

УДК 553.2:556.3.01

МИНЕРАЛЬНАЯ СИСТЕМА УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ СТРЕЛЬЦОВСКОЙ КАЛЬДЕРЫ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

© 2020 г. А. А. Пэк^а, *, В. И. Мальковский^а, В. А. Петров^а

^аИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер., 35, Москва, Ж-17, 119017 Россия

*e-mail: pek@igem.ru

Поступила в редакцию 25.05.2019 г.

После доработки 20.09.2019 г.

Принята к публикации 23.09.2019 г.

По вопросам об источниках рудного вещества и рудообразующих флюидов месторождений Стрельцовского рудного поля с крупнейшими в мире общими запасами более 250 тыс. т урана в литературе высказывались различные, в том числе, альтернативные гипотезы, предполагающие: (1) привнос урана восходящим потоком рудообразующих флюидов, отделившихся от глубинного подкорового или внутрикорового очага ураносодержащих кислых магм, и (2) мобилизацию урана из ураносодержащих пород вулканогенно-тектонической структуры Стрельцовской кальдеры процессом поствулканической термоконвективной циркуляции рудообразующих флюидов. Для обеих гипотез авторами ранее были разработаны компьютерные модели палеогидродинамических условий формирования крупнейшего в рудном поле Антей-Стрельцовского месторождения, которые предполагали различные транспортные механизмы миграции урана с вынужденной и свободной тепловой конвекцией флюидов соответственно. Для обеих моделей было получено согласование расчетных результатов со сведениями о запасах и температурах образования руд Антей-Стрельцовского месторождения. Однако, поскольку компьютерные модели представляют упрощенный образ рудообразующих систем, такое согласование результатов моделирования с природным прообразом свидетельствовало лишь о *возможности* предполагаемых представлений об условиях формирования месторождений. Для решения вопроса об их *реалистичности* необходимо было привлечение дополнительной информации. Поэтому в настоящей статье авторы предприняли попытку сравнительного рассмотрения предполагаемых альтернативных интерпретаций формирования Антей-Стрельцовского месторождения, используя методологию анализа, разработанную в концепции минеральных систем. Проведенный анализ позволил обосновать представление о преемственных формах переноса урана магматическим расплавом и рудообразующим флюидом в минеральную систему Стрельцовского рудного поля. Глубинный магматический источник был питающим очагом для переноса урана магматическими расплавами в верхние горизонты коры с формированием ураносодержащих пород субвулканического очага и вулканических извержений Стрельцовской кальдеры. После привноса урана магматическими расплавами его дальнейшее перераспределение происходило в палеогидротермальной системе со свободной тепловой конвекцией флюидов в остаточном тепловом поле субвулканического очага Стрельцовской кальдеры. При этом в контуре термоконвективной циркуляции флюидов могли реализовываться сопряженные процессы мобилизации урана: (1) из консолидированного субвулканического очага, (2) из гранитоидных пород фундамента кальдеры и (3) из покровов кислых вулканических пород в вулканогенно-осадочном чехле кальдеры. Соучастие в формировании рудной минерализации этих трех потенциально высокопродуктивных источников урана предположительно объясняет происхождение уникальных урановорудных запасов месторождений Стрельцовского рудного поля.

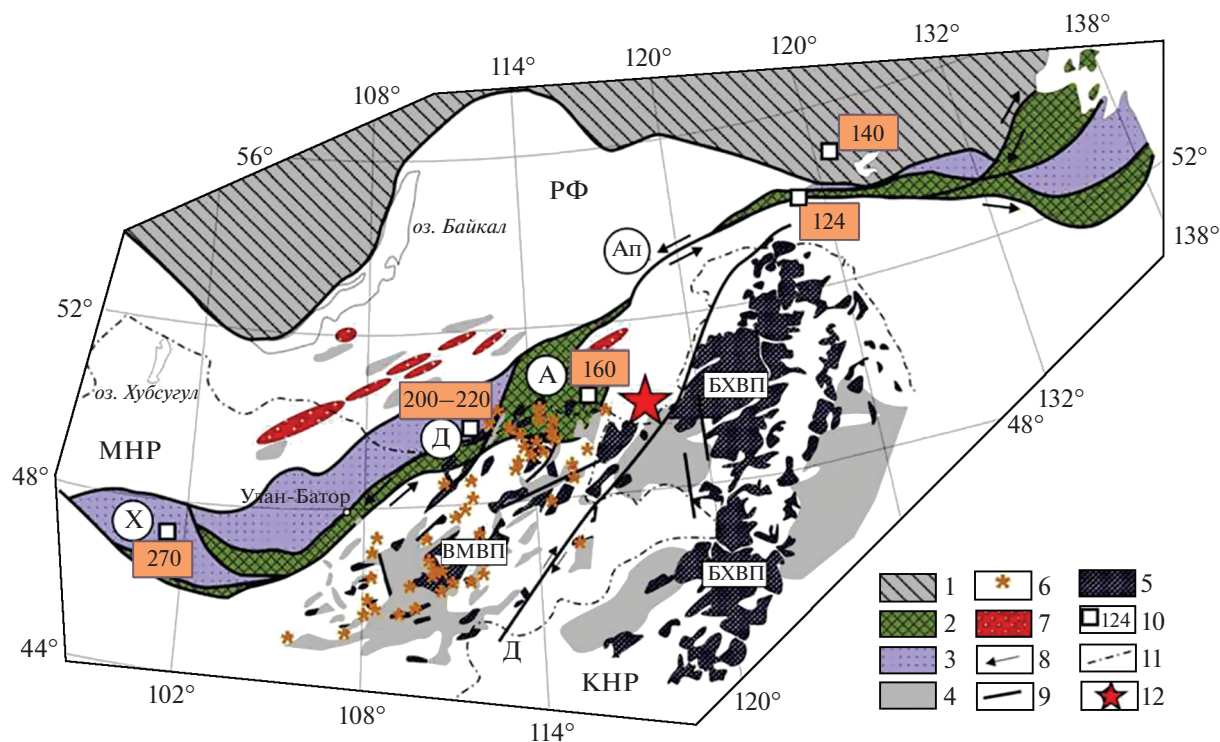
Ключевые слова: свободная тепловая конвекция флюидов, вулканические кальдеры, урановые месторождения, гидротермальное рудообразование

DOI: 10.31857/S0016777020010050

ВВЕДЕНИЕ

Стрельцовская кальдера позднемезозойского возраста входит в состав Тулукуевской вулканогенно-тектонической структуры, которая является элементом Монголо-Охотского складчатого пояса и рас-

полагается в западной части Аргунского геотектонического блока (Ищукова и др., 1998). Кальдера локализована в районе сочленения двух мезозойских вулканических поясов: Восточно-Монгольского и Большехинганского (фиг. 1). В пределах кальдеры сосредоточены 19 гидротермальных мо-

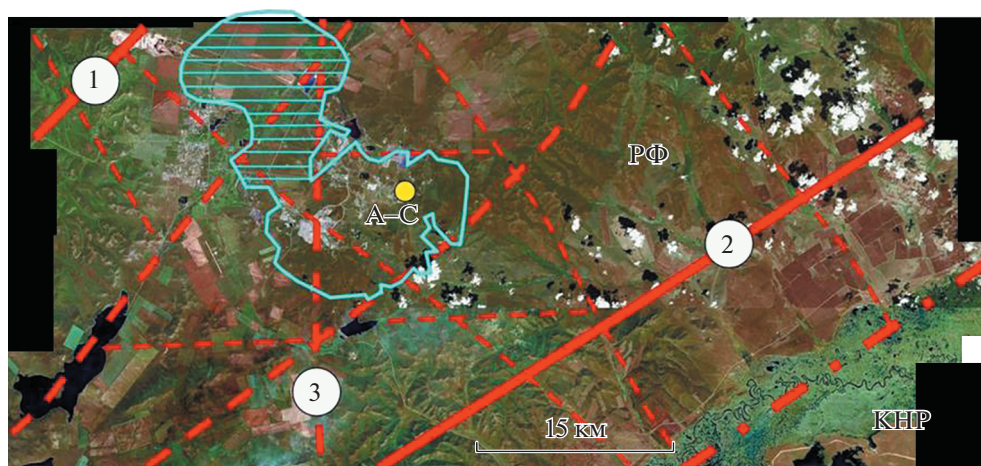


Фиг. 1. Геологическая схема Монголо-Охотского орогенного пояса и его обрамления с положением Стрельцовой кальдеры (по Коваленко и др., 2014, 2015). 1 – докембрийские кратоны; 2 – преимущественно океанические и островодужные террейны; 3 – преимущественно турбидитовые террейны; 4 – мезозойские впадины растяжения; 5 – вулканические пояса; 6 – вулканические центры; 7 – гранито-гнейсовые купола; 8 – направления перемещения блоков; 9 – разломы; 10 – время коллизионных деформаций; 11 – государственные границы; 12 – Стрельцовская кальдера. Буквенные обозначения: X – Хангайское нагорье, Д – Джаргалантуинский прогиб, А – Агинская зона, Ап – Аникийнский порог, ВМВП – Восточно-Монгольский вулканический пояс, БХВП – Большехинганский вулканический пояс, Д – Даэрбуланская система разломов.

либден-урановых месторождений Стрельцовского рудного поля (СРП) с общими запасами около 300 тыс. т U (Тарханов, Бугреева, 2012). Это выводит СРП в разряд уникальных рудных объектов в классификационном типе вулканогенных урановых месторождений, принятом МАГАТЭ (World..., 2009; Uranium..., 2016).

Стрельцовская кальдера обрушения площадью около 140 км² ограничена системой кольцевых сбросов с амплитудами до 700 м (фиг. 2). Вулканогенно-осадочная толща заполнения кальдеры представлена чередованием покровов основного и кислого состава, разделенных горизонтами осадочных пород. В нижней части разреза преобладают эффузивы базальтов, андезитов и трахидацитов, в верхней – покровы риолитов. Фундамент кальдеры сложен раннепалеозойскими гранито-гнейсами и позднепалеозойскими гранитами с ксенолитами древних метаморфических пород – гнейсов, сланцев, амфиболитов и мраморов. Руды месторождений локализованы как в вулканогенно-осадочном комплексе (месторождения Стрельцовское, Тулукуевское и др.), так и в породах фундамента (месторождения Антей и Аргунское).

