

УДК 551.2:553.49:550.4:551.2:550.428

УРАНОНОСНЫЕ ВУЛКАНОГЕННЫЕ СТРУКТУРЫ: СТРЕЛЬЦОВСКАЯ (РФ), СИАНШАНЬ (КНР) И МАКДЕРМИТТ (США). СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЕТРОЛОГИИ КИСЛЫХ ВУЛКАНИТОВ И СОСТАВА ОКОЛОРУДНЫХ МЕТАСОМАТИТОВ

© 2022 г. В. А. Петров^{a, *}, О. В. Андреева^{a, **}, В. В. Полуэктов^{a, ***}, Д. В. Коваленко^{a, ****}

^aИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

*e-mail: vlad243@igem.ru

**e-mail: akimolan@igem.ru

***e-mail: vapol@igem.ru

****e-mail: kovmit@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.08.2021 г.

После доработки 28.09.2021 г.

Принята к публикации 06.10.2021 г.

Статья посвящена сравнительному анализу данных по петрологии рудовмещающих кислых вулканитов и околорудных низкотемпературных метасоматитов Стрельцовой в Восточном Забайкалье, Сианшаньской в Южном Китае и МакДермитт на западе США вулканогенных построек. Рудовмещающими структурами являются так называемые ресургентные (восстановленные) значительные по размерам кальдеры (Стрельцовская и МакДермитт) и вулcano-купольное сооружение Сианшань, в апикальной части которого расположено несколько небольших кальдер. Ведущим геодинамическим механизмом развития и функционирования рудно-магматических систем этих вулканогенных сооружений является обстановка растяжения земной коры, выраженная в процессах рифтогенеза, которые в Восточном Забайкалье протекали в позднеюрско-раннемеловое время, в Южном Китае в позднем мелу и начале палеоцена, а в районе кальдеры МакДермитт, принадлежащей к Йеллоустонской горячей точке, в миоцене. Магматическая активность продуцировала вулканизм бимодальной серии в последовательности базиты – кислые вулканиты – базиты, а вмещающая среда урановых месторождений, как правило, представляет собой метаалюминиевый или умеренно пералюминиевый высококалийный тип эффузивных и/или субвулканических пород, соответствующих “анорогенным гранитам” А2-типа. Риолиты, риодациты, трахириолиты, экструзивные сиениты, кварцевые сиениты, риолитовые дайки и купола всех трех вулканических построек обогащены фтором и обнаруживают довольно высокую степень фракционирования. Ведущими типами околорудных метасоматических изменений пород являются дорудная иллитизация и аргиллизация, которые сменяются рудосопровождающими альбитизацией, карбонатизацией, хлоритизацией и флюоритизацией, а затем пострудными глинистыми преобразованиями. Структуры рудных полей определяются наличием оконтуривающих (кольцевых) разломов и соотношением внутрикальдерных флюидопроводящих каналов, а строение месторождений и рудных тел – сочетанием внутрипластовых крутопадающих и пологозалегающих разрывов. Показано, что, несмотря на разные временные рамки и характер протекания структурообразующих процессов, эти вулканогенные постройки проявляют многие черты сходства в развитии магматических и гидротермальных процессов, что определяет их в качестве “типовых” рудоносных структур в действующей классификации вулканогенных урановых месторождений МАГАТЭ.

Ключевые слова: ураноносные вулканогенные структуры, геодинамические режимы, магматическая активность, околорудные метасоматиты, изотопно-геохимические данные, месторождения урана и стратегических металлов

DOI: 10.31857/S0016777022010063

ВВЕДЕНИЕ

Урановые руды вулканических построек Стрельцовой в Восточном Забайкалье, Сианшаньской (Xiangshan) в Южном Китае и МакДермитт (McDer-

mitt) на западе США, по классификации МАГАТЭ (Geological Classification..., 2018), относятся к вулканогенному (volcanic-related) типу, а в Стрельцовском и Сианшаньском рудных полях наблю-

дается сочетание вулканогенного в чехле и гранитного (granite-related) в фундаменте типов месторождений (Descriptive Uranium..., 2020).

Изученность вулканических построек Стрельцовой, Сианшаньской и МакДермитт с точки зрения проявленности урановорудного процесса различна: наибольшая для Стрельцовой и наименьшая для МакДермитт. В пределах Сианшаньской вулcano-купольной структуры в настоящее время ведутся интенсивные геологоразведочные работы, сопровождаемые полномасштабными научными изысканиями.

В Восточном Забайкалье ураноносные мезозойские кальдерные постройки (Куладжинская, Стрельцовская, Куйтунская) принадлежат к Восточно-Монгольскому вулканическому поясу, на юго-западной оконечности которого в Монголии локализовано урановмещающее Дорнотское вулканическое сооружение.

В Южном Китае наиболее крупные вулканогенные месторождения рудного поля локализованы в Сианшаньской вулcano-купольной постройке мезозойско-кайнозойского возраста, принадлежащей Гань-Ханскому (Gan-Hang) металлогеническому поясу, объекты которого до недавнего времени являлись важнейшим источником урана (World Uranium..., 2020).

Кальдера МакДермитт в США (штаты Невада и Орегон) кайнозойского (эоцен-миоценового) возраста не содержит сколько-нибудь крупных рудных объектов (включая урановые), хотя является более насыщенной гидротермальными проявлениями (например, литий и ртуть), чем прочие кальдеры Йеллоустонской горячей точки. Кальдера МакДермитт интересна с точки зрения общих закономерностей развития урановорудного процесса в кальдерных сооружениях молодого неоген-четвертичного возраста. Например, интерес представляют условия локализации рудного тела Аврора с запасами до 8000 т U_3O_8 и средним содержанием урана 0.05%, который залегает в измененных лавовых потоках основного состава вдоль северной границы комплекса МакДермитт с сопровождающей пиритизацией и лейкоксенизацией. Информация о геологическом строении этого объекта крайне ограничена, что не позволяет провести сравнение с единственной в своем роде рудной залежью № 7 месторождения Дорнот, где настуран-коффинитовые с титанатами урана руды слагают пластообразные тела в горизонте подушечных (пиллоу) лав нижнего покрова андезито-базальтов (Petrov et al., 2003).

