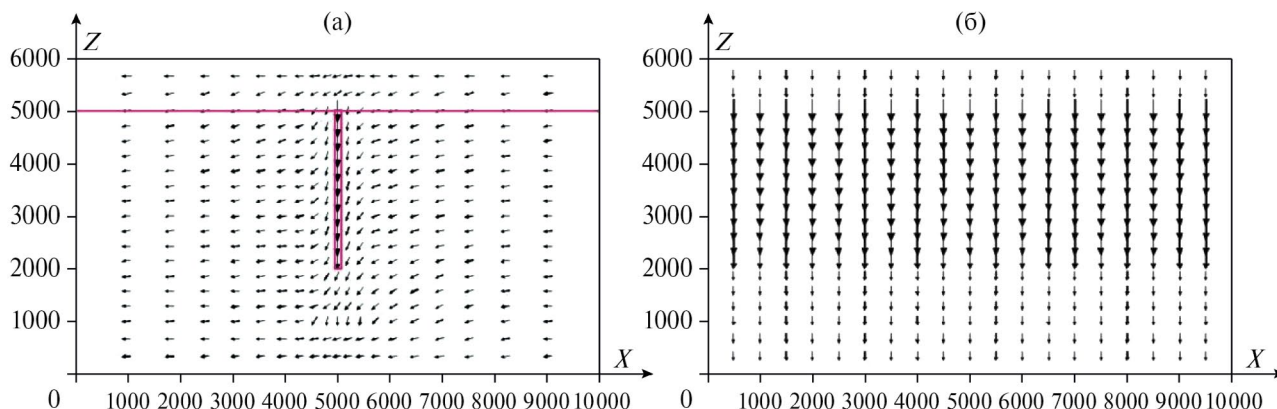
флюидов в зоне рудоконтролирующего разлома как возможном ведущем транспортном механизме формирования австралийских месторождений несогласия сохраняет свою силу также и в сценарии со смешанной конвекцией флюидов.

Вынужденноконвективное движение флюидов и режим смешанной конвекции. Для мобилизации урана из его рассредоточенных источников в урансодержащих породах фундамента бассейна Комболджи при постановке задачи моделирования был предположен процесс напорной миграции флюидов над и под поверхностью несогласия по объединенному водоносному горизонту в подошве формации Мамадаверре. Поскольку по результатам палеотопографической реконструкции (Hiatt et al., 2021) гидравлический напор создавал разность высотных отметок между областями питания водоносного горизонта и районами локализации месторождений, миграция флюидов происходила в вынужденноконвективном напорном режиме как в объединенном водоносном горизонте, так и в породах фундамента бассейна Комболджи. Для моделирования такого общего для всей области моделирования режима вынужденной напорной конвекции на боковых торцах модели задавались значения пьезометрического давления флюидов  $p_{вход} > p_{выход}$ , разность которых, отнесенная к длине  $X_{lim} = 10$  км пути миграции флюидов по трассе «вход → выход» вдоль оси  $X$ , определяла значение линейного градиента гидравлического напора  $grad p = (p_{вход} - p_{выход})/X_{lim}$ . По результатам проведенных расчетов до достижения порогового значения проницаемости для развития тепловой конвекции в зоне разлома, равного  $k_f = 8 \times 10^{-15}$  м<sup>2</sup>, режим напорной конвекции обуславливает невозмущенное горизонтально ориентированное перетекание

флюидов между торцами области. Пример такого вынужденноконвективного напорного перетекания флюидов при субкритическом значении проницаемости зоны разлома  $k_f = 1 \times 10^{-15}$  м<sup>2</sup> приведен на фиг. 6 для значения гидравлического напора  $grad p = 2$  МПа/10 км, который соответствует разности значений водяного столба высотных отметок топографического рельефа на торцах модели 2 МПа = 200 м.

Режим смешанной конвекции. После развития в зоне разлома тепловой конвекции в области моделирования самоорганизуется режим смешанной конвекции с совмещением периодической структуры свободной тепловой конвекции флюидов в зоне разлома с трендом вынужденноконвективного латерального перетекания флюидов между торцами модели. На фиг. 7 приведены структуры циркуляции флюидов в режиме смешанной конвекции в вертикальных сечениях модели  $XZ$  вдоль оси  $Y$ , как на фиг. 5, в интервалах с восходящим 3500—5500 м и нисходящим 6000—8000 м движением флюидов вдоль трассы  $Y = 4500$  м (фиг. 7а) и  $Y = 7000$  м (фиг. 7б) соответственно.

В обоих приведенных на фиг. 7 результатах расчетов латеральный поток напорной миграции флюидов, продвигающийся от правого торца модели, частично объединяется с ветвями восходящей (см. фиг. 7а) и нисходящей (см. фиг. 7б) тепловой конвекции, формируя сосредоточенные потоки эксфильтрации и инфильтрации флюидов по зоне разлома. При этом структура циркуляции флюидов на фиг. 7б в еще большей мере, чем на фиг. 5б, допускает возможность ее интерпретации как механизма образования инфильтрационных месторождений несогласия, в том числе с принятым



**Фиг. 8.** Структура циркуляции флюидов в модели палеогидродинамических условий формирования инфильтрационных месторождений несогласия бассейна Комболджи. Пояснения в тексте.  $k_b = 1 \times 10^{-16} \text{ м}^2$ ;  $k_s^{\text{сход}} = 1 \times 10^{-15} \text{ м}^2$ ;  $k_s^{\text{отход}} = 7 \times 10^{-16} \text{ м}^2$ ;  $k_f = 1 \times 10^{-14} \text{ м}^2$ ;  $h_f = 3 \text{ км}$ ;  $\text{grad } p = 2 \text{ МПа/10 км}$ .

при постановке задачи моделирования условием мобилизации урана из его рассредоточенных источников при напорной миграции флюидов в объединенном водоносном горизонте.

Однако, поскольку инфильтрация в зону разлома потенциально ураноносных флюидов из объединенного водоносного горизонта на фиг. 7б инициируется наряду с вынужденной напорной миграцией, как на фиг. 6, также периодической тепловой конвекцией в зоне разлома, как на фиг. 4, то по отношению к процессу смешанной конвекции сохраняет справедливость приведенное в предыдущем разделе статьи отрицательное заключение о ее несовместимости с палеогидродинамическим условием устойчиво нисходящего движения рудообразующих растворов при формировании инфильтрационных месторождений несогласия. Таким образом, результаты анализа сценария с режимом смешанной конвекции, также, как сценария с только тепловой конвекцией, не согласуются с представлением о транспортном механизме формирования австралийских месторождений несогласия.