Промышленное урановое оруденение в Стрельцовой кальдере было выявлено в 1963 году, отработка месторождений началась в 1968 году (карьером на месторождении Тулукуевское). За прошедшие десятилетия по вопросу о генезисе урановых месторождений Стрельцовой кальдеры в литературе высказывались различные точки зрения. По представлениям авторов первой обобщающей монографии о геологии урановых месторождений СРП (Ищукова и др., 1998), изданной в ограниченном количестве экземпляров (60) и переизданной с дополнениями и увеличенным тиражом в 2007 году, по наиболее дискуссионной проблеме источников рудного вещества “к настоящему времени обозначились три основных направления в решении этого вопроса. Источниками урана являются: 1 – внутрикоровые очаги кислой магмы, 2 – боковые специализированные на уран рудовмещающие породы, из которых фильтрующиеся растворы мобилизуют уран, 3 – глубинные подкоровые (мантийные) очаги” (Ищукова и др., 2007, стр. 239). Внутрикоровый магматический очаг кислой магмы был в Стрельцовой кальдере источником риолитовых лав и туфов вулканических



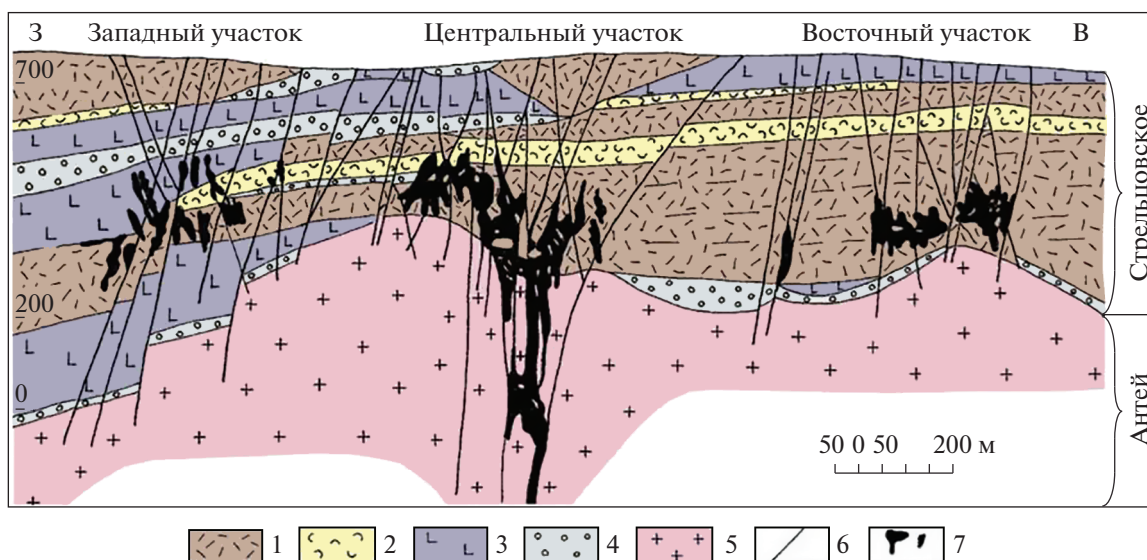
Фиг. 2. Космоснимок района Стрельцовской кальдеры с суперпозицией ее границ, основных зон разломов и положением Антей-Стрельцовского (А-С) месторождения. Заштрихована часть кальдеры, погруженная под осадками впадины Сухой Урулюнгуи. Зоны региональных разломов: 1 – Восточно-Урулюнгуевская, 2 – Южно-Аргунская, 3 – Меридианальная.

извержений, но его роль как возможного магматогенного источника рудообразующих флюидов не могла быть значительной, поскольку “урановые месторождения сформировались после значительного перерыва во времени между вулканизмом и гидротермальным рудообразованием” (стр. 239). Представление о том, что возможным источником урана могли быть ураноносные гранитоиды и гранитизированные породы фундамента Стрельцовской кальдеры, для которых был установлен дефицит урана в зонах, подвергшихся метасоматической гранитизации, было высказано в более ранних публикациях 1980-х гг. (Модников, Сычев, 1984; Наумов, 1985). Однако и это предположение было расценено в (Ищукова и др., 2007) также как проблематичное на том основании, что вследствие высокой радиохимической дифференцированности зон привноса и выноса урана “этими фактами трудно объяснить формирование урановых руд... за счет его извлечения из боковых пород” (стр. 240). Поэтому из числа перечисленных выше трех возможных объяснений источников урана авторами первого и до настоящего времени наиболее полного сводного описания геологии месторождений СРП в качестве наиболее вероятной была принята генерализованная интерпретация третьей гипотезы, предполагающая, что “основным условием образования крупных, уникальных по запасам и качеству руд месторождений Стрельцовской группы явилось телескопирование в едином геоструктурном блоке рудоподготовительных и рудоформирующих процессов, свидетельствующих о генетической связи эндогенных рудообразующих систем с длительно функционировавшим глубинным подкоровым источником” (Ищукова и др., 1998, стр. 515; Ищукова и др., 2007, стр. 254).

Модифицированный, но концептуально близкий вариант гипотезы с глубинным источником урана был предложен в (Алешин и др. 2007). Он будет рассмотрен нами в разделе “Обсуждение”, но для дальнейшего изложения важно подчеркнуть, что в обеих интерпретациях гипотезы с глубинными источниками магматической и гидротермальной активности предполагалось, что привнос урана осуществлялся магматическими уранотранспортирующими флюидами, восходившими по трассе высокопроницаемого разлома в приповерхностную область рудоотложения из удаленной области их подкоровой или нижнекоровой генерации.

Для гипотезы с глубинным источником гидротермальной активности авторами ранее была разработана компьютерная модель флюидного теплопереноса с вынужденной конвекцией рудообразующих флюидов (Мальковский и др., 2010). В качестве объекта моделирования были приняты крупнейшие месторождения Стрельцовское и Антей с совокупными запасами урана около 90 тыс. т (Машковцев и др., 2010). Руды месторождения Стрельцовское локализованы в вулканогенно-осадочном чехле кальдеры, месторождение Антей является нижним продолжением Центрального участка Стрельцовского месторождения в гранитоидных породах фундамента кальдеры (фиг. 3). Таким образом, структурно сопряженные месторождения Стрельцовское и Антей могли с достаточным основанием рассматриваться как продукт единой Антей-Стрельцовской рудообразующей системы.

В (Мальковский и др., 2010), как во многих работах по моделированию природных процессов, постановка задачи представляла упрощенный образ моделируемой рудообразующей системы. Структу-



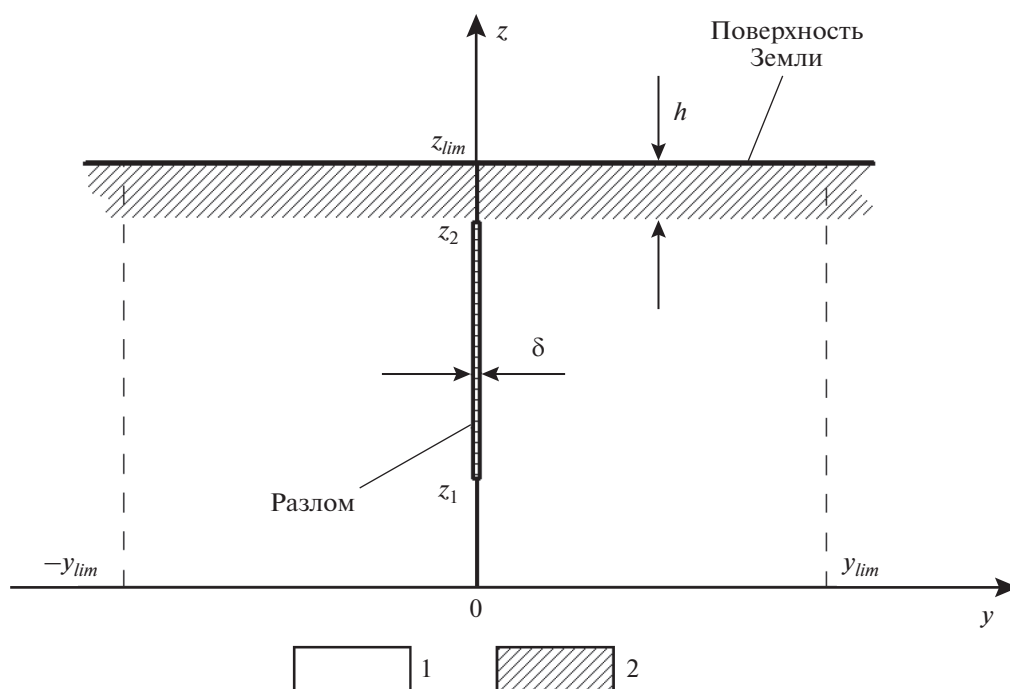
Фиг. 3. Геологический разрез восточной части Стрельцовской кальдеры (по Ищукова и др., 1998, 2007). 1–4 – поздне-мезозойские вулканогенно-осадочные породы чехла кальдеры: 1 – фельзиты, дациты, 2 – туфы кислого состава, 3 – базальты, андезиты, 4 – конгломераты; 5 – позднепалеозойские гранитоиды фундамента кальдеры; 6 – тектонические нарушения; 7 – рудные тела месторождений.

ра области моделирования была представлена в виде двухслойной схемы, имитирующей геологический разрез фундамента кальдеры и ее осадочно-вулканогенного заполнения, с вертикальным рудо-контролирующим разломом в нижнем слое модели, который ограничен по восстанию поверхностью контакта с подошвой кальдеры (фиг. 4). Расчеты флюидного теплопереноса проводились в предположении экспоненциального снижения во времени фоновой скорости восходящего движения рудообразующих флюидов, поступавших из глубинного источника. Значения динамических характеристик модели определялись подбором по условиям согласования (1) расчетных значений количества отложенного гидротермальными флюидами урана с рудным запасом Антей-Стрельцовского месторождения и (2) значений модельной температуры гидротермальных флюидов со сведениями о температурном режиме минералоотложения по данным изучения флюидных включений. Процедура расчета динамики флюидного теплопереноса изложена в (Мальковский и др., 2010).

На фиг. 5 и 6 приведены заимствованные из этой статьи структура течения флюидов и распределение температуры в области, отвечающей правой половине структурной схемы на фиг. 4. Конфигурация линий тока на фиг. 5 иллюстрирует свойство высокопроницаемых разломов фокусировать течение флюидов (Мальковский, Пэк, 2014). По геометрии линий тока можно видеть, что в зону разлома полушириной 50 м (см. фиг. 4) стягивается фронтально восходящий поток флюидов из области шириной 2 км, т.е. по сравнению с фоновой скоростью движения флюидов на

уровне нижнего ограничения модели скорость их движения по зоне разлома возрастает в 40 раз. По расчетам динамики рудоотложения такой сфокусированный приток флюидов обеспечивал за время около 500 тыс. лет перенос необходимого количества рудного груза для формирования уникальных по запасам рудных тел Антей-Стрельцовского месторождения.

На фиг. 6 приведен пример распределения температур в области моделирования через 100 тыс. лет после начала поступления флюидов из глубинного источника. Вследствие фокусирования потока конвективный перенос тепла по зоне разлома происходит значительно более интенсивно, чем во вмещающих породах. Это приводит к повышению температуры флюидов, восходящих по зоне разлома и разгружающихся затем из зоны разлома в породы заполнения кальдеры. Расчетные значения максимальной температуры флюидов в зоне разлома на нижних горизонтах месторождения Антей приближались к 500°C. Однако предполагалось, что такие высокотемпературные флюиды не отлагали рудную минерализацию, поскольку содержание урана в них еще не достигало концентрации насыщения. При расчете динамики рудоотложения было принято условие, что отложение рудной минерализации происходило на подвижном температурном барьере вследствие снижения температуры рудотранспортирующих флюидов, начиная с температуры 350°C, как это было установлено (Алешин и др., 2007) по результатам изучения флюидных включений в вулканогенно-осадочных породах Стрельцовского месторождения.

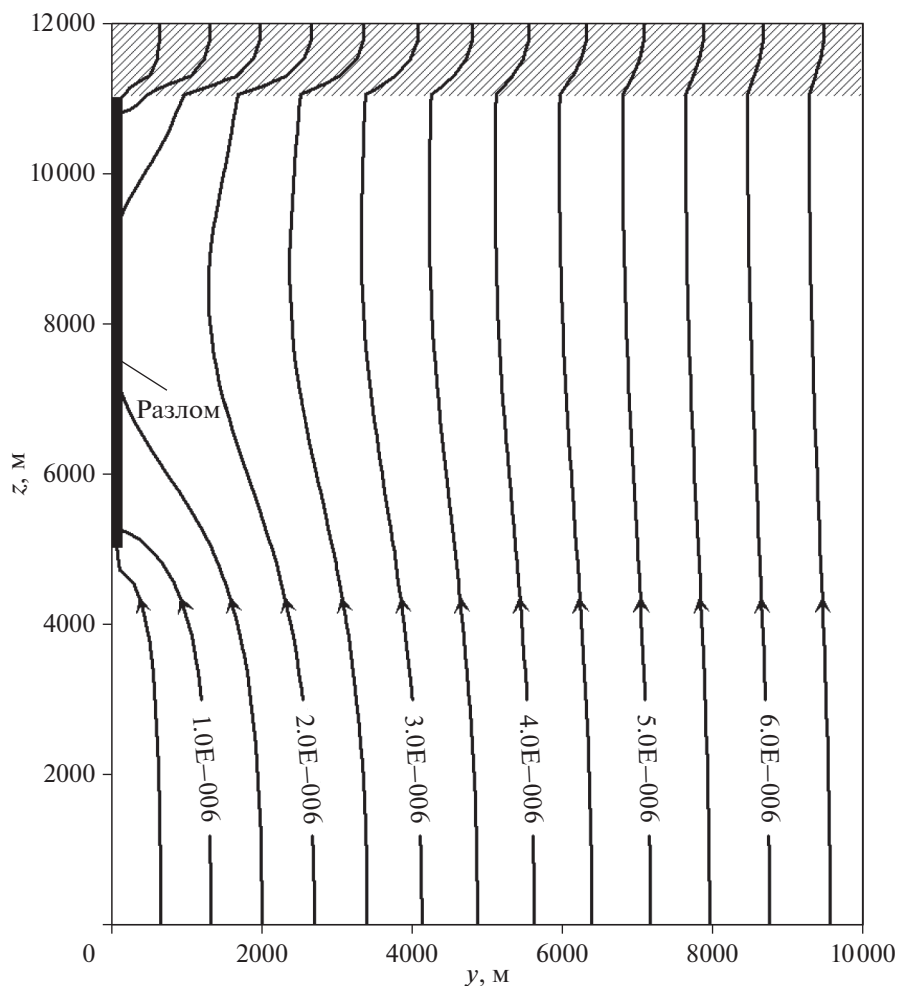


Фиг. 4. Схема области моделирования в модели с вынужденной конвекцией флюидов. 1 — породы фундамента кальдеры; 2 — породы заполнения кальдеры. $z_1 = 5$ км, $z_2 = 11$ км, $z_{lim} = 12$ км. $y_{lim} = 5$ км, $h = 1$ км, $\delta = 100$ м.