Для регионов размещения крупнейших ураноносных вулканических построек (Стрельцовская в Восточном Забайкалье, Сианшаньская в Южном Китае и МакДермитт на западе США) ведущим геодинамическим механизмом развития и функционирования рудно-магматических систем

являются процессы растяжения, которые выражены в формировании протяженных рифтогенных структур. В Восточном Забайкалье они протекали в основном в позднеюрско-раннемеловое время, в Южном Китае — в позднем мелу и начале палеоцена, а в районе Йеллоустонской горячей точки — в миоцене.

Несмотря на разные временные рамки становления и неполное сходство тектонодинамических обстановок формирования рудоносных вулканогенных построек, многие черты проявлений в них магматических и гидротермальных процессов, несомненно, близки. В связи с этим основная цель статьи — сравнительный анализ петрогеохимии кислых рудовмещающих вулканитов и состава сопровождающих околорудных метасоматитов с дополнительным кратким анализом геодинамических обстановок формирования крупнейших по классификации МАГАТЭ ураноносных вулканических построек.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ПО ПЕТРОЛОГИИ ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОД КИСЛОГО СОСТАВА

Несмотря на разные временные рамки формирования рудоносных вулканогенных построек, многие черты проявлений в них магматических и гидротермальных процессов отражают те их свойства, которые характеризуют области внутриплитных тектонических режимов (Восточное Забайкалье, Южный Китай) или внешние части зон океан-континент (кальдера МакДермитт).

Для Восточного Забайкалья урановые, молибден-урановые, флюоритовые и некоторые другие типы руд практически всеми исследователями связываются с последними фазами юрско-раннемелового кислого эффузивного магматизма и, соответственно, с интенсивными проявлениями флюидопотоков, завершающих этот важнейший в металлогеническом отношении тектоно-магматический цикл (ТМЦ). На территории Южного Китая эта взаимосвязь является более сложной из-за существенного временного разрыва (около 30 млн лет) между завершением вулканизма и процессами рудообразования. В кальдере МакДермитт в США локализованы мелкие месторождения урана (Аврора, Мунлайт, Олд Мэн Спринг, Коттонвуд Крик, Опалит Майн и др.), но металлогения ее крайне интересна в связи с присутствием ртутных (месторождения МакДермитт, Кордеро, Бретц Майн, Траккер Пасс и др.) и литиевых (месторождение Кингс Вэлли) руд. Урановая минерализация представлена, в основном, жильным отенитом, торбернитом, т.н. "гуммитом" и предположительно уранинитом с высоким содержанием ванадия (Nash, 2010). Кальдера МакДермитт является более насыщенной гидротермальными проявлениями, чем прочие вулканиче-

ские сооружения Йеллоустонской горячей точки, а возраст оруденения в ней приближен ко времени последнего излияния лав. Поэтому кальдера МакДермит интересна с точки зрения общих закономерностей развития рудной минерализации в областях молодого кайнозойского вулканизма и сравнительного анализа кайнозойской гидротермальной активности с поствулканическими процессами, которые развиты в более древних вулканических сооружениях.

К настоящему времени существуют разные, подчас взаимоисключающие, точки зрения на механизмы формирования урановой минерализации в вулканических постройках кальдерного типа, но большинство исследователей признают ведущую роль в рудообразовании магматических пород кислого состава (как эффузивных, так и интрузивных разной степени абиссальности), имеющих содержания урана выше кларковых (Uranium..., 1985). Эти породы, кроме того, формируют основной объем кальдер мезозойско-кайнозойского возраста. В программной статье М. Кюне (Cuney, 2014) показано, что наиболее масштабное урановое оруденение ассоциирует с излияниями или экструзиями субщелочных пород кислого состава, обогащенных калием. Этот тип пород (метаалюминиевые и субщелочные (peralcaline) калиевые риолиты, трахириолиты, трахириодациты, а также экструзивные сиениты, кварцевые сиениты, реже риолитовые дайки и купола) характерен практически для всех регионов распространения вулканогенных месторождений и проявлений урана (Восточное Забайкалье, Юго-Восточный Китай, небольшие месторождения Западных штатов США и некоторые другие в регионах проявлений мезозойско-кайнозойской и более древней магматической активности). Вмещающие породы урановых месторождений в вулканических постройках упомянутых регионов представляют собой метаалюминиевый или умеренно пералюминиевый высококалийевый тип эффузивных или субвулканических пород соответствующих гранитам А2-типа (“анорогенные граниты” по Ебу, 1990, 1992). Происхождение этих пород (риолитов, риодацитов, трахириолитов) исследователями Сианшаньского рудного поля трактуется несколько различно. Так, ранее (Jiang et al., 2005; Cuney, 2014) предполагалось, что они образовались путем частичного плавления, главным образом, чарнокитовой нижней коры в условиях субдукции и при возможном внедрении разогретого мантийного материала. В дальнейшем (Bonnetti et al., 2020; Guo et al., 2020) стала преобладать гипотеза преимущественного происхождения пород, образующих вулкано-плутонический комплекс, при плавлении его метаморфического фундамента мезозой-палеозой-протерозойского возраста. Обогащение вулканических пород ураном и другими несовместимыми элементами, вероятно, отражает также, по мнению авторов (Bonnetti et al., 2020; Guo