Фациальная зональность проницаемости трассы региональной миграции диагенетических флюидов. В литостратиграфической колонке на фиг. 2 породы формации Мамадаверре в подошве субгруппы Комболджи представлены зональной серией речных аллювиальных отложений с галечно-валунными конгломератами в нижней части разреза, сменяющихся по восстанию последовательно крупнозернистыми, среднезернистыми и затем мелкозернистыми полимиктовыми кварц-полевошпатовыми песчаниками. Поскольку в аллювиальных фациях “вниз по течению в общем случае

размерность осадков уменьшается, а отсортированность возрастает” (Кузнецов, 2012, с. 26, 27), грубозернистые отложения бассейна Комболджи формировались в верховьях аллювиального комплекса, более тонкозернистые фракции отлагались вниз по течению речных систем. По палеотопографической реконструкции обстановок формирования пород субгруппы Комболджи горизонты с плохо отсортированными конгломератами и крупнозернистыми песчаниками формации Мамадаверре формировались в областях с горным рельефом на территории и вблизи современных границ бассейна Комболджи, а горизонты с хорошо отсортированными кварцевыми песчаниками формировались в периферических равнинных и прибрежно-морских областях, удаленных от источника кластического материала (Hiatt et al., 2021).

Диагенез осадочных пород субгруппы Комболджи обусловил контрастное различие между обстановками формирования аллювиальных отложений речных систем бассейна Комболджи и условиями миграции в них диагенетических флюидов. Диагенетические преобразования, начало которых датируется периодом времени 1798 млн лет назад (Hiatt et al., 2007; Polito et al., 2011), завершились «после достижения в нижних горизонтах субгруппы Комболджи ко времени 1700 млн лет температуры около  $200^\circ\text{C}$  на глубине  $> 5 \text{ км}$ » (Hiatt et al., 2021, p. 1077). Эти диагенетические преобразования “поддерживали определенную степень проницаемости (часто в виде микропроницаемости) при захоронении грубозернистых отложений речных фаций, создавая диагенетические водоносные горизонты, тогда как богатые кварцем мелкозернистые литофации испытали высокую степень цементации, превратив их из осадочных

водоносных горизонтов в диагенетические водопоры” (Hiatt et al., 2021, p. 1065). Такое сочетание зонального распределения первичных обстановок осадконакопления и позднейших диагенетических преобразований при формировании водоносных и водоупорных горизонтов осадочного бассейна Комболджи предопределяло отличительную особенность латеральной фациальной зональности региональных условий миграции диагенетических флюидов, выражающуюся в уменьшении флюидопроницаемости пород по пути движения подземного потока от водоносных до водоупорных горизонтов.

**Палеогидродинамические условия формирования инфильтрационных месторождений несогласия.** По принятому при постановке задачи моделирования предположению об источниках урана, его мобилизация из урансодержащих метаморфических пород бассейна Комболджи происходила при напорной миграции диагенетических флюидов по объединенному водоносному горизонту в подошве формации Мамадаверре. Поэтому для расчета влияния латеральной фациальной зональности флюидопроницаемости на условия миграции урантранспортирующих флюидов было принято условие уменьшения значения проницаемости пород вдоль этой предпочтительной трассы их регионального движения. В модельной постановке это условие задавалось последовательным уменьшением проницаемости в выходном торцевом сечении объединенного водоносного горизонта при постоянном значении проницаемости во входном сечении  $k_s^{вход}$ , которое было принято равным значению проницаемости  $k_s = 1 \times 10^{-15} \text{ м}^2$  при моделировании структуры циркуляции флюидов в режиме смешанной конвекции на фиг. 7.

По результатам проведенных расчетов при таком последовательном снижении значения проницаемости по трассе миграции флюидов в объединенном водоносном горизонте в области моделирования сначала сохранялась структура циркуляции флюидов как в режиме смешанной конвекции с периодической структурой восходящего (см. фиг. 7а) и нисходящего (см. фиг. 7б) движения флюидов по зоне разлома. Но затем, начиная с относительно незначительного уменьшения проницаемости в выходном сечении объединенного водоносного горизонта до  $k_s^{вход} = 7 \times 10^{-16} \text{ м}^2$  (при сохранении неизменным значения  $k_s^{вход} = 1 \times 10^{-15} \text{ м}^2$  во входном сечении), в модели происходит радикальное изменение структуры циркуляции флюидов (фиг. 8) со сменой периодической тепловой конвекции в зоне разлома на нисходящую инфильтрацию диагенетических урантранспортирующих флюидов из объединенного водоносного горизонта

по зоне рудоконтролирующего разлома в фундаменте бассейна.

Ориентация векторов течения флюидов на фиг. 8а иллюстрирует процесс поступления урантранспортирующих флюидов из объединенного водоносного горизонта в зону рудолокализирующего разлома в фундаменте бассейна, как на фиг. 5б и 7б. Однако в отличие от этих ранее приводившихся примеров с периодической конвекцией, формируется нисходящая инфильтрация флюидов по всей длине зоны разлома. Это отличие, в сравнении со структурой периодической конвекции на фиг. 4а, наглядно иллюстрирует однонаправленно нисходящая ориентация векторов течения урантранспортирующих флюидов на фиг. 8б по всей зоне ортогонального к оси  $X$  рудоконтролирующего разлома.

Тестовые расчеты позволили заключить, что такая структура флюидодинамики палеогидротермальной рудообразующей системы со сменой процесса латеральной миграции урантранспортирующих флюидов по флюидопроводящему горизонту в подошве кластических отложений субгруппы Комболджи гидродинамически сопряженным режимом их последующей нисходящей инфильтрации по зоне рудоконтролирующего разлома в фундаменте бассейна устойчиво сохраняется также и при геологически реалистических значениях снижения проницаемости пород по пути движения подземного потока от водоносных до водоупорных горизонтов. Поэтому такая структура может интерпретироваться как палеогидродинамическое условие формирования инфильтрационных месторождений несогласия бассейна Комболджи.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Основной задачей приведенных в статье моделирующих расчетов, как это сформулировано в ее названии, была реконструкция палеогидродинамического режима формирования месторождений несогласия австралийского подтипа, именно процесса устойчиво нисходящей инфильтрации урантранспортирующих флюидов по зоне рудоконтролирующего разлома в фундаменте бассейна Комболджи. При поиске решения этой задачи авторами с использованием методологии минеральных систем были последовательно рассмотрены компьютерные модели миграции флюидов в сценариях *тепловая конвекция флюидов в зоне разлома* с периодической (см. фиг. 4) восходящей и нисходящей (см. фиг. 5) свободной тепловой конвекцией флюидов в зоне разлома, *вынужденноконвективная миграция флюидов* при субкритическом значении

проницаемости и, соответственно, отсутствии свободной тепловой конвекции в зоне разлома (см. фиг. 6), *режим смешанной конвекции* с восходящим и нисходящим движением флюидов по зоне разлома (см. фиг. 7). Анализ результатов компьютерных расчетов структуры миграции флюидов в этих сценариях позволил прийти к заключению, что процесс периодической термоконвективной циркуляции флюидов в зоне разлома не согласуется, как это первоначально предполагалось в (Мальковский и др., 2019), “с представлением об инфильтрационном формировании австралийских месторождений несогласия района Аллигейтор-Риверс” (с. 216).