Приведенные в (Мальковский и др., 2010) результаты моделирования позволили заключить, что для гипотезы с удаленным от области рудоотложения глубинным источником рудообразующих флюидов может быть предложена палеогидродинамическая модель вынужденноконвективного теплопереноса, согласующаяся с геологическими данными об уникальных запасах и температурных условиях формирования рудной минерализации Антей-Стрельцовского месторождения. Однако в этой гипотезе и, соответственно, в конкретизирующей ее компьютерной модели предполагалось, что месторождения лишь *парагенетически* связаны с вулканическим процессом формирования Стрельцовской кальдеры. Вместе с тем, уже в ранних работах по условиям образования вулканических месторождений урана (Лаверов, Чернышев, 1977) выдвигалась и обсуждалась гипотеза о более тесной *генетической* связи вулканизма и рудообразования, предполагающая, что “магматические очаги, на раннем этапе своего развития поставляющие вулканический материал, на стадии консолидации являлись источником урана, фтора, молибдена и других сопутствующих компонентов молибден-урановых месторождений” (Лаверов, Чернышев, 1977). При этом в качестве вероятной гипотезы палеогидродинамических условий рудообразования предполагались “термоартезианские системы вулканических депрессий, определявшие условия мобилизации рассеянных рудных компо-

нентов, их миграцию и положение полей разгрузки продуктивных гидротерм” (с. 17).

Проблемы палеогидродинамических условий формирования вулканических месторождений урана обсуждались на организованной МАГАТЭ конференции “Урановые месторождения в вулканических породах” (1985). В пленарном докладе Генерального председателя конференции (Goodell, 1985) конвекция флюидов была определена как основной транспортный механизм при формировании урановых месторождений в вулканических кальдерах. В приложении к Стрельцовской кальдере представление о мобилизации и переносе урана флюидами конвективных ячеек над субвулканическим магматическим очагом было высказано в (Chabiron et al., 2003; Cuney, Kyser, 2009). Важная роль процессов конвекции флюидов для вулканических урановых месторождений была подчеркнута также в (Nash, 2010): “Конвекция особенно важна для урановых систем, поскольку позволяет рециркулируемой метеорной воде многократно выщелачивать уран из вмещающих пород, способствуя созданию его более высоких концентраций, чем в случае системы с однонаправленным (single pass) потоком” (р. 48). Поэтому не должно вызывать удивления, что через несколько лет после разработки модели рудообразующей системы с вынужденной конвекцией флюидов, поступающих из удаленного глубинного источника, с участием тех же авторов была предложена и разработана другая компьютерная модель

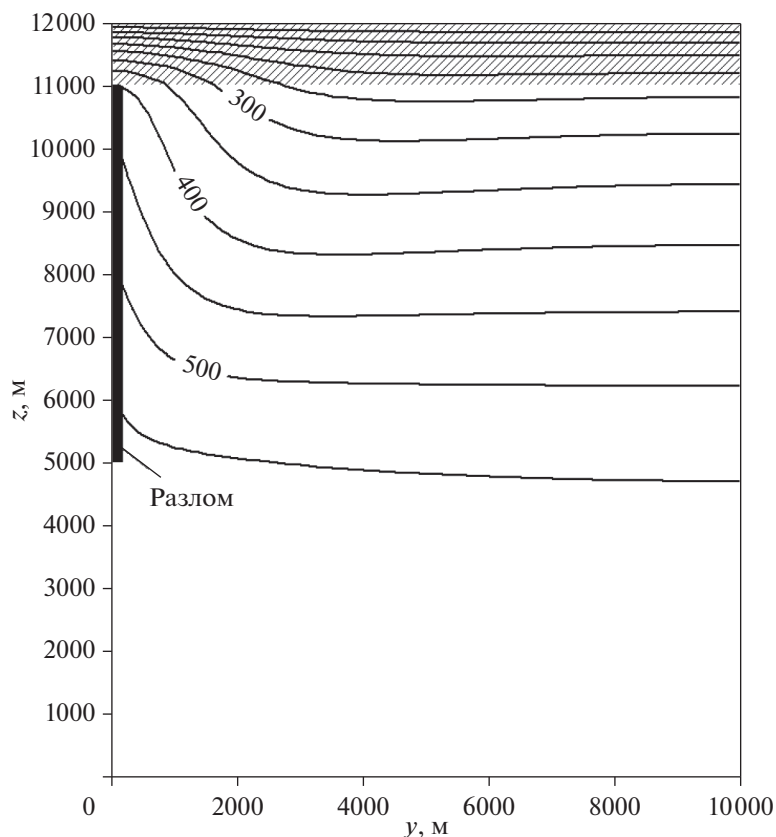


Фиг. 5. Структура течения флюидов: Модель вынужденной конвекции. Линии тока флюидов проведены с постоянным шагом по значению функции тока.

формирования тех же месторождений с мобилизацией урана процессом свободной тепловой конвекции флюидов из близко расположенного консолидированного магматического очага Стрельцовской кальдеры (Пэк и др., 2018).

В этой термоконвективной модели структура области моделирования была представлена в виде схемы, имитирующей геологический разрез кальдеры с магматическим очагом, локализованным на расстоянии 4 км от ее подошвы, для объема которого было принято значение 450 км^3 (фиг. 7). Предполагалось, что ко времени рудообразования магматический очаг под кальдерой полностью закристаллизовался, но в его остаточном тепловом поле мог происходить процесс свободной тепловой конвекции флюидов. Для пород заполнения кальдеры суммарной мощностью 1.5 км был принят двухслойный разрез с верхним экранящим слоем мощностью 0.5 км. Кольцевые разломы ограничивают кальдеру в интервале по глубине от подошвы верхнего экраняющего го-

ризонта заполнения кальдеры до кровли магматического очага. Центральный разлом месторождения Антей, как и в модели с вынужденной конвекцией, ограничен по восстанию подошвой вулканогенно-осадочного чехла кальдеры. Расстояние между кольцевым и центральным разломами 5 км, ширина зон разломов 100 м. Для геотермического градиента в остаточном тепловом поле магматического очага было принято повышенное по сравнению со среднекоровым значение $60^\circ\text{C}/\text{км}$. Значения проницаемости зон разломов и породных слоев заполнения кальдеры были варьируемыми параметрами. При проведении численных расчетов определялись структура течения флюидов и распределение температуры в области моделирования. В дополнение к этому по полученному решению для функции тока рассчитывалось значение скорости течения флюидов по зоне разлома месторождения Антей на уровне его верхнего окончания на выходе в вулканогенно-осадочные породы заполнения кальдеры. Проце-



Фиг. 6. Распределение температур через 100 тыс. лет после начала поступления флюидов из глубинного источника: Модель вынужденной конвекции.

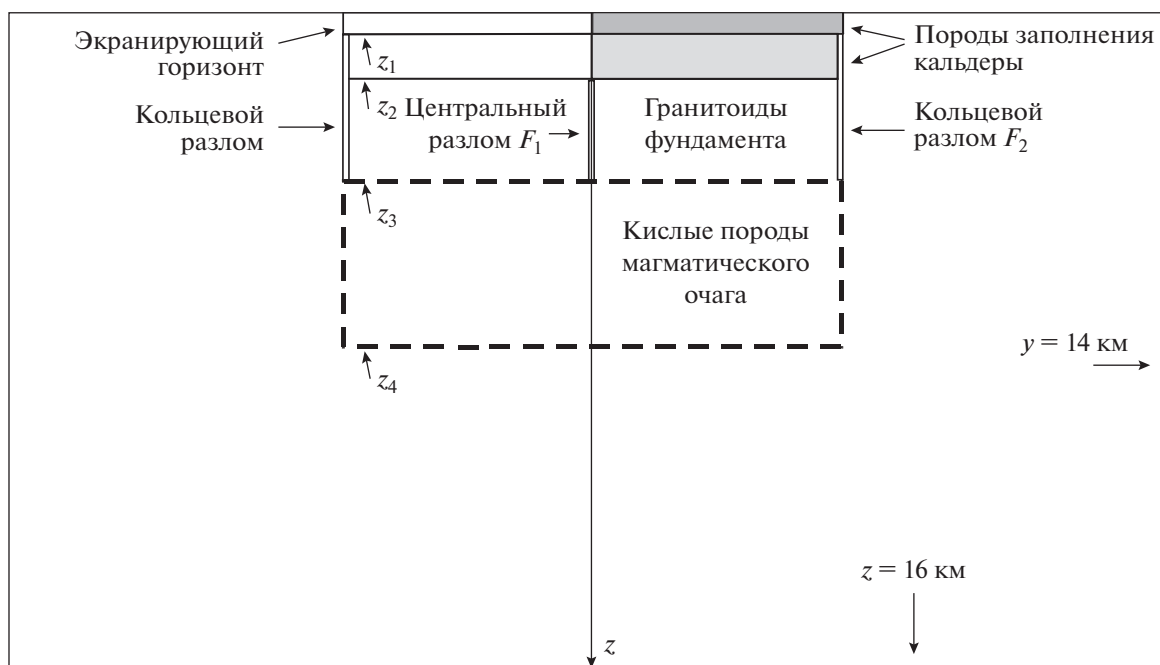
дура расчета динамики флюидного свободно-конвективного теплопереноса приведена в (ПЭК и др., 2018).