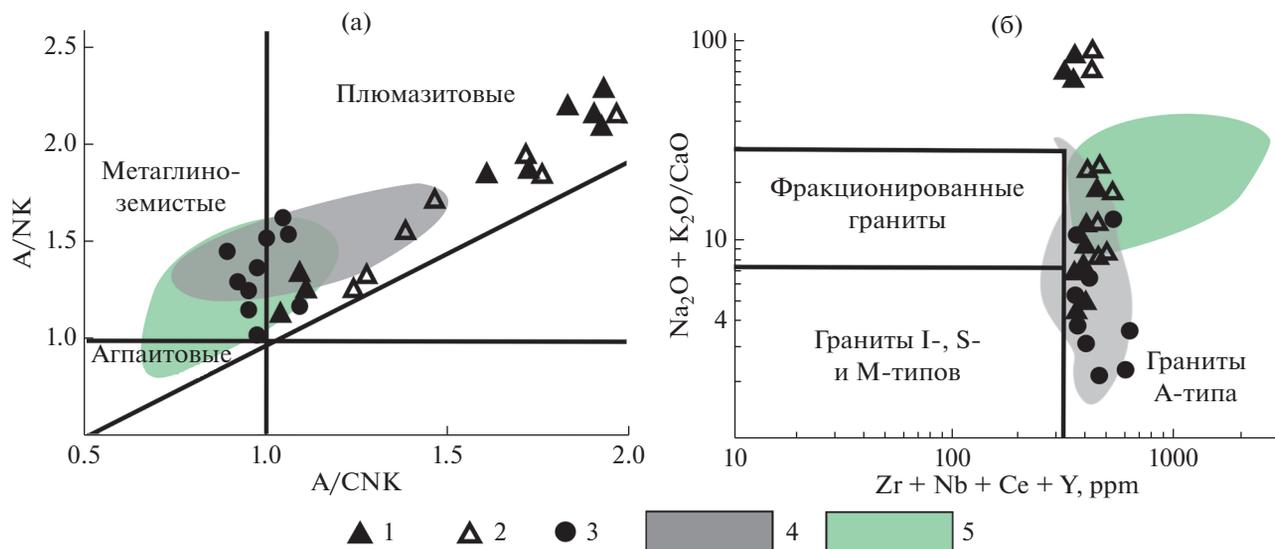
et al., 2020), относительно высокую степень кристаллической дифференциации, подтверждаемую рядом геохимических критериев. Отметим, что субщелочные кислые вулканы рассматриваются как возможные источники урановой минерализации большинством исследователей месторождений урана в вулканических постройках.

Исключениями являются среднее по масштабам месторождение Макусани (Перу), приуроченное к риолитовым лавам с плюмазитовыми геохимическими характеристиками, и незначительные проявления урановой минерализации в топазовых риолитах бериллиевого месторождения Спор Маунтин и некоторых других (Christiansen et al., 1986; Cuney, 2014).

Однако временные взаимоотношения кислого магматизма и уранового оруденения для упомянутых вулканических построек противоречивы, что наглядно демонстрируют данные изотопного возраста, имеющиеся для вулканогенных месторождений соответствующих урановых провинций. В первом случае (Восточное Забайкалье) урановое оруденение почти совпадает по времени с заключительными фазами мезозойского вулканизма, а во втором (Южный Китай) отделено значительным (10–20 млн лет) временным интервалом (Bonnetti et al., 2020; Guo et al., 2020). Кайнозойское (около 16 млн лет) урановое оруденение месторождения МакДермит также близко по возрасту ко времени формирования кальдеры (Henry et al., 2017). Существуют и другие различия, касающиеся последовательностей рудоотложения и геохимических черт рудных минералов, что требует отдельного обсуждения.

Урановое, молибден-урановое, а также иногда флюоритовое оруденение для Восточного Забайкалья практически всеми его исследователями связывается с последними фазами юрско-раннемелового кислого эффузивного магматизма и, соответственно, с интенсивными проявлениями флюидопотоков, завершающих этот важнейший в металлогеническом отношении тектоно-магматический цикл (Петров и др., 2017). На территории Южного Китая эта взаимосвязь является более сложной из-за существенного временного разрыва между завершением вулканизма и процессами рудообразования (Guo et al., 2020). При дальнейшем изложении мы не будем касаться всех аспектов проявлений эффузивного магматизма, сосредотачиваясь только на последних стадиях кислого вулканизма, приближенного к времени уранового минералообразования.

Для территории Восточного Забайкалья очевидна пространственная и, вероятно, парагенетическая взаимосвязь уранового (а также Pb–Zn, Mo, Cu, Au, Ag) оруденения с проявлениями вулканизма позднеюрского-раннемелового возраста, относящимися, по представлениям многих



Фиг. 1. а – составы кислых и субщелочных эффузивных пород Стрельцовой кальдеры, а также Сианшань и МакДермитт, на диаграммах A/CNK – A/NK (по Maniar, Piccoli, 1989); $A/CNK = Al/(Na + K + 2Ca)$, $A/NK = Al/(Na + K)$. б – дискриминационная диаграмма (по Whalen et al., 1987) с данными по составам эффузивов кальдер Стрельцовой (значки), Сианшань и МакДермитт (в виде полей составов); 1 – риолиты Стрельцовой кальдеры; 2 – те же риолиты (по Chabiron et al., 2003); 3 – жильные и субвулканические сиениты и кварцевые монцониты; 4 – риолиты и риодациты структуры Сианшань; 5 – риолиты и игнимбриты кальдеры МакДермитт. С использованием материалов: Ищукова и др., 2007; Петров и др., 2017; Андреева и др., 2020; Chabiron et al., 2003; Castor, Henry, 2000; Jiang et al., 2005; Yang et al., 2011; Henry et al., 2017; Bonnetti et al., 2020; Castor, Henry, 2020.