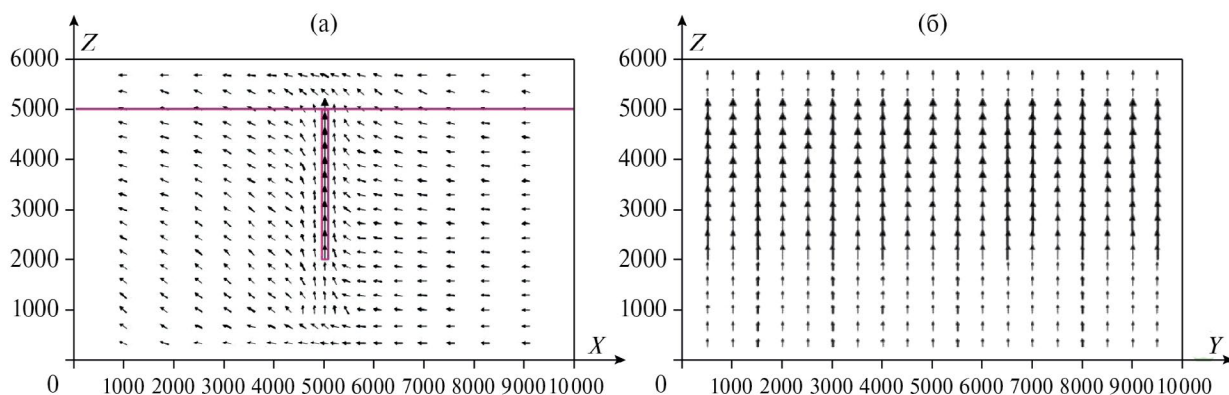
После рассмотрения всех компьютерных сценариев был предпринят анализ возможного влияния на палеогидродинамику рудообразующей системы фациальной зональности нижнего горизонта субгруппы Комболджи, который играл роль основной трассы региональной миграции урантранспортирующих флюидов. Кластические отложения этого горизонта формации Мамадаверре (см. фиг. 2) характеризует отчетливо выраженная вертикальная фациальная зональность с галечно-валунными конгломератами в нижней части разреза, которые формировались в областях с горным рельефом в верховьях аллювиальной системы речных долин бассейна Комболджи, с переходом по восстанию к крупнозернистым, среднезернистым и затем мелкозернистым полимиктовым кварц-полевошпатовым песчаникам, которые формировались в периферических равнинных областях, удаленных от источника кластического материала. Эта вертикальная фациальная зональность позволяла предполагать, что по пути регионального движения диагенетических флюидов происходила смена латеральных фациальных обстановок их миграции от грубозернистых отложений водоносных горизонтов до мелкозернистых отложений водоупорных горизонтов.

Основоположником современного понимания термина “фация” является швейцарский геолог А. Грессли, который впервые применил новую для того времени методику изучения разрезов осадочных отложений путем их сравнительного анализа не только в вертикальном направлении, но и прослеживанием слоёв в латеральном направлении по площади их распространения. Используя эту методику, Грессли “удалось распознать в горизонтальном протяжении каждого отложения различные, вполне определенные видоизменения, которые представляют постоянные особенности в его петрографическом составе” (Шатский, 1965, с. 229), которые он назвал *видами отложений* или

*фациями*. В отечественной геологической литературе термин «фация» стал впервые использоваться в работах Н.А. Головкинского, который ввел представление о миграции фаций, обусловленной вертикальными колебаниями земной поверхности, которые обуславливают “переход латеральной зональности осадков в вертикальную последовательность пород в разрезах при перемещении береговой линии путем постепенного наложения смежных фациальных зон” (Жидовинов, Староверов, 2008, с. 10). Позже, через 20 с лишним лет немецким ученым И. Вальтером были развиты представления о “законе корреляции фаций”, сходные с положениями о миграции фаций Н.А. Головкинского, которые утвердились в литературе как закон Вальтера, согласно которому вертикальный ряд фаций повторяет латеральный: “Только такие фации и фациальные обстановки могут залегать друг на друге в геологическом разрезе, которые ... некогда располагались рядом друг с другом” (Крашенинников, 1971, с. 253). Иными словами, “закон Вальтера показывает, что фации, залегающие согласно в вертикальном разрезе, формировались в латерально соседствующих обстановках и что фации, контактирующие по вертикали, должны быть продуктами расположенных географически рядом друг с другом обстановок” (Рединг, 1990, с. 14).

Смена в бассейне Комболджи латеральных фациальных обстановок флюидного массопереноса произошла в результате диагенетических преобразований, которые сохранили относительно повышенную флюидопроницаемость пород грубозернистых водоносных горизонтов, но обусловили уменьшение флюидопроницаемости мелкозернистых литофаций диагенетических водоупоров. Такое сочетание зонального распределения первичных обстановок осадконакопления и позднейших диагенетических преобразований, обуславливавших снижение флюидопроницаемости по пути региональной подземной миграции диагенетических флюидов, дало нам основание для проведения моделирующих экспериментов для определения влияния уменьшения флюидопроводимости пород на миграцию урантранспортирующих флюидов по объединенному водоносному горизонту в подошве осадочных отложений субгруппы Комболджи. По результатам проведенных расчетов (см. фиг. 8), такое уменьшение флюидопроводимости обуславливало нисходящую инфильтрацию диагенетических урантранспортирующих флюидов из объединенного водоносного горизонта по зоне рудоконтролирующего разлома с потенциальной возможностью формирования в фундаменте бассейна урановорудной минерализации. Поскольку такая





**Фиг. 9.** Структура фокусированной эксфильтрации флюидов по зоне рудоконтролирующего разлома. Пояснения в тексте.  $k_b = 1 \times 10^{-16} \text{ м}^2$ ;  $k_s^{\text{exod}} = 7 \times 10^{-16} \text{ м}^2$ ;  $k_s^{\text{вход}} = 1 \times 10^{-15} \text{ м}^2$ ;  $k_f = 1 \times 10^{-14} \text{ м}^2$ ;  $h_f = 3 \text{ км}$ ;  $\text{grad } p = 2 \text{ МПа/10 км}$ .

структура флюидного массопереноса устойчиво сохранялась при геологически реалистических параметрах предполагаемых условий формирования инфильтрационных месторождений несогласия бассейна Комболджи, она интерпретировалась нами как гипотеза палеогидродинамической модели их происхождения.

По перечисленным выше определяющим параметрам минеральных систем – 1) источник урана, 2) структура флюидопроводимости и 3) движущие силы флюидного массопереноса – предлагаемая гипотеза конкретизирует приведенную в статье (Skirrow et al., 2016) “модель эволюции минеральной системы месторождений несогласия урановорудного района Аллигейтор-Риверс” (Skirrow et al., 2016, фиг. 20) и ее предполагаемую интерпретацию в заявочном докладе (Мальковский и др., 2019).

По вопросу об источнике урана в (Skirrow et al., 2016) предлагалась новая для месторождений несогласия гипотеза мобилизации урана из регионально прослеживающейся под поверхностью несогласия зоны диагенетического или гидротермального изменения урансодержащих пород фундамента бассейна мощностью около 50 м с интенсивностью выноса из нее около половины содержания урана. В (Мальковский и др., 2019) было высказано предположение, что гипотеза о мобилизации урана из зоны изменения урансодержащих пород фундамента бассейна Комболджи под поверхностью несогласия могла быть дополнена его мобилизацией из кластических фракций конгломератов и крупнозернистых песчаников переотложения пород фундамента при миграции диагенетических флюидов по водоносному горизонту над поверхностью несогласия. К этому можно добавить, что возможным источником урана могли быть также урансодержащие метаморфические породы

обширного палеотопографического поднятия Мира Хай (Myra High) на территории бассейна Комболджи (Hiatt et al., 2021, фиг. 11a), которые подвергались активной эрозии напорными потоками высокоэнергетических диагенетических флюидов водоносного горизонта формации Мамадаверре. На юго-западном склоне этого поднятия на палеотопографическом уступе поверхности несогласия высотой до 300 м предположительно сформировалось крупнейшее в урановорудном районе Аллигейтор-Риверс месторождение Джабилука (Polito et al., 2005).