На фиг. 8 и 9 приведены заимствованные из этой статьи примеры расчета структуры течения флюидов и распределения температуры через 20 тыс. лет после начала термоконвективной циркуляции флюидов в области, отвечающей правой половине структурной схемы на фиг. 7. Конфигурация линий тока флюидов на фиг. 8 показывает, что в термоконвективной системе самоорганизуется ячейка конвекции с нисходящей ветвью, проникающей глубоко в фундамент кальдеры, включая породы консолидированного магматического очага, и восходящей ветвью, сфокусированной в зоне разлома F_1 (см. фиг. 7) месторождения Антей. Такая структура конвективной циркуляции флюидов создает условия для мобилизации урана из его относительно близко расположенных источников: из вмещающих гранитоидов и из аномально обогащенных, по сравнению с гранитоидами, пород консолидированного магматического очага. По расчетным значениям скорости движения рудотransпортирующих флюидов их сфокусированный восходящий поток по зоне разлома F_1 мог

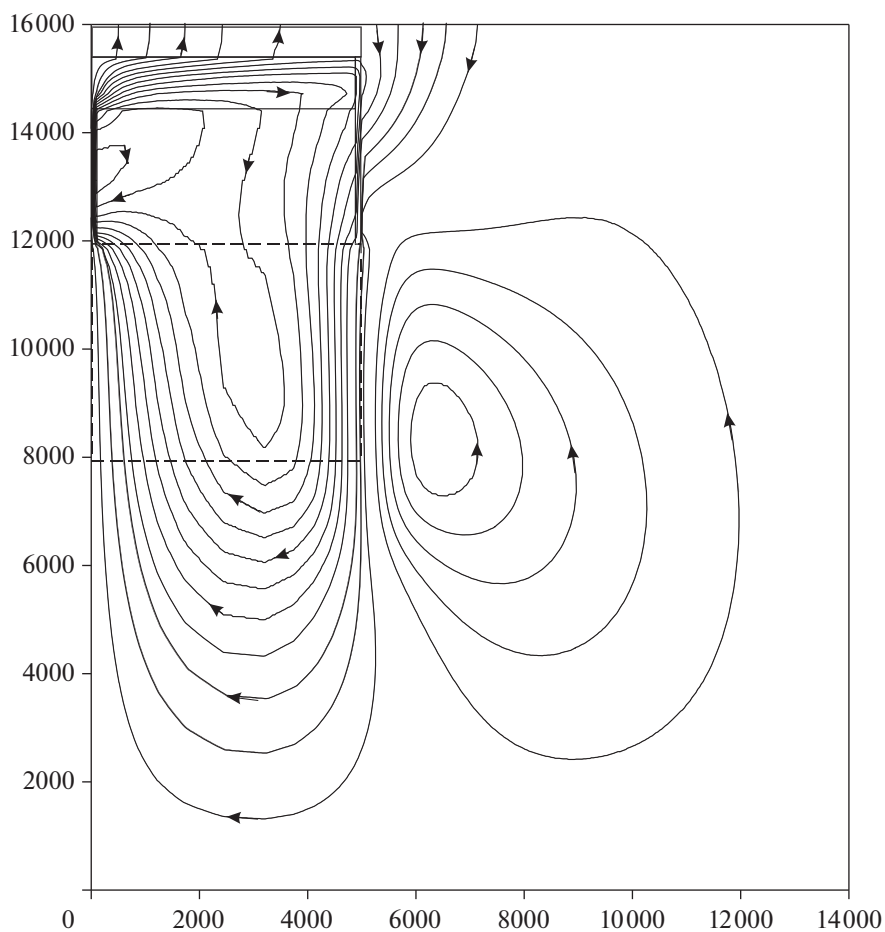
обеспечить формирование рудного запаса Антей-Стрельцовского месторождения.

Конфигурация изотерм на фиг. 9 показывает, что термоконвективная циркуляция флюидов обуславливает формирование в конвективной ячейке глубокого минимума температуры вдоль нисходящей ветви конвекции, сочетающегося с подъемом температуры вдоль восходящей ветви. При этом в зоне разлома F_1 месторождения Антей и в вулканогенно-осадочных породах заполнения кальдеры достигаются значения температуры, отвечающие условиям рудоотложения.

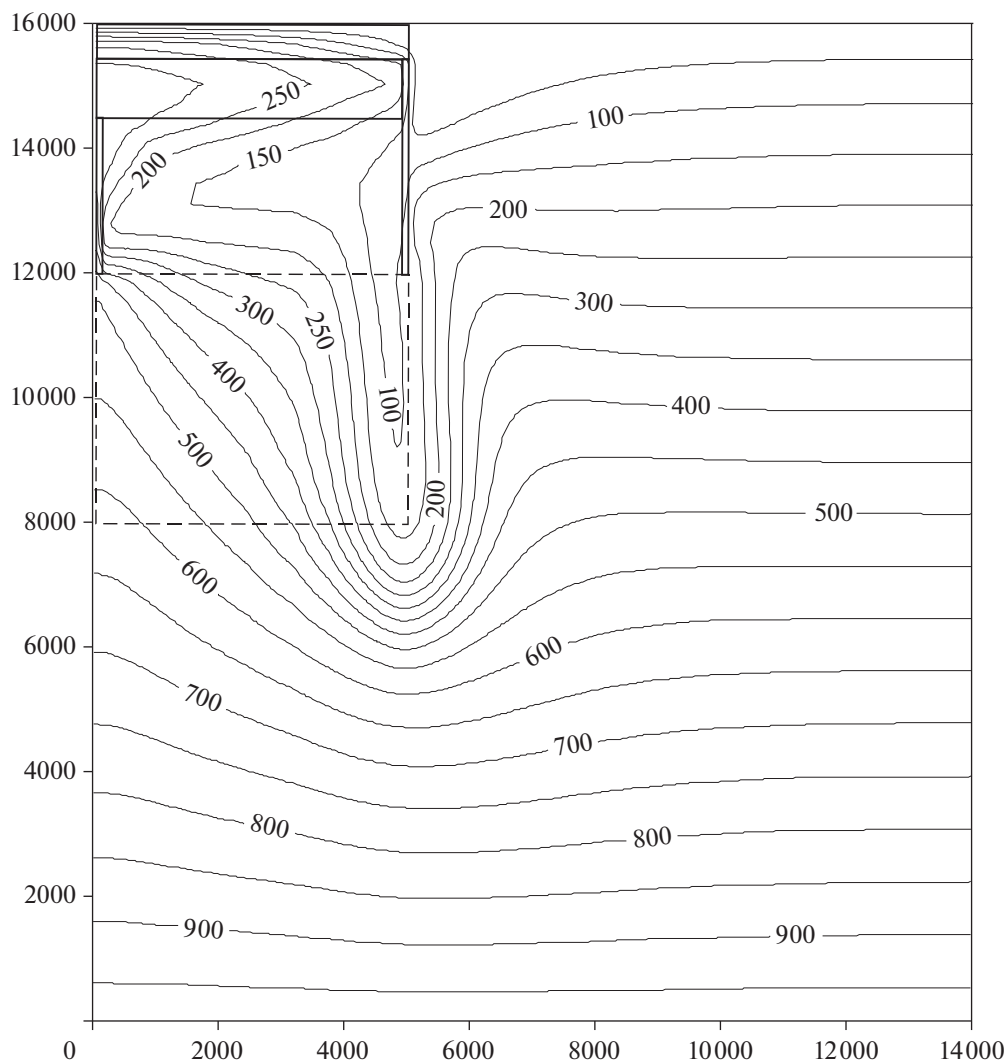
Таким образом, результаты численного расчета модели с термоконвективным механизмом флюидного теплопереноса позволили заключить, что согласование со сведениями о запасах и температурах образования руд Антей-Стрельцовского месторождения может быть получено также и для гипотезы с близко расположенными источниками урана. Это означает, что по результатам компьютерного моделирования могут быть предложены две частично согласующиеся с наблюдениями, но концептуально различные интерпретации формирования Антей-Стрельцовского месторождения. Однако, поскольку компьютерные модели представляют, как отмечалось, упрощенный образ



Фиг. 7. Структурная схема области моделирования в модели со свободной тепловой конвекцией флюидов. $z_1 = 0.5$ км, $z_2 = 1.5$ км, $z_3 = 4$ км, $z_4 = 8$ км.



Фиг. 8. Структура течения флюидов через 20000 лет после начала циркуляции флюидов: Модель свободной тепловой конвекции.



Фиг. 9. Распределение температуры через 20000 лет после начала циркуляции флюидов: Модель свободной тепловой конвекции.

рудообразующих систем, согласование результатов моделирования с природным прообразом свидетельствует лишь о *возможности* предполагаемых представлений об условиях формирования месторождений. Для решения вопроса об их *реалистичности* необходимо привлечение дополнительной информации. Поэтому в настоящей статье авторы предприняли попытку сравнительного рассмотрения предполагаемых альтернативных интерпретаций формирования Антей-Стрельцовского месторождения с удаленным глубинным и близко расположенными источниками урана, используя методологию анализа, разработанную в концепции минеральных систем.

КОНЦЕПЦИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Концепция минеральных систем была предложена австралийскими геологами (Wyborn et al.,

1994) как мультидисциплинарный подход, ориентированный на анализ “всех геологических факторов, которые контролируют формирование и сохранность минеральных месторождений, с особым вниманием к процессам мобилизации рудных компонентов из их источника, транспортирования и аккумуляции в более концентрированной форме и сохранности в последующей геологической истории” (с. 109). Методология минеральных систем использовалась при анализе условий формирования рудных месторождений различных генетических типов (Pirajno, 2009, 2016; Hagemann et al., 2016; Huston, 2016). В приложении к металлогении урана она была использована в (Skirrow et al., 2009) как концептуальная основа для разработки упрощенной, по сравнению с принятой МАГАТЭ (World..., 2009; Uranium..., 2016), классификации урановых месторождений. Предполагается, что многочисленные классификацион-

ные подразделения урановых месторождений могут быть представлены как континуум с вариациями между тремя граничными (end-members) минеральными системами: 1) магматогенной (magmatic-related), 2) метаморфогенной (metamorphic-related) и 3) гидросферной (surface-related). Транспорт урана в этих граничных урановых минеральных системах “осуществлялся тремя различными типами флюидов – магматическими, метаморфическими и гидросферными (метеорные, озерные и морские воды). Различия в геологических обстановках формирования флюидов и путях их миграции предопределяли разнообразие типов урановых месторождений” (Skirrow et al., 2009, p. 17).

Вулканогенные месторождения были определены в этой классификации как гибридные образования между магматогенными и гидросферными урановыми минеральными системами с возможным участием в их формировании как магматических, так и внемагматических флюидов. При этом источником урана “может быть магма или он может извлекаться из магматических или даже внемагматических вмещающих пород и отлагаться или в кристаллизующемся магматическом теле или вовне его в любом типе пород” (стр. 17). Возможность такого участия в транспортных процессах формирования вулканогенных месторождений различных типов флюидов с мобилизацией урана из его различных источников предполагалась в (Skirrow et al., 2009) также и конкретно для урановых месторождений Стрельцовского рудного поля (стр. 24). Поэтому, руководствуясь концепцией минеральных систем, для ответа на поставленный выше вопрос о *реалистичности* альтернативных гипотез о глубинном или близко расположенном источнике урана необходимо сравнительное рассмотрение предполагаемых этими гипотезами урановых минеральных систем Антей-Стрельцовского месторождения. В предпринятом ниже опыте такого сравнительного рассмотрения использован предложенный в (Skirrow et al., 2009) последовательный подход к анализу минеральных систем урановых месторождений, конкретизирующий известную парадигму “источник → транспорт → отложение”:

1. Источники урана;
2. Источники флюидов;
3. Необходимое количество флюидов;
4. Движущие силы флюидов;
5. Пути движения флюидов;
6. Процессы минералоотложения.

АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ГИПОТЕЗЫ УРАНОВОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ АНТЕЙ-СТРЕЛЬЦОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В монографии (Рыбалов, Омеляненко, 1989), специально посвященной проблеме источников

рудного вещества эндогенных месторождений урана, авторы подразделяют источники урана на магматические и внемагматические. В рудообразующих системах с магматическими источниками “ураноносные растворы образовывались на поздних стадиях кристаллизации гранитоидных магматических очагов, отделяясь непосредственно от остаточных лейкогранитных расплавов” (с. 257). В системах с внемагматическими источниками “уран мог извлекаться агрессивными минерализованными (кислотными или щелочными) термальными растворами различного происхождения либо из горных пород, непосредственно вмещающих месторождения, либо восходящими потоками эндогенных флюидов из подстилающих или глубоко залегающих под месторождениями ураноносных кристаллических пород” (стр. 156).