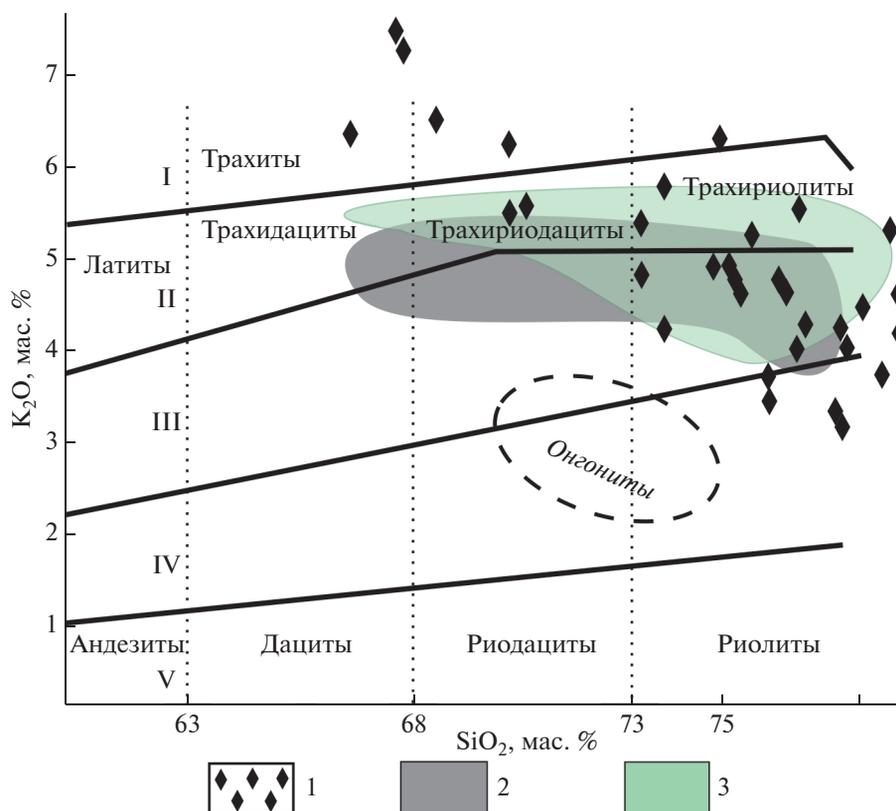
исследователей этого региона, к латитовой ветви континентального магматизма (Таусон, 1982; Петров и др., 2017; Андреева и др., 2020). Латитовая серия вулканитов, включающая щелочные и субщелочные базальтоиды (шошониты), латиты (триандезиты, трахидациты), а также их кислые производные (трахириодациты, калиевые риолиты), была впервые описана с геохимических позиций для западных штатов США С.Р. Никольдсом и Р. Алленом (1958). Их интрузивным фациям соответствуют монцогаббро, монцониты, сиениты, субщелочные граниты.

Поскольку риолиты и риолитовые игнимбриды, а также субвулканические кварцевые монцониты Стрельцовой кальдеры приближены по времени их излияния и внедрения к урановой минерализации, мы опускаем характеристику более древних потоков трахидацитов, дацитов, базальтов, отделенных от урановорудного процесса интервалом около 15–20 млн лет. Риолиты характеризуются флюидально-брекчиевой текстурой и порфировой структурой. Количество вкрапленников составляет 0–40%. В составе фенокристаллов отмечаются калишпат, кварц, олигоклаз, реже биотит. Структура кварц-полевошпатовая основная стекловатая, фельзитовая или сферолитовая. Сферолитовые риолиты отличаются наличием в микрофельзитовой основной массе радиальнолучистых сферолитов, состоящих из кварца и калишпата. Эти минералы преобладают и в составе флюидальных тонкополосчатых риолитов, тек-

стура которых обусловлена различной степенью раскристаллизованности полос. Вулканическое стекло риолитов подвержено девитрификации. Существуют и потоки стекловатых почти нераскристаллизованных пород мощностью до первых метров.

Геохимические черты кислых лав и субвулканических пород урановых месторождений Забайкалья соответствуют или близки гранитоидам типа А (по Абу, 1990, 1992) (фиг. 1а, б). На этих сравнительных диаграммах породы Стрельцовой кальдеры обнаруживают сходные черты с кислыми вулканитами рудного поля Сианшань и кальдеры МакДермитт, что подчеркивается, в частности, высокими содержаниями в них высокозарядных редких элементов.

Характеристические отношения Y/Nb , которые по (Ебу, 1990) могут указывать на принадлежность магматитов кислого состава к типу 1 (мантийному) или типу 2 (коровому или смешанного происхождения) для Стрельцовского рудного поля противоречивы. Возможно, кроме чрезвычайно широкого распространения метасоматических преобразований практически всех образующих Стрельцовскую кальдеру пород, подобного рода анализу мешает типичная для кислых лав и игнимбридов неоднородность их сложения, наличие чужеродных включений и ксенокристаллов. Так, например, этим обстоятельством объясняется значительный разброс фигуративных точек на



Фиг. 2. Диаграмма K₂O–SiO₂ для пород завершающей фазы вулканизма кальдер Стрельцовской (1), Сианшань (2), МакДермитт (3). Литературные источники данных соответствуют указанным на фиг. 1а, б. Серии пород: I – калиевая щелочная, II – субщелочная (латитовая, шошонитовая), III – высококалийная известково-щелочная, IV – известково-щелочная, V – толеитовая. Классификация по (Рессерилло, Taylor, 1976).

фиг. 1 и 2, особенно резко выраженный для риолитов высокой кремнекислотности. Из приведенных схем очевидно, что вулканы кальдеры МакДермитт отличаются от мезозойских кислых эффузивов Сианшаня и Стрельцовской кальдеры большим размахом содержаний высокочargedных компонентов и меньшей пералюминиевостью.

Существенно калиевый тип вулканических построек отчетливо прослеживается на классификационной диаграмме калий–кремнезем (фиг. 2).