Движущим механизмом флюидного массопереноса в (Skirrow et al., 2016) предполагался процесс свободной тепловой конвекции флюидов: “диагенетические рассолы проникали в богатые ураном архейские и другие породы фундамента на обширной территории, выщелачивая уран и затем транспортируя его по латеральной зоне изменения пород под поверхностью несогласия и далее вниз по сети разломов в региональной конвективной гидротермальной системе, движимой региональным магматизмом” (с. 494). Однако, поскольку движущими силами термоконвективных систем являются вертикальные градиенты плотности флюидов в поле силы тяжести, то предположение о региональной латеральной термоконвективной миграции диагенетических флюидов по площади, оцениваемой по результатам балансовых расчетов  $>60 \text{ км}^2$  (с. 493), представлялось нам проблематичным. Поэтому в предлагаемой гипотезе палеогидродинамики рудообразующей системы было принято, что региональное выщелачивание урана из урансодержащих пород фундамента происходило по объединенному водоносному горизонту в подошве осадочных отложений субгруппы Комболджи при напорном движении диагенетических

флюидов, как это предполагалось в (Kyser, 2007). Движущей силой напорного потока была разность высотных отметок палеотопографического рельефа бассейна Комболджи, которая по результатам его реконструкции в (Hiatt et al., 2021, фиг. 11) “оценивалась в десятки—сотни метров” (с. 1066), при протяженности трассы подземной миграции диагенетических флюидов от водоносных до водоупорных горизонтов от 100 до 200 км.

В качестве основных структурных элементов флюидопроводимости при постановке задачи моделирования (см. фиг. 3) были приняты зона рудоконтролирующего разлома в фундаменте бассейна и объединенный водоносный горизонт в подошве осадочных отложений подгруппы Комболджи. Представление о локализации уранового оруденения при нисходящей инфильтрации уран-транспортирующих флюидов по зонам разломов в фундаменте бассейна является общепринятым для австралийских месторождений несогласия (Jaireth et al., 2015). В предлагаемой нами модели это общепринятое условие конкретизируется требованием превышения в зоне разлома критических значений проницаемости для инициации в нем процесса свободной тепловой конвекции флюидов. При этом, однако, было показано, что в сценариях с только тепловой и смешанной конвекцией в зоне разлома иницируется периодическая структура циркуляции флюидов, которая не согласуется с концепцией инфильтрационного механизма формирования австралийских месторождений несогласия.

Критическая оценка результатов расчета компьютерных моделей со сценариями периодической структуры свободной тепловой конвекции флюидов стала основанием для рассмотрения возможного влияния на палеогидродинамику рудообразующей системы фациальной зональности флюидопроводимости пород нижнего водоносного горизонта формации Мамадаверре субгруппы Комболджи (см. фиг. 2). Анализ условий региональной миграции диагенетических флюидов в масштабе бассейна Комболджи от водоносных до водоупорных горизонтов позволил обосновать представление об определяющей роли зонального снижения проницаемости пород в объединенном водоносном горизонте на условия миграции уран-транспортирующих флюидов. Реализующая это представление гипотеза палеогидродинамических условий формирования австралийских месторождений несогласия включает следующие основные положения:

1) напорный режим движения диагенетических флюидов, обусловленный разностью высотных отметок палеотопографического рельефа бассейна Комболджи;

2) мобилизация урана при напорном латеральном движении диагенетических флюидов по объединенному водоносному горизонту из регионально прослеживаемой зоны изменения урансодержащих пород фундамента бассейна под поверхностью несогласия и из кластических фракций конгломератов и крупнозернистых песчаников переотложения пород фундамента над поверхностью несогласия;

3) зональное распределение первичных обстановок осадконакопления и позднейших диагенетических преобразований, определившее формирование хорошо проницаемых водоносных горизонтов, сложенных конгломератами и крупнозернистыми песчаниками в верховьях речных долин бассейна Комболджи, и менее проницаемых водоупорных горизонтов, сложенных тонкозернистыми песчаниками в осадках равнинных рек на удалении от источника кластического материала;

4) снижение латеральной флюидопроницаемости по региональной трассе напорного движения диагенетических флюидов, задающее смену режима их латеральной миграции по объединенному водоносному горизонту в подошве осадочных отложений подгруппы Комболджи на нисходящую инфильтрацию по поперечной зоне рудоконтролирующего разлома в фундаменте бассейна;

5) структура циркуляции рудообразующих флюидов с устойчиво нисходящей инфильтрацией уран-транспортирующих флюидов из объединенного водоносного горизонта в подошве осадочных отложений бассейна Комболджи в зону поперечного рудолокализирующего разлома в фундаменте бассейна, согласующаяся с представлениями о транспортном механизме формирования австралийских месторождений несогласия.

Отличительной особенностью структуры флюидопроводимости в рудообразующей системе австралийских месторождений несогласия бассейна Комболджи было зональное снижение проницаемости по пути регионального движения диагенетических флюидов от водоносных до водоупорных горизонтов. При напорной миграции уран-транспортирующих флюидов по основному флюидопроводящему горизонту формации Мамадаверре (см. фиг. 2) это направленное снижение проницаемости играло роль определяющего палеогидродинамического условия для формирования руд месторождений по механизму нисходящей инфильтрации

исключительно в породах фундамента бассейна. Однако проведенные нами моделирующие эксперименты позволили заключить, что это условие является проявлением триггерного воздействия тренда зонального изменения проницаемости пород объединенного водоносного горизонта на структуру циркуляции флюидов. В зависимости от альтернативной направленности этого тренда, со снижением или увеличением зонального изменения проницаемости пород объединенного водоносного горизонта происходила смена режима периодической тепловой конвекции соответственно нисходящим или восходящим движениям флюидов по зоне разлома. Пример такой радикальной перестройки структуры циркуляции флюидов в модели на фиг. 8 со сменой режима периодической конвекции нисходящей инфильтрацией по зоне разлома был инициирован линейным градиентом изменения значения проницаемости пород  $grad k_s = (k_s^{вход} - k_s^{выход})/X_{lim}$  по трассе миграции флюидов с ее снижением от входного до выходного сечений объединенного водоносного горизонта  $grad k_{s\downarrow} = (k_s^{вход} - k_s^{выход})/X_{lim} = (1 \times 10^{-15} \text{ м}^2 - 7 \times 10^{-16}) \text{ м}^2 / 10^4 \text{ м} = 3 \times 10^{-20} \text{ м}^2/\text{м}$ .