В обсуждаемых компьютерных моделях формирования Антей-Стрельцовского месторождения задача с магматическим источником урана не рассматривалась. Близкой к ней по постановке была модель (Мальковский и др., 2010) с глубинным источником урана и флюидов. Однако в ней генетическая природа источника не конкретизировалась. Нижняя граница области моделирования (см. фиг. 5) показана условно как горизонтальное сечение линейно восходящего потока флюидов на глубине 12 км. При этом возможным питающим источником мог быть расположенный ниже этой границы любой внутрикоровый источник флюидов, как магматический, так и внемагматический, в том числе глубинные трансмагматические флюиды (Рыбалов, Омеляненко, 1989). Поэтому приведенные в (Мальковский и др., 2010) результаты моделирования не дают основания для обоснованного суждения о магматическом или внемагматическом источнике урана Антей-Стрельцовского месторождения, свидетельствуя лишь в пользу концептуальной реалистичности гипотезы его глубинного источника.

Очевидным магматическим источником урана мог быть субвулканический магматический очаг в фундаменте Стрельцовской кальдеры, возможный вклад которого в формирование урановых месторождений Стрельцовского рудного поля в статье (Мальковский и др., 2010) не обсуждался. Роль этого источника была оценена предварительно в (Chabiron et al., 2003) и более детально в (Редькин и др., 2009).

В (Chabiron et al., 2003) исходными данными для расчетов послужили результаты изучения расплавных флюидных включений во вкрапленниках кварца риолитовых покровов Стрельцовской кальдеры (Chabiron et al., 2001). Анализ этих включений позволил установить, что риолитовый расплав подкальдерного очага содержал в среднем около 2% воды и 18 ± 3 ppm урана. При таком содержании урана в расплаве и коэффициенте рас-

пределения расплав/флюид $K_p^{(m/f)} = (3-4) \times 10^{-2}$ в пользу расплава (Reiffert et al., 1996) концентрация урана в магматогенном флюиде $<1 \times 10^{-6}$ (0.6–0.8 ppm). При содержании воды 2% и плотности расплава 2.6 т/м³ количество магматогенного флюида в 1 км³ расплава равно 52×10^6 т. Количество урана, которое может выноситься магматическим флюидом с содержанием 1×10^{-6} U из 1 км³ магматического расплава Стрельцовской кальдеры равно 52 т (Chabiron et al., 2003). При принятом в (Пэк и др., 2018) объеме магматического очага Стрельцовской кальдеры, равном 450 км³, количество урана, которое может быть привнесено в область рудоотложения магматогенным флюидом, равно 23400 т, что на порядок меньше суммарных запасов урана в месторождениях Стрельцовского рудного поля.

В (Редькин и др., 2009) были проведены лабораторные эксперименты по определению растворимости урана во F-содержащих кислых расплавах, близких по составу к риолитам Стрельцовской кальдеры, и концентрации урана в равновесных с этими расплавами флюидах. Значения растворимости урана в расплаве при температуре 770°C и давлении 2000 бар были близкими к установленным в опытах (Reiffert et al., 1996), но значения концентрации урана во флюиде оказались ниже в 5–10 раз. Соответственно, приведенная выше по данным (Chabiron et al., 2003) оценка потенциальной рудопродуктивности магматического очага Стрельцовской кальдеры снижается до 5–3 тыс. т, что позволяет согласиться с авторами статьи, заключившими проведенный анализ итоговым выводом, что “кислый расплав из верхнекоровой камеры не может рассматриваться в качестве вероятного источника урана для месторождений рудного поля” (Редькин и др., 2009, стр. 339).

В термоконвективной модели формирования Антей-Стрельцовского месторождения с внемагматическим источником урана (Пэк и др., 2018) предполагалось, что глубоко проникающая конвекция флюидов (см. фиг. 8) создавала условия для мобилизации урана из консолидированного магматического очага Стрельцовской кальдеры. Если оценивать потенциальную продуктивность этого источника, предполагая содержание урана в породах очага как в риолитовом расплаве, то его потенциальный ресурс, в сравнении с рудным запасом месторождений, практически неисчерпаем. К примеру, при принятых выше значениях объема пород 450 км³, значениях плотности 2.6 т/м³ и содержания в них урана 18 г/т количество урана в субвулканическом очаге Стрельцовской кальдеры равно 21 млн т. Однако при наличии столь избыточного ресурса урана, доступного для его мобилизации термоконвективной циркуляцией флюидов, количество извлекаемого урана для его дальнейше-

го переноса к участкам рудоотложения зависит от эффективности процессов его мобилизации. Количество вынесенного из магматического очага урана можно было бы определить, если бы мы располагали сведениями о содержании урана в породах магматического очага после их кристаллизации и последующего постмагматического преобразования. В отсутствие таких данных используем в качестве возможного аналога консолидированных пород магматического очага Стрельцовской кальдеры сведения о субщелочных монзонит-гранит-гранодиоритовых интрузиях среднеюрского шахтаминского комплекса, которые по геохимическим характеристикам близки к риолитам Стрельцовской кальдеры (Петров и др., 2017). Содержание урана в этих гранитах <5 г/т. Предполагая, что различие в 13 г/т между содержанием урана в риолитах 18 г/т и в геохимически близких к ним гранитоидах 5 г/т обусловлено процессами кристаллизации и постмагматического преобразования пород, оценка удельного выноса урана из консолидированных пород магматического очага составит ~ 34000 т/1.0 км³ и суммарного выноса при объеме очага 450 км³ около 15 млн т. Эта оценка является, скорее всего, завышенной, поскольку метамиктное изменение урансодержащих минералов (циркон, монацит, апатит и др.) могло способствовать выщелачиванию “подвижного урана” шахтаминских гранитов также и после их кристаллизации и постмагматического преобразования. Тем не менее, столь значительный потенциально доступный для извлечения ресурс урана в консолидированных породах субвулканического очага Стрельцовской кальдеры дает основание для положительной оценки возможной роли этого источника в формировании рудного запаса месторождений.

Наряду с породами кальдерного очага, в качестве внемагматического источника урана в (Пэк и др., 2018) предполагались также гранитоиды фундамента Стрельцовской кальдеры. Привнос урана за счет его выщелачивания из пород фундамента кальдеры предполагался, как о том уже упоминалось выше, в (Модников, Сычев, 1984): “При движении флюидов к областям рудоотложения они дополнительно обогащались ураном за счет его мобилизации из гранитизированных пород субстрата, что способствовало значительному повышению продуктивности процесса рудообразования” (стр. 40). Локальный вынос урана из гранитоидов фундамента кальдеры был установлен также в (Андреева и др., 1990): “В исходных гранитах содержание урана составляет от 3.5 до 6 г/т, а в интенсивно гидрослюдазированных разностях оно уменьшается до 0.3–0.5 г/т, т.е. почти на порядок” (стр. 209). При интенсивности выноса урана ~ 4 г/т, как в (Андреева и др., 1990), количество урана, извлекаемого из 1 км³ гранитоидов фундамента, составит около 10 тыс. т.

Объем пород фундамента кальдеры, который промывается термоконвективным потоком флюидов, сопоставим с объемом пород консолидированного магматического очага (см. фиг. 8). Количество урана, которое может быть потенциально извлечено из гранитоидов фундамента кальдеры, будет при этом порядка 4–5 млн т. В более поздней статье (Андреева и др., 1996) были приведены уточненные сведения о значительно меньшей интенсивности выноса урана из гранитоидов фундамента кальдеры. Изменение содержания урана, определенное по представительным выборкам значений в неизмененных и гидрослюдизированных гранитах, составило от 6 до 5.1 г/т. При мобилизации урана с интенсивностью 1.0 г/т количество урана, извлеченного из гранитов фундамента, составит ~1.2 млн т. Однако и это на порядок меньше, чем в приведенной выше оценке выноса урана из пород консолидированного магматического очага, количество урана, мобилизуемого из гранитоидов фундамента кальдеры, многократно превосходит рудный запас месторождений Стрельцовского рудного поля.

В структуре термоконвективной ячейки на фиг. 8 флюиды, восходящие по зоне главного разлома месторождения Антей, используют его в качестве подводящего канала для рудных тел как месторождения Антей, так и (после латерального растекания потока флюидов в породах кальдеры) для рудных тел месторождения Стрельцовское. Поскольку при моделировании рассчитывались значения скорости движения флюидов, результаты моделирования позволили оценить длительность процесса рудоотложения для формирования суммарного рудного запаса Антей-Стрельцовского месторождения. При расчетном значении скорости восходящего движения рудообразующих флюидов по зоне разлома месторождения Антей 7.5 м/год, ширине зоны разлома 100 м, его протяженности 1000 м и концентрации урана в среднетемпературных рудообразующих флюидах в интервале значений от 1×10^{-6} до 1×10^{-5} моль U/kg H₂O для формирования запасов урана ~90000 т месторождений Стрельцовское и Антей потребуется от 500 до 50 тыс. лет соответственно (Пэк и др., 2018).

Приведенные выше оценки позволяют заключить, что в модели с термоконвективной циркуляцией флюидов близко расположенные источники урана располагают более чем достаточными ресурсами для обеспечения рудного запаса месторождений Стрельцовской кальдеры. Скорость поступления рудообразующих флюидов из этих источников в минеральную систему Антей-Стрельцовского месторождения обеспечивает формирование крупнейшего по запасам месторождения за геологически реалистическое время в десятки – первые сотни тысяч лет. При этом расчетные значения температуры (см. фиг. 9) согласуются с широко принятыми

оценками температуры отложения рудной минерализации месторождений 150–350°C (Ищукова и др., 2007). Эти положительные аргументы в пользу гипотезы извлечения урана из его близко расположенных источников процессом свободной тепловой конвекции флюидов, однако, не означают отрицания возможности формирования месторождений Стрельцовской кальдеры в результате привноса урана из его глубинного источника процессом вынужденной конвекции флюидов. Такая гипотеза, как было показано в (Мальковский и др., 2010), также возможна, но аргументация в ее пользу более проблематична.

Концептуальной основой для постановки задачи моделирования в (Мальковский и др., 2010) была предложенная в (Алешин др., 2007) нетрадиционная интерпретация гипотезы глубинного источника урана и флюидов месторождений Стрельцовской кальдеры, предполагавшая два глубинных источника магматической и гидротермальной активности: один, как в (Ищукова др., 2007), – длительно функционировавший глубинный источник вулканической и сопряженной с вулканизмом гидротермальной активности, и другой – относительно кратковременный по длительности функционирования, но также глубинный источник ураноносной Li–F-магмы, деятельность которого ограничилась лишь привносом в кальдеру ураноносных флюидов. Основанием для создания такой усложненной генетической модели послужили относительно недавно установленные по результатам изучения флюидных включений (Krylova et al., 2006) высокие значения температуры 500–530°C отложения раннего мелкозернистого кварца, который авторы (Алешин и др., 2007) в предложенной ими схеме стадийности минералообразования отнесли к началу урановорудной стадии формирования Антей-Стрельцовского месторождения. Однако этот пользующийся незначительным распространением высокотемпературный кварц отлагался еще до основной браннерит-наступановой минерализации месторождения, формирование которой происходило при более низкой температуре, начиная с 350–300°C (Крылова и др., 2008). Поэтому значение температуры >500°C в период между завершением среднетемпературных 250–200°C предрудных преобразований и началом отложения также более низкотемпературной <350°C рудной минерализации воспринимается как резкая аномалия температурного режима формирования месторождения. Интерпретация в (Алешин и др., 2007) этой высокотемпературной аномалии предполагает, что “минералообразование в дорудную и 1-ю пострудную стадии было генетически единым длительным постмагматическим процессом, инициированным, по-видимому, внедрением верхнекорового интрузива и излиянием кислых лав. Этот процесс прервался 135 млн лет назад относи-

тельно короткой инъекцией высокотемпературных ураноносных растворов, отделившихся от другого очага кислой эволюционированной ураноносной Li–F-магмы” (стр. 468).