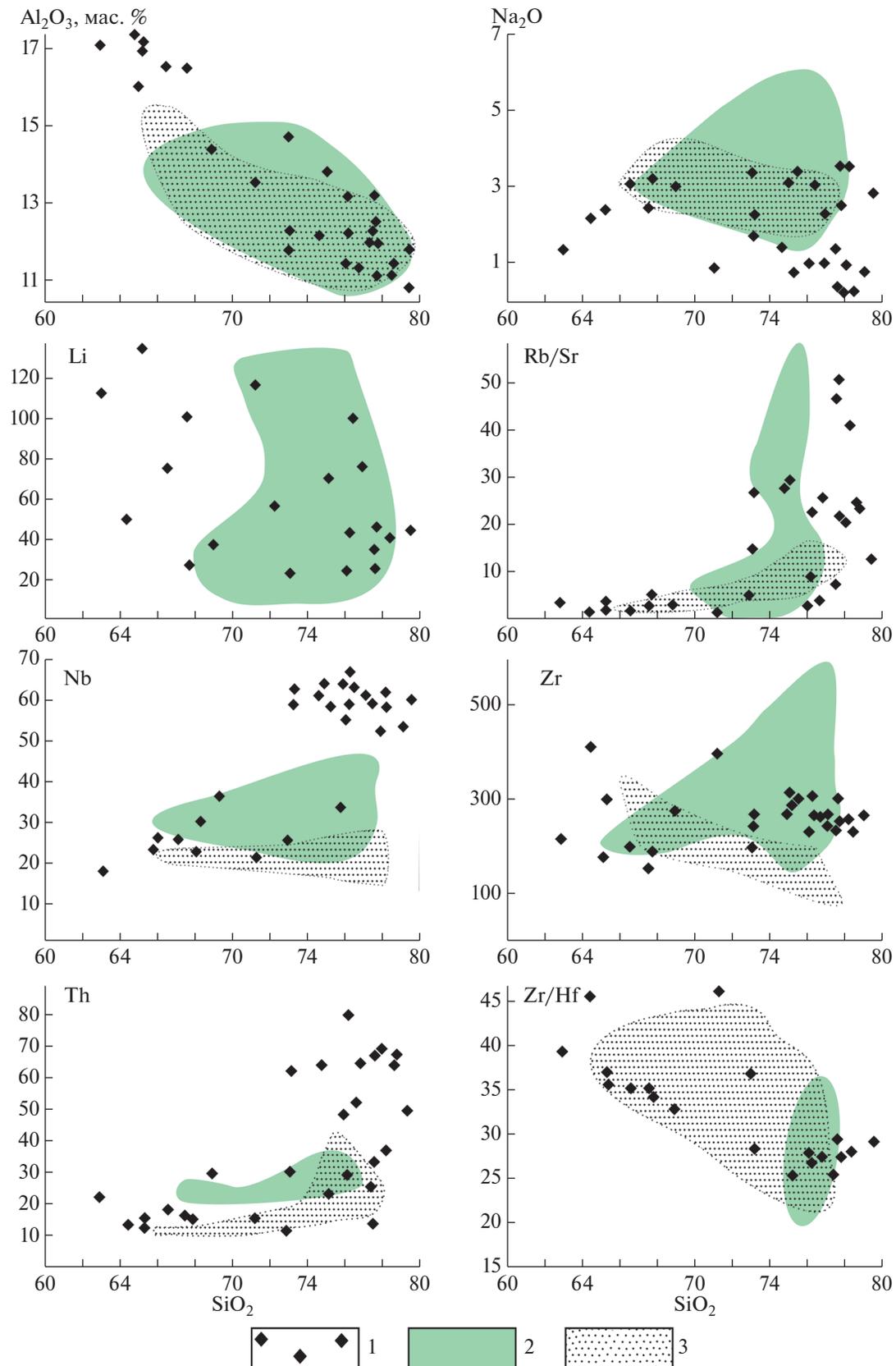
Сравнительный анализ бинарных диаграмм Харкера для некоторых петрогенных и редких элементов кислых эффузивов трех рассматриваемых сооружений также обнаруживает многие черты сходства (фиг. 3). Отметим высокие содержания Nb, Th и Zr, вышелекарковую обогащенность Li (для структуры Сианшань данные по литию, к сожалению, отсутствуют), а также зависимость отношений Rb/Sr и Zr/Hf от кремнекислотности.

Одной из наиболее заметных особенностей Юго-Восточного Забайкалья является обогащенность фтором всех разновидностей магматических пород мезозойского возраста, включая не только редкометалльные лейкократовые и Li–F-

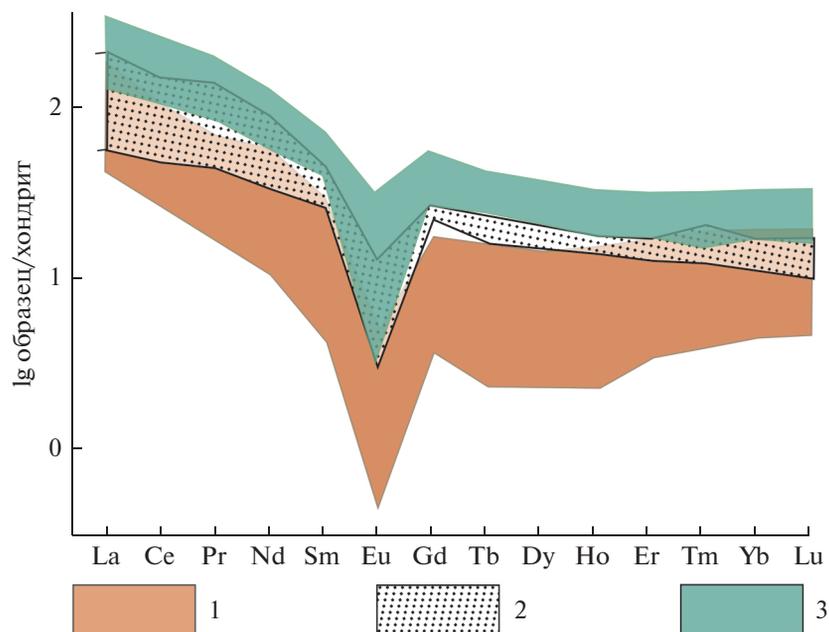
граниты, но и вулканы бимодальной серии, выполняющие кальдерные постройки. Наиболее ярко эта геохимическая черта выражена в лейкократовой (риолитовой) части эффузивных магматических серий. К сожалению, в доступных литературных источниках отсутствуют систематические данные по содержаниям фтора в кальдере МакДермитт и вулканогеенной постройке Сианшань, а этот элемент, возможно, имеет большое значение для переноса урана.

Риолиты, риодациты, трахириолиты, а также экструзивные сиениты, кварцевые сиениты, риолитовые дайки и купола всех трех вулканических сооружений обнаруживают довольно высокую степень фракционирования. Спектры концентраций REE, нормированных к хондриту, показывают обогащение LREE и отчетливо выраженную отрицательную Eu-аномалию (фиг. 4).