На фиг. 9 приведен пример перестройки структуры циркуляции флюидов при таком же по абсолютной величине, но противоположно направленном изменении значений проницаемости пород объединенного водоносного горизонта с ее увеличением от входного до выходного сечений  $grad k_{s\uparrow} = (k_s^{вход} - k_s^{выход})/X_{lim} = (7 \times 10^{-16} \text{ м}^2 - 1 \times 10^{-15}) \text{ м}^2 / 10^4 \text{ м} = -3 \times 10^{-20} \text{ м}^2/\text{м}$ . При этом режим периодической конвекции трансформируется в устойчиво восходящий эксфильтрационный поток по зоне разлома.

Поскольку в канадских месторождениях несогласия формирование рудных тел происходило по механизмам как нисходящей инфильтрации, так и восходящей эксфильтрации по зонам рудоконтролирующих разломов (см. фиг. 1), представлялось очевидным задать вопрос о возможном воздействии структур циркуляции флюидов, иллюстрируемых результатами моделирующих расчетов на фиг. 8 и 9, на формирование месторождений несогласия также и в канадском бассейне Атабаска.

Палеогидродинамика рудообразующих систем месторождений несогласия предполагает фильтрационный обмен флюидами между кластическим заполнением и метаморфическими породами фундамента осадочных бассейнов (Voiron et al., 2010). Основными каналами такого обмена в бассейне Атабаска были зоны крутопадающих разломов с субвертикальной миграцией флюидов (Jefferson et al., 2007). Однако в (Hiatt, Kyser, 2007)

по результатам систематического исследования литофаций осадочных пород группы Атабаска была разработана также гидростратиграфическая модель латеральной миграции флюидов в подошве кластического заполнения бассейна (Hiatt, Kyser, 2007, fig. 12; Kyser, Cuney, 2009, фиг. 8—14). Основным транспортным каналом латеральной миграции флюидов были хорошо проницаемые конгломераты и грубозернистые песчаники базальных литофаций MFa и MFb формации Маниту-Фолс (Manitou Falls Formation) над поверхностью несогласия (Hiatt, Kyser, 2007, фиг. 11). Они формировались при отложении высокоэнергетическими речными потоками кластического материала, “выносившегося из прилегающих палеовозвышенностей, окаймлявших восточную окраину бассейна” (Hiatt, Kyser, 2007, p. 13). При этом в изученных авторами профилях бассейна Атабаска в районах месторождений Мак-Артур Ривер и Сигар Лейк “вертикальное превышение рельефа составляло 85 м на интервале 15 км или 6 м/км по профилю Мак-Артур Ривер и 30 м на интервале 1500 м или 20 м/км по профилю Сигар Лейк” (с. 8).

Грубозернистый обломочный материал литофаций MFa и MFb нижних базальных горизонтов формации Маниту-Фолс сменяется вверх по стратиграфическому разрезу литофациями MFc и MFd «среднезернистых умеренно и хорошо отсортированных песчаников, которые интерпретируются как отложения удаленных разветвленных средне- и низкоэнергетических речных систем» (с. 7). При этом породы водоносных горизонтов формации Маниту-Фолс “подвергались широкомасштабному воздействию латеральных потоков диагенетических флюидов на расстояниях в сотни километров с проявлениями пикового диагенеза при погружении на глубину около 5 км... при температурах выше 200°C в течение как минимум 600 млн лет” (с. 4). Движущей силой латеральной миграции диагенетических флюидов “был, вероятно, тектонический наклон бассейна на восток» (с. 16).

Сравнение приведенных выборочных цитат для бассейна Атабаска из (Hiatt, Kyser, 2007) с предполагаемыми палеогидродинамическими условиями в бассейне Комболджи позволяет заключить, что обстановки формирования месторождений несогласия характеризовались наличием в подошве литостратиграфического разреза обоих бассейнов высокопроницаемого водоносного горизонта, по которому происходила палеотопографически обусловленная миграция диагенетических урантранспортирующих флюидов. Различие в представлениях об источнике урана

при этом принципиального значения не имеет, так как в качестве непосредственного источника урана месторождений в обоих бассейнах предполагались окислительные диагенетические флюиды их осадочного заполнения. Основным же отличием условий формирования месторождений несогласия в бассейне Атабаска (Канада) от предполагаемой палеогидродинамической модели формирования месторождений несогласия в бассейне Комболджи (Австралия) было отсутствие регионального тренда снижения проницаемости пород в основном флюидопроводящем горизонте бассейна Атабаска, который обуславливал бы формирование только инфильтрационных месторождений, как в бассейне Комболджи.

Однако в бассейне Атабаска на латеральную миграцию диагенетических урантранспортирующих флюидов оказывали влияние многочисленные локальные деформации рельефа поверхности несогласия, “которые являлись продуктом действия трех основных факторов: (i) образования зон хрупко-пластических разломов и изменения пород до отложения пород группы Атабаска, (ii) дифференциального выветривания и эрозии и (iii) хрупко-пластической реактивации зон ранее сформировавшихся графитсодержащих пластических сдвигов во время и после отложения пород группы Атабаска” (Li et al., 2015, с. 903). При этом характерными топографическими формами рельефа поверхности несогласия, особенно в юго-восточной части бассейна Атабаска, были «кварцитовые хребты» (quartzite ridges) (Card, 2012), породы которых с содержанием кварца от 80 до почти 100% традиционно интерпретировались как метаморфические ортокварциты осадочного происхождения (Annesley et al., 2005). Однако проведенные позднее Кардом (Card, 2014) детальные макроскопические, мезоскопические и микроскопические исследования по сопоставлению результатов геологического картирования и документации керн буровых скважин позволили заключить, что они “представляют собой не метаморфизованные кварцевые песчаники, но зоны окварцевания, возникшие в результате интенсивного взаимодействия флюид–порода” (с. 21), при метасоматическом замещении кварцем вмещающих гнейсов и пегматитов вдоль ранних разломов фундамента бассейна. При последующем аплифте породы фундамента подверглись дифференциальному выветриванию с образованием пониженных участков рельефа при избирательной эрозии метапелитовых гнейсов с сохранением окварцованных пород вдоль ранних разломов в виде линейных зон топографических поднятий.

Кварцитовые хребты, образовавшиеся на завершающих этапах Транс-Гудзонской орогении, “возможно, фактически играли двойную роль, будучи компетентными образованиями, они влияли на локализацию пост-Атабасских разломов и в то же время действовали как водоупоры, направляя потоки флюидов, связанные с минерализацией” (Li et al., 2015, с. 917). При этом в рудообразующей системе бассейна Атабаска могли реализовываться палеогидродинамические условия для инициации процессов образования как инфильтрационных, так и эксфильтрационных месторождений несогласия. Если кварцитовые выступы рельефа фундамента обладали пониженной проницаемостью по сравнению с относительно хорошо проницаемыми отложениями нижних горизонтов формации Маниту-Фоллс, то по трассе латеральной миграции диагенетических урантранспортирующих флюидов происходило направленное снижение проницаемости пород по мере приближения к кварцовому водоупору, по трассе же дальнейшего движения потока после прохождения кварцового водоупора происходило, наоборот, направленное повышение проницаемости. При этом, если на интервалах перед или после кварцового барьера латеральный поток ураноносных флюидов пересекал крутопадающую зону хорошо проницаемого разлома, то, согласно результатам моделирующих расчетов, приведенных на фиг. 8 и 9, вдоль зоны разлома должны были формироваться сопряженные с латеральным потоком ветви нисходящего (при тренде снижения проницаемости) или восходящего (при тренде увеличения проницаемости) движения флюидов. Такая потенциально рудопродуктивная структура циркуляции урантранспортирующих флюидов могла быть предполагаемым механизмом синхронного формирования в юго-восточной части бассейна Атабаска инфильтрационного месторождения Грифон и эксфильтрационного месторождения Феникс по различным сторонам от разделяющего их кварцового барьера.