Поскольку дополнительный магматический очаг был предполагаемым источником урана и флюидов, его рудоформирующая роль могла предположительно конкретизироваться приведенными в (Мальковский и др., 2010) результатами математического моделирования процессов флюидного теплопереноса в палеогидротермальной рудообразующей системе Антей-Стрельцовского месторождения с глубинным источником урана и флюидов. В пользу этого предположения свидетельствовали компьютерные расчеты динамики рудоотложения, которые позволили получить результаты, согласующиеся со сведениями о разведанных запасах, морфологии и глубине залегания рудных тел месторождения. Однако реконструированная в модели динамика изменения температуры минералообразующих флюидов не согласовывалась с данными о среднетемпературных 200–250°C предрудных изменениях пород Стрельцовской кальдеры. В модели с глубинным источником температурные условия последовательных стадий минералоотложения отражали последовательно регрессивную эволюцию глубинного очага. При этом дорудная стадия отвечала высокотемпературному периоду эволюции рудообразующей системы с температурой, постепенно снижающейся от ее максимальных значений >500°C, установленных по флюидным включениям, до температуры 350°C начала отложения урановорудных минералов. Поэтому, хотя модель (Мальковский и др., 2010), как уже отмечалось ранее, не исключает возможности магматического источника урана и флюидов, реконструированная в ней регрессивная эволюция температурного режима палеогидротермальной системы не согласуется с данными о среднетемпературных предрудных гидрослюдистых изменениях пород Стрельцовской кальдеры (Андреева и др., 1996; Андреева, Головин, 1998).

В заключение рассмотрения альтернативных гипотез урановой минеральной системы Антей-Стрельцовского месторождения, следуя предложенному в (Skirrow et al., 2009) подходу, приведем краткие сведения о процессах минералоотложения. В модели (Мальковский и др., 2010) предполагалось, что перенос урана происходит в четырехвалентной форме с его отложением на подвижном температурном барьере в результате снижения температуры рудотранспортирующих флюидов, начиная с 350°C. Тренд температурной зависимости концентрации насыщения U(IV) во флюиде задавался, основываясь на полуколичественной экстраполяции экспериментальных данных, полученных в диапазоне более высоких температур 400–600 (Peiffert et al., 1996) и 770°C (Жариков и др., 1987). Однако недавно была опубликована статья

(Timofeev et al., 2018) с данными о растворимости урана в восстановительных условиях в хлоридных растворах, в которой было экспериментально подтверждено снижение концентрации урана в уранотранспортирующих флюидах также и в интервале температуры от 400 до 250°C. Результаты расчета динамики рудоотложения при принятых в (Мальковский и др., 2010) значениях тренда изменения растворимости U(IV) в рудотранспортирующем флюиде позволили получить результаты, согласующиеся с данными о морфологии рудных тел и запасами месторождения.

В модели (Пэк и др., 2018) вопрос о формах переноса и трендах температурной зависимости концентрации урана в рудотранспортирующих флюидах не обсуждался. Количество урана, привносимого в область рудоотложения, определялось на основе расчетных данных о скорости движения потока рудообразующих флюидов, исходя из предположения, что содержание в них урана отвечает широко принятым оценкам ураноносности гидротермальных рудообразующих растворов (Рыбалов, Омеляненко, 1989; Skirrow et al., 2009).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В приведенном выше рассмотрении компьютерных моделей формирования Антей-Стрельцовского месторождения с удаленным и близко расположенными источниками урана использовалась в основном (с незначительными дополнениями) информация, приведенная в статьях (Мальковский и др., 2010) и (Пэк и др., 2018). Однако, поскольку Антей-Стрельцовское месторождение является уникальным рудным объектом, задача критического обсуждения альтернативных генетических гипотез его формирования предполагает обсуждение также и вопроса о причинах уникальности Стрельцовского рудного поля, запасы и ресурсы которого почти на порядок превосходят запасы ближайшего расположенного в Восточной Монголии Дорнотского рудного поля и на два порядка большинства других вулканогенных урановых месторождений мира (Uranium deposits, 1985; Plant et al., 1999; Ищукова и др., 2005; Cuney, Kyser, 2009; Nash, 2010; Bruneton et al., 2015).

В сводной монографии (Ищукова и др., 2007) авторы обозначили в качестве наиболее вероятного ответа на дискуссионный вопрос об источниках урана представление об его поступлении в месторождения Стрельцовского рудного поля из “глубинных подкоровых (мантийных) магматических очагов” (стр. 239). Генетическая связь с мантийными источниками урана обоснована для магматических пород Стрельцовской кальдеры. Изотопно-геохимические данные позволяют предполагать, что кислые риолитовые расплавы тургинской серии образовались как поздние дифференци-

аты трахибазальтовых магм, расплавы которых выплавлялись из гранатовых мантийных лерцолитов на глубине более 70 км (Коваленко и др., 2015; Петров и др., 2017). При содержании урана в расплавленных включениях риолитов 18–19 г/т (Chabiron et al., 2001; Наумов, 2011) приведенная в предыдущем разделе статьи оценка количества урана в субвулканическом очаге Стрельцовой кальдеры составляет 21 млн т. Объем тургинских игнибритов в породном заполнении кальдеры равен 50–100 км³ (Шатков, 2015), что увеличивает суммарную оценку количества урана, привнесенного с риолитовым расплавом в субвулканический очаг и вулканические аппараты Стрельцовой кальдеры, до величины порядка 25 млн т. Таким образом, можно с основанием утверждать, что гипотеза глубинного источника урана согласуется с представлением о его магматическом переносе из длительно эволюционировавшего глубинного очага в урановую минеральную систему Стрельцовой кальдеры в основном в форме кислых ураноносных магматитов тургинской серии.

Однако в (Ищукова и др., 2007) предполагалось, что глубинный магматический очаг был источником не только ураносодержащих магматических расплавов, но также и рудообразующих флюидов. В (Алешин и др., 2007), как отмечалось выше, была предложена усложненная версия этой интерпретации с двумя петрогенетически различными источниками вулканических расплавов и ураноносных флюидов. В качестве источника ураноносных флюидов предполагался глубинный очаг ураноносной Li–F-магмы, формировавшей гранитные массивы кукульбейского комплекса. Этот выбор мотивировался близкими значениями изотопного возраста 145–138 млн лет кукульбейских гранитоидов с игнибритами тургинской серии 143–140 млн лет и повышенного содержания урана до 30 г/т в лейкогранитных массивах кукульбейского комплекса и до 20–25 г/т в расплавленных включениях риолитов тургинской серии. Однако проведенный в (Петров и др., 2017) детальный сравнительный анализ геохимических характеристик и геодинамических обстановок формирования мезозойских магматитов Монголо-Приаргунского вулканического пояса показал, что “геохимические особенности кислых вулканитов тургинской серии и поздних дериватов кукульбейских гранитоидов (онгонитов, онгориолитов, амазонитовых гранитов) существенно различаются... В связи с этим и редкометальные лейкократовые граниты кукульбейского типа в Восточном Забайкалье вряд ли можно считать источниками Mo–U-оруденения” (стр. 460).

Это отрицательное заключение о предложенной в (Алешин и др., 2007) гипотезе с отдельными очагами вулканических расплавов и ураноносных флюидов возвращает постановку проблемы источника урана к основной геолого-генетической модели (Ищукова и др., 2007) с одним глубинным ис-

точником, как ураносодержащих магматических расплавов, так и рудообразующих флюидов. Масштабы предрудных метасоматических процессов и рудоотложения в Стрельцовой кальдере свидетельствуют о необходимости значительного ресурса флюидов в глубинном источнике гидротермальной активности. Предполагая, что это был интрузив кислой магмы с составом, близким к расплаву риолитов кальдеры, для оценки его флюидогенерирующей активности используем приведенные в предыдущем разделе статьи сведения о возможных масштабах поступления магматических флюидов и урана из субвулканического очага Стрельцовой кальдеры. Для относительной интенсивности выноса флюидов и урана из 1 км³ расплава риолитов были получены оценки: вынос флюидов из расплава с содержанием воды 2% составляет 52 млн т, вынос урана при содержании урана во флюиде 1×10^{-6} U составляет 52 т. При таких значениях интенсивности выноса флюидов и урана для создания суммарного рудного запаса 300000 т U Стрельцовского рудного поля необходимо поступление в кальдеру 1260 км³ ураносодержащих флюидов из глубинного магматического очага объемом около 5800 км³.

Однако такой значительный, но не исключительный объем глубинного магматического очага, скорее всего, не являлся определяющим фактором. Более вероятным ограничивающим условием могла быть “относительная сухость” (Chabiron et al., 2001) магматического расплава. Ф.Г. Рейфом (1990) была разработана физико-химическая модель магматогенного гидротермального рудообразования, в которой определяющую роль в реализации рудного потенциала гранитных плутонов играют объемные эффекты кристаллизации водосодержащего гранитного расплава. Удельный объем воды, растворенной в расплаве, много меньше объема воды, образующей самостоятельную фазу при тех же *PT*-параметрах. При кристаллизации гранитной магмы с исходным водосодержанием $\leq 2\%$ положительный объемный эффект выделения воды из расплава “почти полностью компенсируется упругой деформацией пород и сжимаемостью флюида, благодаря чему последний вместе с экстрадированными металлами захороняется в гранитном массиве” (стр. 165). При исходном водосодержании $\geq 4\%$ “суммарный объемный эффект кристаллизации и дегазации магмы (до 25%), положителен и настолько велик, что в магматической камере возникает высокое флюидное давление, значительно превышающее литостатическую нагрузку и предел прочности интрузивной рамы... Возникшие дренирующие структуры способствуют удалению флюида из магматической камеры в виде сосредоточенных потоков” (Геолого-генетические, 1992, стр. 38). Таким образом, “величина исходного водосодержания около 3% действительно является критической в том отношении, что при меньшем значении этого пара-

метра магматический флюид вместе с экстрагированными им рудными компонентами в основном захороняется на месте своего образования... В то же время, при большем водосодержании в результате разгерметизации магматической камеры создаются условия ... для формирования гидротермальной системы. Такая трактовка вполне согласуется с эмпирическими данными о существовании систематических различий в исходном водосодержании рудоносных и ординарных гранитных интрузий и, вероятно, в значительной мере отражает суть явления” (Рейф, 2009, стр. 223).

В свете представлений о критической зависимости потенциальной рудопродуктивности гранитных интрузий от водосодержания их расплавов, глубинный магматический очаг кислых вулканитов Стрельцовой кальдеры, содержание воды в котором, по результатам изучения состава расплавных включений в кварце риолитов, равно в среднем ~1.6% (Наумов, 2011), мог обладать как “ординарные гранитные интрузии” лишь ограниченными возможностями для крупномасштабной генерации рудообразующих флюидов, т.е. мог быть непродуктивным для формирования уникальных запасов урановых месторождений Стрельцовского рудного поля.

К приведенным замечаниям о гипотезе глубинного источника рудообразующих флюидов добавим вопрос о слепом характере месторождений Стрельцовой кальдеры: “все месторождения рудного поля сформировались в близповерхностных условиях на глубине 200–400 м от поверхности в период рудоотложения. Верхние части рудных залежей образовались в интервале глубин 600–1100 м... Морфоструктурный анализ показывает, что с нижнего мела эрозией уничтожено не более 100–200 м, поэтому все месторождения являются скрытыми, не выходящими на дневную поверхность” (Ищукова и др., 2007, стр. 237). В предположении глубинного источника урана его транспорт в месторождения кальдеры осуществлялся вынужденной конвекцией флюидов. Отличительной особенностью вынужденноконвективных течений является однонаправленность потока флюидов (single pass fluid flow) — от источника к области разгрузки. Поэтому восходящий от глубинного источника поток уранотранспортирующих флюидов после отложения рудной минерализации должен был продолжить движение до палеоповерхности кальдеры. Согласно приведенной выше оценке, для создания суммарного рудного запаса 300000 т U Стрельцовского рудного поля было необходимо поступление в кальдеру 1260 км³ ураносодержащих флюидов. При площади кальдеры 140 км² осредненная интенсивность разгрузки питающего рудоотложение потока флюидов должна была составлять 9000 м³ на 1 м² площади палеоповерхности кальдеры. Однако, как отмечают авторы (Ищукова и др., 2007), на уровне современного эрозионного среза и, тем более, на палеоповерхно-

сти кальдеры практически отсутствуют признаки крупномасштабной разгрузки восходящего потока “отработавших” рудотранспортирующих флюидов: “На поверхности коренных пород (под рыхлыми отложениями) ореолы радиоактивности и элементов-индикаторов над глубокозалегающими рудными телами прослеживаются лишь вдоль рудовмещающих разрывов в виде небольших размеров узких линз” (стр. 105). Такое отсутствие признаков выноса на палеоповерхность кальдеры флюидов, сформировавших на глубине менее 1 км от нее рудные тела крупнейшего в мире урановорудного поля, не согласуется с представлением о палеогидротермальной рудообразующей системе с вынужденноконвективным механизмом движения флюидов.