Кислые лавы кальдеры МакДермитт обнаруживают несколько более высокие содержания всех РЗЭ, вероятно, ввиду их меньшей общей гидротермальной переработки. Практически все спектры РЗЭ отличаются от равноплечего (“gull-winged”) распределения, характерного для поздних дифференциатов Li–F-редкометалльных гра-



Фиг. 3. Бинарные диаграммы Харкера для SiO_2 и некоторых петрогенных и редких элементов кислых и щелочных пород ураноносных кальдер. Составы приведены к 100% сухого остатка. 1 – вулканические породы Стрельцовой кальдеры, 2 – МакДермитт, 3 – Сианшань. Литературные ссылки на используемые данные соответствуют фиг. 1а, б.



Фиг. 4. Спектры РЗЭ для вмещающих пород кислого и субщелочного составов в ураноносных структурах Стрельцовская, Сианшань и МакДермитт. Источники литературных данных указаны на фиг. 1а, б. 1 – Стрельцовская кальдера, 2 – структура Сианшань, 3 – кальдера МакДермитт.

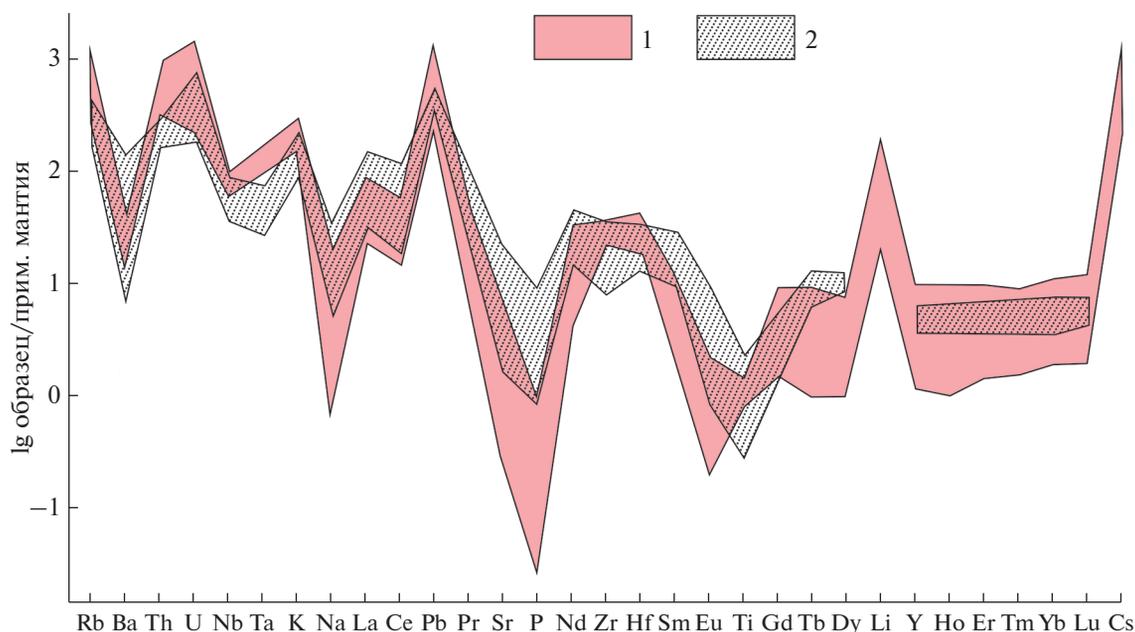
нитов. Наконец, в кислых эффузивах ураноносных кальдер никогда не наблюдаются тетрадные эффекты М-типа, которые могут отчетливо проявляться в высокодифференцированных Li–F-гранитах и онгонитах (Masuda et al., 1987; Badani-na et al., 2006).

Вулканические породы кислого состава ураноносных структур значительно обогащены несовместимыми элементами – Li, Rb, Ta, U, при резком снижении Ba и Sr, относительно верхней континентальной коры. На спайдер-диаграммах (фиг. 5) кислых и субщелочных пород Стрельцовской кальдеры (Петров и др., 2017; Андреева и др., 2020) и кальдеры Сианшань (Jiang et al., 2005; Yang et al., 2010; Bonnetti et al., 2020) фиксируются минимумы Ba, Sr, Eu, Ti, вероятно, связанные с фракционированием из расплава полевых шпатов, титаномагнетита или сфена.

Содержание урана и тория во вмещающих урановое оруденение породах представляет одну из их важнейших классификационных характеристик. Так, общие содержания урана в риолитах Стрельцовской кальдеры колеблются от 4 до 23 ppm по нашим данным и от 6.5 до 28 ppm (по Chabiron et al., 2001, 2003), а в расплавных включениях концентрация урана достигает 26 ppm (Наумов и др., 2011) и 42.09 ppm (Chabiron et al., 2003). Th/U отношение меняется в широких пределах – от 2 до 9, что может быть связано с высокой подвижностью урана в условиях очень интенсивных проявлений метасоматоза внутри кальдеры. В риолитах и риодацитах Сианшаня концентрация урана ниже и

не превышает 15.6 ppm, а Th/U отношение несколько стабильнее, в основном от 1.7 до 4 (и до 5.4). Это позволяет исследователям рудного поля (Bonnetti et al., 2020) объяснить присутствие в рудах большого количества торийсодержащих минералов – ураноторита, торианита и др. Месторождения кальдеры МакДермитт ассоциируют с риолитами, также отчетливо обогащенными ураном – от 9 до 20 ppm (Castor, Henrey, 2000).