В статье (Li et al., 2018), посвященной проблеме образования месторождений Грифон и Феникс, была предложена гипотеза их синхронного формирования в общем поле компрессионной деформации. При этом основной причиной различной инфильтрационной и эксфильтрационной локализации месторождений было различие в реологических свойствах вмещающих пород в фундаменте бассейна: “локальные вариации в геологии фундамента могут приводить одновременно как к инфильтрации, так и к эксфильтрации флюидов” (с. 290). Принимая это заключение,

концептуальная основа которого радикально отличается от проводимого нами анализа, мы со своей стороны предполагаем, что заявленная выше концепция палеогидродинамики рудообразующей системы с латеральной миграцией урантранспортирующих флюидов в подошве литостратиграфического разреза пород группы Атабаска, функционально сопряженной с процессами их субвертикальной нисходящей и восходящей миграции по зонам рудоконтролирующих разломов, может трактоваться как альтернативная версия формирования канадских месторождений бассейна Атабаска с различной локализацией по отношению к поверхности несогласия.

Месторождение Грифон локализовано на глубине от 580 до 850 м от дневной поверхности на расстоянии от 80 до 370 м от поверхности несогласия. Основная часть рудной минерализации представлена серией из четырех удлиненных линз, локализованных в “графит-пелитовых” и “пегматит-пелитовых” гнейсах вдоль зоны взброса с юго-восточным падением под углом  $50^\circ$  с вертикальным смещением поверхности несогласия около 60 м. Месторождение Феникс локализовано вдоль поверхности несогласия с породами фундамента на глубине около 400 м от дневной поверхности. Основной контролирующей структурой является взброс с юго-восточным падением под углом  $55^\circ$  с вертикальным смещением около 10 м. Рудная минерализация локализована в “графит-пелитовых” гнейсах с богатыми рудами, прилегающими к зоне разлома, который трассируется вдоль юго-восточного контакта кварцитового выступа рельефа фундамента на расстоянии около 60 м.

Приводимые ниже сведения о проницаемости пород вдоль трассы миграции диагенетических урантранспортирующих флюидов при формировании месторождений Грифон и Феникс были заимствованы из статьи (Li et al., 2018) и отчета компании Денисон Майнс (Denison Mines) по материалам разведки урановых месторождений в районе Уиллер Ривер (Reipas, 2016). Для сравнения с постановкой задачи моделирования по обеим сторонам от кварцитового выступа были выделены участки, включающие зоны разломов месторождений Грифон и Феникс, с протяженностью 10 км, как на фиг. 8 и 9. Эти участки включают последовательные интервалы по направлению движения латерального потока (Li et al., 2018, fig. 3a): 1) расстояние 9 км до разлома месторождения Грифон, 2) около 1 км от разлома месторождения Грифон до северо-западного контакта кварцитового выступа, 3) около 2 км по водоупорным породам

кварцитового выступа, 4) 60 м от юго-восточного контакта кварцитового выступа до разлома месторождения Феникс и 5) расстояние 9940 м вниз по течению от разлома месторождения Феникс. На интервалах (1) и (2) по трассе миграции происходило снижение проницаемости пород от хорошо проницаемых конгломератов и грубозернистых песчаников базальных горизонтов формации Маниту-Фолс (Hiatt, Kyser, 2007, фиг. 11) до низкопроницаемых пород кварцитового выступа. На интервале (3) происходило рассредоточенное перетекание флюидов по сечению кварцитового водоупора. На интервалах (4) и (5) происходило возвратное увеличение проницаемости пород по мере удаления от кварцитового выступа. В соответствии с этими трендами изменение проницаемости происходило, как на схемах циркуляции флюидов на фиг. 8 и 9, по зоне разлома месторождения Грифон – нисходящее, по разлому месторождения Феникс – восходящее движение флюидов.

Для проницаемости конгломератов и грубозернистых песчаников базальных горизонтов формации Маниту-Фолс было принято значение  $k_{MF} = 1 \times 10^{-13} \text{ м}^2$ , (Reipas, 2016, фиг. 16–1), для проницаемости пород кварцитового выступа  $k_{qr} = 1 \times 10^{-17} \text{ м}^2$  (Li et al, 2018, табл. 1). При таких граничных значениях проницаемости линейный градиент изменения проницаемости пород вдоль основного транспортного канала латеральной миграции урантранспортирующих флюидов с протяженностью 10 км на интервалах (1) – (2) до северо-западного контакта кварцитового выступа при формировании месторождения Грифон равен  $grad k_{\downarrow} = (1 \times 10^{-13} - 1 \times 10^{-17}) \text{ м}^2 / 10^4 \text{ м} = 9.999 \times 10^{-18} \text{ м}^2 / \text{м} \sim 1 \times 10^{-17} \text{ м}^2 / \text{м}$ , при формировании вниз по течению от юго-восточного контакта кварцитового выступа месторождения Феникс  $grad k_{\uparrow} = (1 \times 10^{-17} - 1 \times 10^{-13}) \text{ м}^2 / 10^4 \text{ м} = -9.999 \times 10^{-18} \text{ м}^2 / \text{м} \sim -1 \times 10^{-17} \text{ м}^2 / \text{м}$ . Эти значения линейных градиентов изменения проницаемости пород по трассе латеральной миграции урантранспортирующих флюидов при формировании инфильтрационного месторождения Грифон и эксфильтрационного месторождения Феникс более чем в 300 раз превосходят значения линейных градиентов изменения проницаемости пород по объединенному водоносному горизонту в моделирующих экспериментах на фиг. 8 и 9. Поэтому приведенные результаты анализа воздействия низкопроницаемого кварцитового выступа на структуру циркуляции диагенетических урантранспортирующих флюидов в палеогидротермальной рудообразующей системе бассейна Атабаска согласуются с заявленным выше предположением

о возможном влиянии локальных топографических особенностей рельефа поверхности несогласия на формирование как инфильтрационных, так и эксфильтрационных месторождений несогласия. Обоснование такой интерпретации потребует, конечно, проведения проблемно ориентированных исследований. Однако авторы надеются, что основная идея предположения о концептуальной близости палеогидродинамических механизмов формирования австралийских и канадских месторождений несогласия заслуживает дальнейшего более детального рассмотрения.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны двум неизвестным рецензентам и И.В. Викентьеву за замечания и предложения, высказанные в ходе работы над окончательной версией рукописи статьи.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

*Жидовинов Н.Я., Староверов В.Н.* Фациальный анализ: Учебное пособие // Саратов: Издательский центр «Наука», 2008. 200 с.