В отличие от гипотезы с вынужденной конвекцией флюидов, которая подразумевает протяженную в разрезе коры трассу их восходящего движения от глубинного магматического источника урана до приповерхностного уровня минералоотложения, гипотеза со свободной тепловой конвекцией флюидов, которая предполагает мобилизацию урана из его близко расположенных источников, позволяет предложить физически реалистические интерпретации для основных компонентов урановой минеральной системы.

В модели формирования Антей-Стрельцовского месторождения с внемагматическими источниками урана были приведены оценки, которые позволяют заключить, что близко расположенные источники урана (или, используя предложенный в (Рыбалов, Омеляненко, 1989) термин, “фильтрационные источники ближней мобилизации”) располагают потенциальными ресурсами, более чем достаточными для формирования месторождений Стрельцовского рудного поля. Основным механизмом “ближней мобилизации” урана был процесс свободной тепловой конвекции флюидов в остаточном тепловом поле субвулканического очага. При глубоко проникающей термоконвективной циркуляции флюидов извлечение урана могло происходить как из консолидированного субвулканического очага Стрельцовой кальдеры, потенциальный ресурс которого был оценен до 15 млн т урана, так и из гранитоидов фундамента кальдеры с оценкой потенциально извлекаемого ресурса в ~1.2 млн т урана.

Расчетные значения скорости поступления рудообразующих флюидов из этих источников обеспечивали формирование месторождений за время в десятки — первые сотни тысяч лет. Расчетные значения температуры согласуются со среднетемпературными условиями отложения рудной минерализации месторождений. При этом в (Пэк и др., 2018) было предложено возможное объяснение также и для проблемы относительно кратковременного повышения температуры минералообразующих флюидов до >500°C в переходный период от предрудной к рудной стадии минералоотложе-

ния. По результатам моделирования было установлено, что такое повышение температуры могло быть вызвано импульсным увеличением (к примеру, вследствие сейсмоструктурной подвижки) флюидопроницаемости зоны кольцевого разлома кальдеры.

Модель термоконвективной циркуляции не содержит ограничений на количество уранотранспортирующих флюидов для формирования месторождений рудного поля. Полузамкнутая структура конвективной ячейки на фиг. 8, однако, обуславливает частичный подток в конвективную ячейку метеорных вод из области за кольцевым разломом кальдеры. Об участии в гидротермальном процессе метеорных вод свидетельствуют данные изотопного исследования кислорода и водорода в предрудных метасоматитах (Андреева, Головин, 1998).

Преобладание латеральной ориентации векторов тока флюидов в ветви конвективной ячейки под породами верхнего экранирующего горизонта осадочно-вулканогенного чехла кальдеры согласуется с упоминавшимся выше отсутствием признаков масштабной разгрузки на ее палеоповерхность “отработавших” уранотранспортирующих флюидов и, тем самым, наглядно поясняет причину “слепой” локализации месторождений Стрельцовского рудного поля.

Латеральный характер движения флюидов в рудолокализующем горизонте кальдеры позволяет также конкретизировать представления о еще одном, не обсуждавшемся в (Пэк и др., 2018), источнике урана. В дополнение к консолидированному подкальдерному магматическому очагу и гранитоидным породам фундамента еще одним источником ближней мобилизации урана могли быть кислые ураноносные вулканические породы заполнения кальдеры. Такая гипотеза была впервые предложена более 40 лет назад в статье (Шаткова, Шатков, 1973). В ней авторы привели сведения о снижении содержания урана при микрокристаллизации (фельзитизации) игнимбритов кальдеры с оценкой интенсивности его выноса до 25 тыс. т U из 1 км³ игнимбритов. В более поздней статье Г.А. Шаткова (2015) объем покрова игнимбритов был оценен в 50–100 км³. При таких параметрах оценка потенциальной продуктивности игнимбритового источника составляет 1.25–2.5 млн т U.

Наряду с игнимбритами, вынос урана мог происходить также из риолитов. Интенсивность такого выноса была оценена в (Chabiron et al., 2003) по результатам сравнения содержания урана 8 г/т в измененных риолитах и 19 г/т в расплавленных включениях во вкрапленниках кварца из риолитов кальдеры. При различии в содержании урана 11 г/т и предположительно принятом объеме риолитов была получена оценка выноса урана из риолитовых покровов кальдеры 900 тыс. т. С такой оценкой интенсивности выноса урана согласуются приведенные в (Cuney, Kyser, 2009)

сведения об изменении значений Th/U отношения от 2–3 в расплавленных включениях до 9–10 в измененных риолитах, свидетельствующие о выносе из риолитов около 70–80% исходного урана. При этом в качестве концептуальной модели транспортного механизма мобилизации урана из кислых вулканических пород кальдерных комплексов в (Cuney, Kyser, 2009) предполагается процесс свободной тепловой конвекции флюидов в термальном поле субвулканического кальдерного очага: “относительно малоглубинный магматический очаг инициирует длительную конвективную циркуляцию гидротермальных флюидов, которая приводит к изменению пород и, тем самым, к ремобилизации U из вулканических пород” (стр. 136).

В ранней статье (Шаткова, Шатков, 1973) предполагалось, что фельзитизация игнимбритов была высокотемпературным процессом, происходившим при “кристаллизации кислых расплавов в приповерхностных условиях и на поверхности” (стр. 36). Однако более поздние исследования (Zielinski, 1985) показали, что “селективный вынос урана из фельзитов происходит постепенно и не является непосредственным результатом их остывания” (стр. 87). Основным процессом, который приводит к мобилизации урана из кислых вулканических стекол, является их гидротермальное преобразование. К примеру, при гидрослюдизации трахидацитов Стрельцовской кальдеры в (Андреева и др., 1990) было установлено понижение валовых содержаний урана от 9.8 г/т в слабо измененных (фоновых) трахидацитах до 5 г/т в их интенсивно гидрослюдизированных вариантах. Если вынос урана происходил в условиях потенциально благоприятных для его отложения, то обеднение вулканических пород ураном могло сопровождаться сопряженными процессами его отложения в относительно близко расположенных “ловушках” рудолокализации. Такие условия с миграцией урана от его рассредоточенных источников в покровах кислых вулканических пород до локальных участков рудоотложения могли предположительно реализовываться в стратифицированных осадочно-вулканогенных образованиях Стрельцовской кальдеры. Процессы локальной ремобилизации урана могли быть одним из факторов, обусловивших формирование пространственно разбросанных месторождений со сложной морфологией, в частности, с такой отличительной их особенностью, как бескорневая локализация: “Месторождения, сосредоточенные в осадочно-вулканогенном чехле, являются бескорневыми” (Ишуква и др., 2007, стр. 69). Поскольку основным механизмом миграции урана в предполагаемом процессе его локальной ремобилизации был фильтрационный массоперенос, латеральная ориентация векторов тока флюидов в рудолокализующем горизонте кальдеры конкретизирует палеогидродинамические условия, которые, предположительно, способствовали многоуровневому распределению

рудных тел с ведущим мотивом их пластообразной морфологии. При этом, по структуре термоконвективной циркуляции флюидов на фиг. 8, предполагаемый механизм локального перераспределения урана в вулканогенно-осадочном чехле кальдеры мог реализовываться в сочетании с мобилизацией и привносом урана в месторождения Стрельцовского рудного поля также из консолидированного магматического очага и гранитоидных пород фундамента кальдеры.

Таким образом, сравнительное рассмотрение альтернативных гипотез о происхождении уникальных запасов урана Стрельцовского рудного поля обосновывает представление о поступлении урана в месторождения Стрельцовской кальдеры из трех основных источников его ближней мобилизации: консолидированного подкальдерного магматического очага, гранитоидных пород фундамента и кислых вулканитов заполнения кальдеры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен сравнительный анализ альтернативных гипотез урановой минеральной системы крупнейшего в Стрельцовской кальдере Антей-Стрельцовского месторождения. Основное внимание было уделено критическому рассмотрению вопросов об источниках урана и флюидов как основных компонентов урановой минеральной системы, определявших формирование уникальных запасов урана Стрельцовского рудного поля.

2. Для урана и флюидов месторождений Стрельцовского рудного поля в литературе широко приняты представления об их глубинном мантийном или нижнекоровом магматическом источнике. Гипотеза глубинного магматического источника обоснована изотопно-геохимическими данными о привносе урана в минеральную систему Стрельцовской кальдеры магматическими расплавами. Однако ее затруднительно обосновать с точки зрения источника рудообразующих флюидов.

3. Если предполагать, что глубинным источником флюидов был магматический расплав кислой магмы с исходным водосодержанием <2%, как в расплаве риолитов Стрельцовской кальдеры, то магматический очаг с таким относительно “сухим” расплавом обладал бы лишь ограниченными возможностями для генерации урантранспортирующих флюидов в количестве, необходимом для формирования уникальных запасов урана Стрельцовского рудного поля.

Гипотеза глубинного источника не может предложить удовлетворительное объяснение также для установленного по результатам изучения флюидных включений аномального повышения температуры флюидов до >500°C в относительно кратковременный период между более низкотемпературными предрудной и рудной стадиями минералоотложения. С учетом инерционности

поля температуры магматического очага и протяженной в разрезе коры трассы восходящего движения флюидов предположение, что такое аномальное повышение температуры обусловлено “относительно короткой инъекцией” в локальную область рудоотложения высокотемпературных флюидов из глубинного магматического очага не представляется убедительным.

Наконец, гипотеза глубинного источника флюидов встречается с затруднением в объяснении скрытого характера оруденения месторождений Стрельцовского рудного поля. Поток флюидов, восходящий от глубинного источника, является по природе движущих сил вынужденно-конвективным с трассой движения от источника к области разгрузки. Поэтому в палеогидротермальной системе с глубинным источником и вынужденной конвекцией флюидов должна была происходить разгрузка “отработавших” урантранспортирующих флюидов на палеоповрхность кальдеры, что не согласуется со “слепой” локализацией месторождений Стрельцовского рудного поля.

4. Альтернативой представлению о глубинном источнике флюидов является гипотеза “ближней мобилизации” урана, предполагающая в качестве транспортного механизма процесс свободной тепловой конвекции флюидов в остаточном тепловом поле магматического очага Стрельцовской кальдеры. Эта гипотеза позволила предложить физически реалистические интерпретации для основных вопросов об источниках урана и флюидов в урановой минеральной системе Стрельцовской кальдеры.

Гипотеза свободной тепловой конвекции не содержит ограничений на количество урантранспортирующих флюидов для формирования уникального рудного запаса месторождений Стрельцовского рудного поля. Структура термоконвективной циркуляции флюидов согласуется с представлениями об участии в гидротермальном процессе метеорных вод, наглядно поясняет причину “слепой” локализации месторождений, расчетные значения температуры флюидов в термоконвективной ячейке согласуются с условиями отложения рудной минерализации. При этом кратковременное повышение температуры на фоне среднетемпературных стадий минералоотложения получает возможное объяснение как результат локального повышения флюидопроницаемости кольцевого разлома кальдеры.