Соотношения изотопных возрастов эффузивных пород последних фаз внедрения или излияния и уранового оруденения в рассматриваемых структурах неоднозначны. Так, в Стрельцовской кальдере возраст последних проявлений вулканизма, определенный разными методами, в основном, соответствует границе юры и мела (около 140 млн лет). Однако, согласно данным U–Pb датирования по цирконам из экструзий риолитов, штоков гранит-порфиров, даек граносиенит-порфиров, линз цезиеносных перлитов (Шатков и др., 2010), проявления кислого вулканизма продолжались даже до 128 млн лет назад. Возраст же уранового оруденения, локализованного внутри этой вулcano-тектонической структуры, оценивается в 135 млн лет (Чернышев, Голубев, 1996; Лаверов и др., 2012). Таким образом, не исключается возможность проявления пострудного эффузивного и гипабиссального магматизма, хотя и в незначительных масштабах. В вулканической структуре Сианшань урановое оруденение отделено от последних проявлений кислого магматизма интервалом около 20 млн лет, а в кальдере



Фиг. 5. Спайдер-диаграммы составов риолитов Стрельцовского рудного поля и риолитов и риодацитов Сианшань (по Yang et al., 2005; Yang et al., 2010). 1 – составы риолитов Стрельцовской кальдеры, 2 – структуры Сианшань.

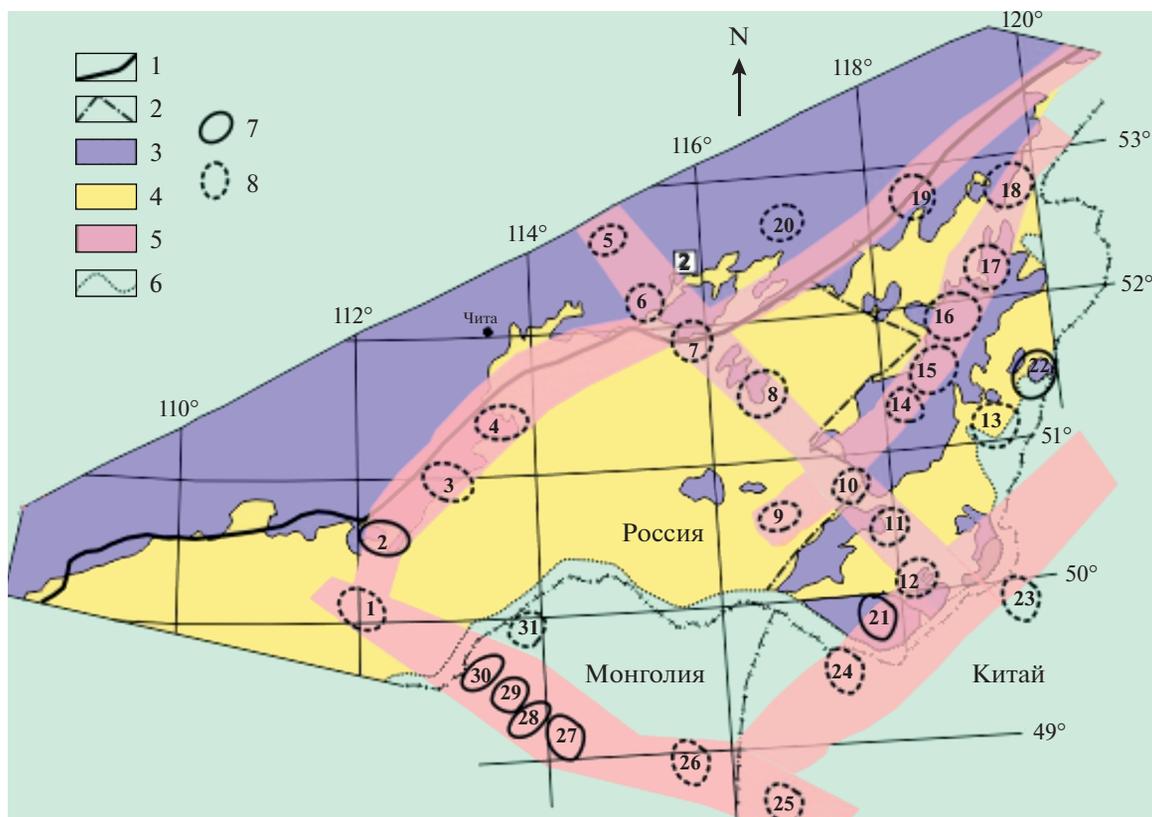
МакДермитт оно почти совпадает со временем завершения вулканической деятельности (около 16 млн лет). Поэтому взаимосвязь импульсов магматической активности и уранового оруденения остается неоднозначной.

В Юго-Восточном Забайкалье изотопное датирование в ближайших к Стрельцовской кальдере районах развития субвулканических онгонитов, онгориолитов и Li–F-гранитов указывает на их формирование в интервале 145.7–140.6 млн лет (Перетяжко и др., 2011; Сырицо и др., 2012). Это обстоятельство послужило одной из причин появления гипотезы об общем как для кислых эффузивов Стрельцовской кальдеры, так и для редкометальных гранитов очаге, индуцировавшем также и урановое оруденение (Алешин и др., 2007; Лавров и др., 2012). Однако, хорошо изученные в Забайкалье позднеюрские-раннемеловые лейкограниты и редкометальные Li–F-граниты кукульбейского комплекса, как и их субвулканические аналоги (онгониты), принадлежат к иному геохимическому типу и вмещают иной тип оруденения (Sn, W, Li, Ta, Nb). Характерные различия в составах редких и редкоземельных элементов рассмотрены в наших предыдущих работах (Петров и др., 2017; Андреева и др., 2020). Что касается территории Южного Китая (регион Геджу (Geju) с грейзеновым типом Sn-оруденения), то возраст вмещающих гранитов здесь соответствует 158 млн лет, а возраст оруденения 153.4–152.7 млн лет, что резко отличается от времени формирования уранового оруденения в вулканогенном комплексе Сианшань. В числе рудных минералов присут-

ствуют касситерит, вольфрамит, а также молибденит, шеелит, пирит и другие сульфиды. Предполагается прямая генетическая связь пералюминиевых вмещающих гранитов и редкометального Sn–W-оруденения (Guo et al., 2011; Pirajno, 2013). Поскольку эти геологические события опережают урановую минерализацию в регионе более чем на 30 млн лет, то очевидно, что взаимосвязь между ними отсутствует.