*Крашенинников Г.Ф.* Учение о фациях. Учеб. пособие. М., «Высшая школа», 1971. 368 с.

*Кузнецов В.Г.* Фации и фациальный анализ в нефтегазовой геологии: Учебник для вузов. М.: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина, 2012. 244 с.

*Мальковский В.И., Пэк А.А.* Условия развития тепловой конвекции однофазного флюида в вертикальном открытом разломе // Известия РАН. Физика Земли. 2004. Т. 40. № 8. С. 70—78.

*Мальковский В.И., Пэк А.А., Скирров Р., Бастраков Е.* О режимах миграции флюидов при формировании урановых месторождений несогласия в районе Аллигейтор-Риверс (Австралия) // Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле: Матер. 20-й Междунар. конф. М.: 2019. С. 214—217.

*Пэк А.А., Мальковский В.И.* Тепловая конвекция как возможный механизм формирования урановых месторождений типа несогласия в бассейне Атабаска (Канада) // Месторождения стратегических металлов: закономерности размещения, источники вещества, условия и механизмы образования: Матер. Всерос. конф. Москва 25—27 ноября. ИГЕМ РАН, 2015. С. 142—143.

*Пэк А.А., Мальковский В.И.* Роль тепловой конвекции флюидов в формировании урановых месторождений типа несогласия: бассейн Атабаска (Канада) // Геология рудн. месторождений. 2017. Т. 59. № 3. С. 201—219.

*Пэк А.А., Мальковский В.И., Петров В.А.* О формировании уникально богатых руд урановых месторождений несогласия бассейна Атабаска (Канада): гипотеза многоэтапного телескопированного отложения руд // Геология рудн. месторождений. 2022. Том 64. № 1. С. 73—92.

*Тарханов А.В., Бугриева Е.П.* Значимость и перспективы геолого-промышленных типов урановых месторождений. М.: ВИМС, 2017. 106 с.

*Рединг Х.Г.* Обстановки осадконакопления и фации: В 2-х т. Т. I: Пер. с англ. под ред. Х. Рединга. М.: Мир, 1990. 352 с.

*Шатский Н.С.* Фации и формации (Грессли и его учение о фациях). Избранные труды. Т. IV. М.: Наука, 1965. С. 219—232.

*Шумилин М.В.* Урановые месторождения “несогласия”. Перспективы открытия в России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2011. № 5. С. 70—75.

*Ahmad M., Hollis J.A.* Chapter 5: Pine Creek Orogen: in Ahmad M. and Munson T.J. (compilers). ‘Geology and mineral resources of the Northern Territory’. Northern Territory Geological Survey, Special Publication 5. 2013. P. 5:1—5:133.

*Annesley I.R., Madore C., Portella P.* Geology and tectonic evolution of the western margin of the Trans-Hudson Orogen: evidence from the eastern sub-Athabasca basement, Saskatchewan // Canadian J. Earth Science. 2005. 42. P. 573—597.

*Beaufort D., Patrier P., Laverret E., Bruneton P., Mondy J.* Clay alteration associated with Proterozoic unconformity-type uranium deposits in the East Alligator Rivers uranium field, Northern Territory, Australia // Econ. Geol. 2005. V. 100. P. 515—536.

*Binns R.A., McAndrew, Sun S-S.* Origin of uranium mineralization at Jabiluka // Uranium in the Pine Creek geosyncline. Vienna. IAEA, 1980. P. 543—562.

*Boiron M.-C., Cathelineau M., Richard A.* Fluid flows and metal deposition near basement/cover unconformity: lessons and analogies from Pb—Zn—F—Ba systems for the understanding of Proterozoic U deposits // Geofluids. 2010. V. 10. P. 270—292.

*Card C.D.* The origins of anomalously graphitic rocks and quartzite ridges in the basement to the southeastern Athabasca Basin // Summary of Investigations 2012, Volume 2, Saskatchewan Geological Survey, Sask. Ministry of the Economy, Misc. Rep. 2012—4.2, Paper A-6. 2012. 15 p.

*Card C.* Altered pelitic gneisses and associated “Quartzite Ridges” Beneath the Southeastern

- Athabasca Basin: alteration facies and their relationship to uranium deposits along the Wollaston-Mudjatik Transition // Summary of Investigations 2013, Volume 2, Saskatchewan Geological Survey, Sask. Ministry of the Economy, Misc. Rep. 2013—4.2, Paper A-4., 2014. 23 p.
- Cui T., Yang J. and Samson I.M.* Tectonic deformation and fluid flow: implications for the formation of unconformity-related uranium deposits // *Econ. Geol.* 2012. V. 107. P. 147—163.
- Derome D., Cuney M., Cathelineau M., Fabre C., Dubessy J., Bruneton P., Hubert A.* A detailed fluid inclusion study in silicified breccias from the Kombolgie sandstones (Northern Territory, Australia): Inferences for the genesis of middle-Proterozoic unconformity-type uranium deposits // *J. Geochem. Explor.* 2003. V. 80. P. 259—275.
- Derome D., Cathelineau M., Fabre C., Boiron M.C., Banks D., Lhomme T., Cuney M.* Paleo-fluid composition determined from individual fluid inclusions by Raman and LIBS: Application to mid-proterozoic evaporitic Na-Ca brines (Alligator Rivers Uranium Field, northern territories Australia) // *Chem. Geol.* 2007. V. 237. P. 240—254.
- 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.
- Ferguson J., Ewers G.R., Donnelly T.H.* Model for the development of economic uranium mineralization in the Alligator Rivers Uranium Field // *Uranium in the Pine Creek geosyncline.* Vienna. IAEA, 1980. P. 563—574.
- Gaboreau S., Beaufort D., Vieillard P., Patrier P.* Aluminium phosphate-sulfate minerals associated with Proterozoic unconformity-type uranium deposits in the East Alligator River uranium field, Northern Territories, Australia // *Can. Mineral.* 2005. V. 43. P. 83—827.
- Geological Classification of Uranium Deposits and Description of Selected Examples // IAEA TECDOC-1842. IAEA, Vienna. 2018. 417 p.
- Hiatt E.E., Kyser T.K., Fayek M., Polito P., Holk G.J., Riciputi L.R.* Early quartz cements and evolution of paleohydraulic properties of basal sandstones in three Paleoproterozoic continental basins: Evidence from in situ  $\delta^{18}\text{O}$  analysis of quartz cements // *Chem. Geol.* 2007. 238. P. 19—37.
- Hiatt E.E., Kyser T.K.* Sequence stratigraphy, hydrostratigraphy, and mineralizing fluid flow in the Proterozoic Manitou Falls Formation, eastern Athabasca Basin, Saskatchewan // *EXTECH IV: Geology and Uranium EXploration TEChnology of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta*, (ed.) C.W. Jefferson and G. Delaney. Geological Survey of Canada, Bulletin 588. 2007. P. 489—506.
- Hiatt E.E., Kyser T.K., Polito P.A., Marlatt J., Pufahp P.* The Paleoproterozoic Kombolgie subgroup (1.8 GA), McArthur Basin, Australia: sequence stratigraphy, basin evolution, and unconformity-related uranium deposits following the Great Oxidation Event // *Can. Mineral.* 2021. V. 59. P. 1049—1083.
- 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., Sibbald T.I.I., Ramaekers P., Lewry J.F.* Athabasca Basin unconformity-type uranium deposits: A special case of sandstone-type deposits? // *Uranium in the Pine Creek geosyncline.* Vienna. IAEA, 1980. P. 575—594.
- Jaireth S., Roach I.C., Bastrakov E., Liu S.* Basin-related uranium mineral systems in Australia: A review of critical features // *Ore Geol. Rev.* 2015. V. 76. P. 360—394.
- 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: Geological Association of Canada Mineral Deposits Division, Special Publication no. 5. 2007. P. 273—305.
- Kyser T.K.* Fluids, basin analysis and mineral deposits. *Geofluids.* 2007. V. 7. P. 238—257.
- Kyser K., Cuney M.* Unconformity-related uranium deposits. 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., Bethune K.M., Chi G., Bosman S.A., Card C.D.* Topographic features of the sub-Athabasca Group unconformity surface in the southeastern Athabasca Basin and their relationship to uranium ore deposits // *Canadian Journal of Earth Science.* 2015. 52. P. 903—920.
- 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. 53. P. 277—292.
- 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. 110. P. 25—39.
- Needham R.S.* Geology of the alligator uranium field, Northern Territory, Australia // *BMR Bulletin* 224. 1988. 96 p.
- Pek A.A., Malkovsky V.I.* Linked thermal convection of the basement and basinal fluids in formation of the unconformity-related uranium deposits in the Athabasca Basin, Saskatchewan, Canada // *Geofluids.* 2016. V. 16. Is. 5. P. 925—940.
- Polito P.A., Kyser T.K., Marlatt J., Alexandre P., Bajwah Z., Drever G.* Significance of alteration assemblages