В контуре термоконвективной циркуляции флюидов создаются условия для мобилизации урана из обогащенных ураном консолидированных пород магматического очага и гранитоидных пород фундамента кальдеры. При этом расчетные скорости урантранспортирующих флюидов обеспечивали формирование месторождений за время в десятки – первые сотни тысяч лет. Латеральный характер движения флюидов в рудовмещающей осадочно-вулканогенной толще позволил конкретизировать представление об еще одном источнике урана в кислых вулканических поро-

дах заполнения кальдеры. Вынос урана при гидротермальном преобразовании игнимбритов и риолитов вулканических покровов мог сопровождаться его переотложением в близко расположенных участках рудолокализации на различных литолого-стратиграфических уровнях Стрельцовской кальдеры.

5. Структура термоконвективной циркуляции флюидов создает условия для поступления урана из всех трех источников его ближней мобилизации: консолидированного подкальдерного магматического очага, пород фундамента и кислых вулканических пород заполнения кальдеры. Такое соучастие в формировании рудной минерализации вулканогенных урановых месторождений трех потенциально высокопродуктивных источников урана является, по-видимому, редким случаем, который, предположительно, объясняет проблему происхождения уникальных урановых рудных запасов месторождений Стрельцовского рудного поля.

Авторы не считают проблему источников урана месторождений уникального по запасам Стрельцовского рудного поля решенной. Для этого необходимы дополнительные сравнительные исследования по конкретизации предполагаемых источников урана других вулканогенных (по классификации МАГАТЭ) урановых месторождений.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность академику Н.С. Бортникову за конструктивные замечания и плодотворные дискуссии при подготовке рукописи к печати.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ИГЕМ РАН «Тектонодинамические и физико-химические условия мобилизации, переноса и отложения урана при формировании основных промышленно-генетических типов урановых месторождений».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алешин А.П., Величкин В.И., Крылова Т.Л. Генезис и условия формирования месторождений уникального молибден-уранового Стрельцовского рудного поля: новые минералого-геохимические и физико-химические данные // Геология руд. месторождений. 2007. Т. 49. № 5. С. 446–470.

Андреева О.В., Головин В.А. Метасоматические процессы на урановых месторождениях Тулукуевской кальдеры в Восточном Забайкалье (Россия) // Геология руд. месторождений. 1998. Т. 40. № 3. С. 205–220.

Андреева О.В., Вольфсон И.Ф., Головин В.А., Россман Г.И. Поведение урана в процессе низкотемпературного изменения вмещающих пород на урановых месторождениях // Геохимия. 1990. № 2. С. 206–215.

Андреева О.В., Алешин А.П., Головин В.А. Вертикальная зональность околорудных преобразований на месторождении урана Антей-Стрельцовское (Восточное Забайкалье, Россия) // Геология руд. месторождений. 1996. Т. 38. № 5. С. 396–411.

Геолого-генетические и физико-химические основы модели грейзеновой рудной формации. Под ред. Г.Р. Колониной. Новосибирск: ВО «Наука». Сибирская издательская фирма, 1992. 320 с.

Жариков В.А., Иванов И.П., Омеляненко Б.И., Редькин А.Ф., Юдинцев С.В. Экспериментальное изучение растворимости уранинита в модельных гранитных расплавах и растворах при высоких параметрах // Геология руд. месторождений. 1987. Т. 29. № 4. С. 3–12.

Ишукова Л.П., Игошин Ю.А., Авдеев Б.В. и др. Геология Урулюнгуевского рудного района и молибден-урановых месторождений Стрельцовского рудного поля. М.: Геоинформмарк, 1998. 526 с.

Ишукова Л.П., Ашихмин А.А., Константинов А.К., Костиков А.Т., Модников И.С., Сычев И.В., Толкачев А.Е., Чесноков Л.В., Шумилин М.В. Урановые месторождения в вулcano-тектонических структурах. М.: ВИМС, 2005. 212 с.

Ишукова Л.П., Модников И.С., Сычев И.В., Наумов Г.Б., Мельников И.В., Кандинов М.Н. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. Под редакцией С.С. Наумова. Иркутск: Геологический концерн «Геологоразведка», 2007. 260 с.

Коваленко Д.В., Петров В.А., Полуэктов В.В., Агеева О.А. Геодинамические условия формирования мезозойских вулканических пород Стрельцовской кальдеры // ДАН. 2014. Т. 457. № 5. С. 564–567.

Коваленко Д.В., Петров В.А., Полуэктов В.В., Агеева О.А. Геодинамическая позиция мезозойских мантйных пород Стрельцовской кальдеры (Восточное Забайкалье), мантйные домены Центральной Азии и Китая // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 4. Вып. № 28. С. 231–246.

Крылова Т.Л., Алешин А.П., Лом Т., Величкин В.И., Кюне М. Свидетельства магматогенного происхождения рудообразующих флюидов на Мо-У месторождениях Стрельцовского рудного поля (Вост. Забайкалье, Россия) // Матер. XIII Международной конференции по термобарогеохимии и IV симпозиума ARIFIS. 2008. Т. 2. С. 64–67.

Лаверов Н.П., Чернышев И.В. Временная связь урановых месторождений с континентальным вулканизмом // Геохронология и проблемы рудообразования. М.: Наука, 1977. С. 5–18.

Мальковский В.И., Пэк А.А., Алешин А.П., Величкин В.И. Модель процесса флюидного теплопереноса при формировании Мо-У месторождений Стрельцовского рудного поля (Восточное Забайкалье): Гипотеза вынужденной конвекции растворов, генерируемых глубинным источником // Геология руд. месторождений. 2010. Т. 52. № 1. С. 17–35.

Мальковский В.И., Пэк А.А. Влияние разрывных нарушений на процессы флюидного теплопереноса в земной коре. М.: ИФЗ РАН, ИГЕМ РАН, 2014. 120 с.

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

Модников И.С., Сычев И.В. Условия формирования уранового оруденения в вулканических депрессиях

- проседания // Геология руд. месторождений. 1984. Т. 26. № 1. С. 31–41.
- Наумов Г.Б., Мироненко М.В., Салазкин А.Н и др. Новые данные по геохимическим условиям образования месторождений Стрельцовского рудного поля и их практическое значение // Матер. по геологии урановых месторождений. М.: ВИМС, 1985. Вып. 93. Кн. 2. С. 65–74.
- Наумов В.Б. Химический состав, летучие компоненты и элементы-примеси риолитовых расплавов Восточного Забайкалья и Северного Кавказа по данным изучения включений в минералах // Геология и геофизика. 2011. № 11. С. 1736–1747.
- Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В., Коваленко Д.В. Тектономагматические циклы и геодинамические обстановки формирования рудоносных систем Южного Приаргуны // Геология руд. месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 445–469.
- Пэк А.А., Мальковский В.И., Петров В.А. Тепловая конвекция флюидов как возможный механизм формирования уникальных урановых месторождений Стрельцовское и Антей (Восточное Забайкалье) // Геология руд. месторождений. 2018. Т. 60. № 6. С. 558–574.
- Редькин А.Ф., Величкин В.И., Алешин А.П., Бородулин Г.П. Исследование взаимодействия модельного F-содержащего кислого расплава с хлоридным флюидом, уранинитом и колумбитом при 750°C и 1000–2000 бар для оценки рудогенерирующей способности верхнекорового очага под Стрельцовской кальдерой (Восточное Забайкалье) // Геология руд. месторождений. 2009. Т. 51. № 4. С. 325–341.
- Рейф Ф.Г. Рудообразующий потенциал гранитов и условия его реализации. М.: Наука, 1990. 181 с.
- Рейф Ф.Г. Условия и механизмы формирования гранитных рудно-магматических систем. М.: ИМГРЭ, 2009. 498 с.
- Рыбалов Б.Л., Омеляненко Б.И. Источники рудного вещества эндогенных урановых месторождений. М.: Наука, 1989. 275 с.
- Тарханов А.В., Бугриева Е.П. Крупнейшие урановые месторождения мира // Минеральное сырье. М.: ВИМС, 2012. № 27. 118 с.
- Шатков Г.А. Стрельцовский тип урановых месторождений // Региональная геология и металлогения. 2015. № 63. С. 85–96.
- Шаткова Л.Н., Шатков Г.А. О возможном источнике рудного вещества урано-флюоритовых месторождений // Геология руд. месторождений. 1973. Т. 15. № 4. С. 36–43.
- Bruneton P., Chemillac R., Cuney M. Uranium deposits in volcanic environments: a review. Mineral resources in sustainable world / Proceedings of 13th Biennial SGA Meeting. 24–27 August 2015. Nancy, France. V. 5. P. 1785–1788.
- Chabiron A., Alyoshin A.P., Cuney M., Deloule E., Golubev V.N., Velitchkin V.I., Poty B. Geochemistry of the rhyolitic magmas from the Streltsovka caldera (Transbaikalia, Russia): a melt inclusion study // Chem. Geol. 2001. V. 175. P. 273–290.
- Chabiron A., Cuney M., Poty B. Possible uranium sources for the largest uranium district associated with volcanism: the Streltsovka caldera (Transbaikalia, Russia) // Miner. Deposita. 2003. V. 38. № 2. P. 127–140.
- Cuney M., Kyser K. Recent and not-so-recent developments in uranium deposits and implications for exploration // Mineralogical Association of Canada. Short Course Series. 2009. V. 39. 257 p.
- Goodell P.C. Classification and model of uranium deposits in volcanic environments. In: Uranium deposits in volcanic rocks. IAEA, 1985. Vienna. P. 1–16.
- Hagemann S.G., Lisitsin V., Huston D.L. Mineral system analysis: quo vadis // Ore Geol. Rev. 2016. V. 76. P. 504–522.
- Huston D.L., Mernagh T.R., Hagemann S.G., Doublier M.P., Fiorentini M., Champion D.C., Jaques A.L., Czarnota K., Cayley R., Skirrow R., Bastrakov E. Tectono-metallogenic systems – The place of mineral systems within tectonic evolution, with an emphasis on Australian examples // Ore Geol. Rev. 2016. V. 76. P. 168–210.
- Krylova T.L., Aleshin A.P., Lhomme T. et al. New data on the formation conditions of the uranium ores at the Streltsovsky and Antei deposits (Eastern Transbaikalia, Russia) // 12th Quadrennial IAGOD symp. “Understanding the genesis of ore deposits to meet the demands of the 21st century”. Moscow, 2006. CD-ROM version.
- Nash J.T. Volcanogenic uranium deposits – Geology, geochemical processes, and criteria for resource assessment. U.S. Geological Survey Open-File Report 2010–1001. 2010. 99 p.
- Peiffert C., Nguyen T.C., Cuney M. Uranium in granitic magmas. Part 2. Experimental determination of uranium solubility and fluid-melt partition coefficients in the uranium oxide-haplogranite-H₂O–NaX (X = Cl, F) system at 770°C, 2 kbar // Geochim. Cosmochim. Acta. 1996. V. 60. P. 1515–1529.
- Pirajno F. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. 2009. 1250 p.
- Pirajno F. A classification of mineral systems, overviews of plate tectonic margins and examples of ore deposits associated with convergent margins // Gondwana Research. 2016. V. 33. P. 44–62.
- Plant J.A., Simpson P.R., Smith B., Windley B.F. Uranium ore deposits – products of the radioactive Earth. Reviews in Mineralogy. 1999. V. 38. P. 255–319.
- 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.
- Timofeev A., Migdisov A.A., Williams-Jones A.E., Roback R., Nelson A.T. Xu H. Uranium transport in acidic brines under reducing conditions // Nature Communications. 2018. V. 9. P. 1469–1475.
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-03564-7>
- Uranium 2016: resources, production, demand. NEA/IAEA, ORCD. 2016. 548 p.
- Uranium deposits in volcanic rocks. IAEA, Vienna, 1985. 468 p.
- World Distribution of Uranium Deposits (UDEPO) with Uranium Deposit Classification. 2009 Edition. IAEA-TECDOC-1629. Vienna, 2009. 119 p.
- Wyborn L.A.I., Heinrich C.A., Jaques A.L. Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and mappable criteria. AusIMM Publication Series 4/94. 1994. P. 109–115.
- Zielinski R.A. Volcanic rocks as sources of uranium. In: Uranium deposits in volcanic rocks. IAEA, Vienna, 1985. P. 83–95.