- for the origin and evolution of the Proterozoic Nabarlek unconformity-related uranium deposit, Northern Territory, Australia // *Econ. Geol.* 2004. V. 99. P. 111–139.
- Polito P.A., Kyser T.K., Thomas D., Marlatt J., Drevler G. Re-evaluation of the petrogenesis of the Proterozoic Jabiluka unconformity-related uranium deposit, Northern Territory, Australia // *Mineral. Deposita*. 2005. 40. P. 257–288.
- Polito P.A., Kyser T.K., Alexandre P., Hiatt E.E., Stanley C.R. Advances in understanding the Kombolgie Subgroup and unconformity-related uranium deposits in the Alligator Rivers Uranium Field and how to explore for them using lithogeochemical principles // *Australian J. Earth Sciences: An International Geoscience Journal of the Geological Society of Australia*. 2011. 58:5. P. 453–474.
- Reipas K. Preliminary Economic Assessment for the Wheeler River Uranium Project, Saskatchewan, Canada // National Instrument 43–101 Technical Report Prepared for Denison Mines Corporation. 2016. 289 p.
- 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.
- Skirrow R.G., Mercadier J., Armstrong, R., Kuske, T., DeLoule E. The Ranger uranium deposit, northern Australia: Timing constraints, regional and ore-related alteration, and genetic implications for unconformity-related mineralization // *Ore Geol. Rev.* 2016. V. 76. 463–503.
- Uranium in the Pine Creek geosyncline. Vienna. IAEA. 1980. 712 p.
- Unconformity-related Uranium Deposits. IAEA-TECDOC-1857. IAEA, Vienna. 2018. 295 p.

## FLUID MIGRATION REGIMES DURING THE FORMATION OF THE UNCONFORMITY-RELATED URANIUM DEPOSITS OF THE ALLIGATOR RIVERS URANIUM FIELD, AUSTRALIA

A. A. Pek<sup>1</sup>, \*, V. I. Malkovsky<sup>1</sup>, and V. A. Petrov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy, and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia*

\*e-mail: aapek@mail.ru

In world U production, the unconformity-related deposits currently yield ~24%. The main unconformity-related deposits were found in the Athabasca U-bearing province in the southwestern part of the Canadian Shield and Alligator Rivers Uranium Field of the North Australian Shield. The deposits are localized close to the surfaces of structural-stratigraphic unconformity in the bottom of sedimentary basins: Athabasca in Canada and Kombolgie in Australia. According to a series of geological–structural parameters of formation, the Canadian and Australian unconformity-related deposits significantly differ allowing their classification as subtypes. In the Canadian deposits, the ore bodies occur both above and beneath the unconformity surface of the Athabasca basin, whereas the ores of the Australian deposits are localized exclusively beneath the unconformity surface in rocks of the basement of the Kombolgie basin. This paper is devoted to the reconstruction of paleohydrodynamic formation conditions of the Australian unconformity-related deposits. The computer models of fluid migration of following three scenarios were successively considered during the analysis of fluid mass transfer processes: (i) *thermal fluid convection in a fault zone* with periodic upward and downward free thermal fluid convection, (ii) *forced convective fluid migration* at subcritical permeability and therefore the absence of free thermal convection in the fault zone, and (iii) *mixed convection* with upward and downward fluid movement along the fault zone. We concluded that the processes of periodic thermal convective fluid circulation in the fault zone contradict the idea of infiltration mechanism of the formation of the Australian unconformity-related deposits in fault zones in the basement of the Kombolgie basin. We, therefore, considered possible influence of facies zoning of a combined aquifer in the basement of clastic sediments of the Kombolgie Supergroup on paleohydrodynamics of the ore-bearing system, which played the role of a main migration pass for U-transporting fluids. The analysis of zonal distribution of primary sedimentation environments and later diagenetic transformations of rocks of aquifers and aquitards of this basin allowed us to substantiate an idea on leading influence of zonal decrease in permeability of rocks of the combined aquifer on a circulation structure of U-transporting fluids with the change in their lateral migration in the basement of sedimentary deposits of the Kombolgie Supergroup on the downward infiltration along a transverse zone of the ore-controlling fault. This circulation of the structure of U-transporting fluids was accepted as a hypothesis of paleohydrodynamic formation conditions of Australian unconformity-related deposits exclusively in rocks of the basement of the Kombolgie basin. The additional computer calculations, however, showed that a trend of the directed change in the permeability of rocks along the lateral



movement pass of U-transporting fluids is a trigger condition, which can be responsible both for the upward and downward fluid movement along the ore-bearing fault zone depending on the direction of the trend. In the Kombolgie basin in Australia, the direction of this trend depended on the change of facies conditions on the regional migration pass of diagenetic fluids, whereas the local topographic features of the unconformity surface could affect the Athabasca basin in Canada. At an alternative trend of variation in permeability along the lateral migration of U-transporting fluids, the proposed transport mechanism of the formation of the Australian unconformity-related deposits could probably contribute also to the formation both of infiltration and exfiltration Canadian unconformity-related deposits, which are described by a paleohydrodynamic interfault geothermal convection model.

*Keywords:* unconformity-related uranium deposits, facies correlation law, Kombolgie basin, Athabasca basin