В Восточном Забайкалье поля распространения вулканитов контрастного состава, включая и упомянутые K-риолиты, приурочены к областям повышенного и знакопеременного магнитного поля. Эти поля фиксируют проявления магматизма так называемого “окисленного” или магнетитового типа, к которому относятся экструзивно-эффузивные породы вулканических сооружений и ряд интрузивных массивов. С этими же областями повышенного магнитного поля совпадают цепочки вулканических кальдер, индексирующих протяженные неоднородные зоны земной коры, проницаемые для магмо- и флюидопотоков (фиг. 6).

Эта закономерность хорошо прослеживается, например, при сопоставлении карты-схемы кольцевых вулканических структур латитового магматизма Восточного Забайкалья (Таусон и др., 1984, стр. 304) и карты районирования магнитного поля этого же региона (Лишневский, 1991; Лишневский, Бескин, 1994). Это сопоставление показывает закономерное совпадение размещения большей части вулканических построек, группирующихся в пояса, с областями повышенных или



Фиг. 6. Типы магнитных полей Восточного Забайкалья и распространение поясов кальдерных построек и кольцевых вулкано-купольных сооружений позднемезозойского возраста (по Таусон и др., 1984; Лишневикий, Бескин, 1994 с дополнениями авторов). 1 – зона Монголо-Охотской сутуры; 2 – Ононская ветвь Монголо-Охотской сутуры; 3 – области преимущественно повышенного и варьирующего знакопеременного магнитного поля с преобладающим Mo, Au, U, Pb, Ag, Zn, Cu оруденением; 4 – области преимущественно спокойного пониженного магнитного поля с преобладающим Sn, W, Li, Ta профилем оруденения; 5 – зоны повышенной проницаемости земной коры; 6 – контуры проведенных магнитных съемок; 7 – кальдерные постройки, вулкано-тектонические и кольцевые вулкано-купольные сооружения с U-оруденением; 8 – кальдерные, вулкано-тектонические и кольцевые вулкано-купольные сооружения с Au, Pb, Zn, Mo, Cu, Ag, Fe, флюоритовым оруденением; ураноносные кальдеры и вулкано-тектонические сооружения с крупномасштабным U-оруденением (21 – Стрельцовская и 27 – Дорнотское). Номера и названия остальных кальдер указаны в (Андреева и др., 2020).

варьирующих значений магнитного поля. С этими же областями связаны и интрузивные массивы магнетитового типа (шахтаминский, сретенский, амуджиканский комплекс), а также месторождения и рудопроявления Mo, Cu, U, Au, W, Pb, Ag, Zn с широким спектром сопровождающих их околорудных метасоматитов (Андреева и др., 2020). С областями пониженных значений магнитного поля ассоциируют граниты ильменитовой серии (Li–F-граниты, амазонитовые граниты, онгониты) с редкометальным оруденением.

Можно предположить, что сходное расположение рудоносных вулканогенных построек имеет место и в вулканическом поясе Гань-Хан в Китае, и в районе Йеллоустонской горячей точки, в которой приурочена кальдера МакДермитт.

Изучение изотопного (Nd и Sr) состава пород Стрельцовской кальдеры было предпринято Д.В. Коваленко и соавторами (Коваленко и др.,

2014, 2015) для главных эффузивных разновидностей, включая и последние фазы вулканической активности – риолиты и риолитовые игнимбри-ты. Оно показало, что эти породы характеризуются радиогенными начальными изотопными отношениями стронция $I_{Sr}(T) = 0.713–0.715$, а изотопный состав Nd риолитов в момент их излияния соответствовал $\epsilon Nd(T) = -1$ до -2 . Учитывая общий субщелочной характер риолитов и повышенную щелочность расплавных включений в них (Chabiron et al., 2001), а также Nd и Sr изотопные данные для предшествующих извержениям кислых пород трахибазальтов ($\epsilon Nd(T)$ от -1.5 до $+3.4$, $I_{Sr}(T)$ – от 0.7058 до 0.7065), предполагается, что риолиты могли образоваться при фракционировании трахибазальтовых расплавов. Значения $\epsilon Nd(T)$ этих групп пород (риолитов и трахибазальтов) близки, но величины $I_{Sr}(T)$ значительно различаются. Повышенные величины $I_{Sr}(T)$ риоли-

тов Стрельцовской кальдеры могут быть объяснены высокими отношениями в них $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$. Несмотря на такую интерпретацию, нельзя полностью исключить и коровое происхождение риолитов. Следовательно, можно предполагать, что риолиты Стрельцовской кальдеры являются наиболее поздними кислыми дифференциатами латитовой серии магматитов, но, возможно, отчасти наследуют и составы континентальной коры.

Изотопные (Sr и Nd) характеристики риолитов и риодацитов Сианшаня контрастно отличаются от кислых лав Стрельцовской кальдеры. Изотопный состав Sr валовых проб очень непостоянен: значения начальных изотопных отношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ находятся в интервале от 0.7063 до 0.7108, а $\epsilon\text{Nd}(T)$ соответствуют узкому интервалу отрицательных значений: от -7.3 до -8.3 . Исследователи Сианшаньского рудного поля полагают, что лавы риолитового и риодацитового состава могли являться результатом частичного плавления нижней кристаллической коры, состоящей из среднепротерозойских метаморфических пород, модельный (Hf) возраст которых составляет 1823–1550 млн лет, без существенного добавления магм мантийного происхождения (Jiang et al., 2005; Yang et al., 2010; Bonnetti et al., 2020). Эти процессы привели к генерации высокотемпературных магм А-типа, слагающих обрамление вулканической структуры Сианшань. Следует отметить, что изотопные системы стронция могут быть нарушены из-за интенсивного проявления метасоматических процессов.

ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ПОСТВУЛКАНИЧЕСКОЙ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

Проявления рудно-метасоматических процессов в рудоносных вулканогенных постройках перечисленных регионов имеют очевидные черты сходства. Сравнительный анализ гидротермальной деятельности в связи с урановым оруденением (кальдера Стрельцовская и структура Сианшань) затруднен лишь недостаточностью данных о гидротермальной минерализации кальдеры Мак-Дермитт.

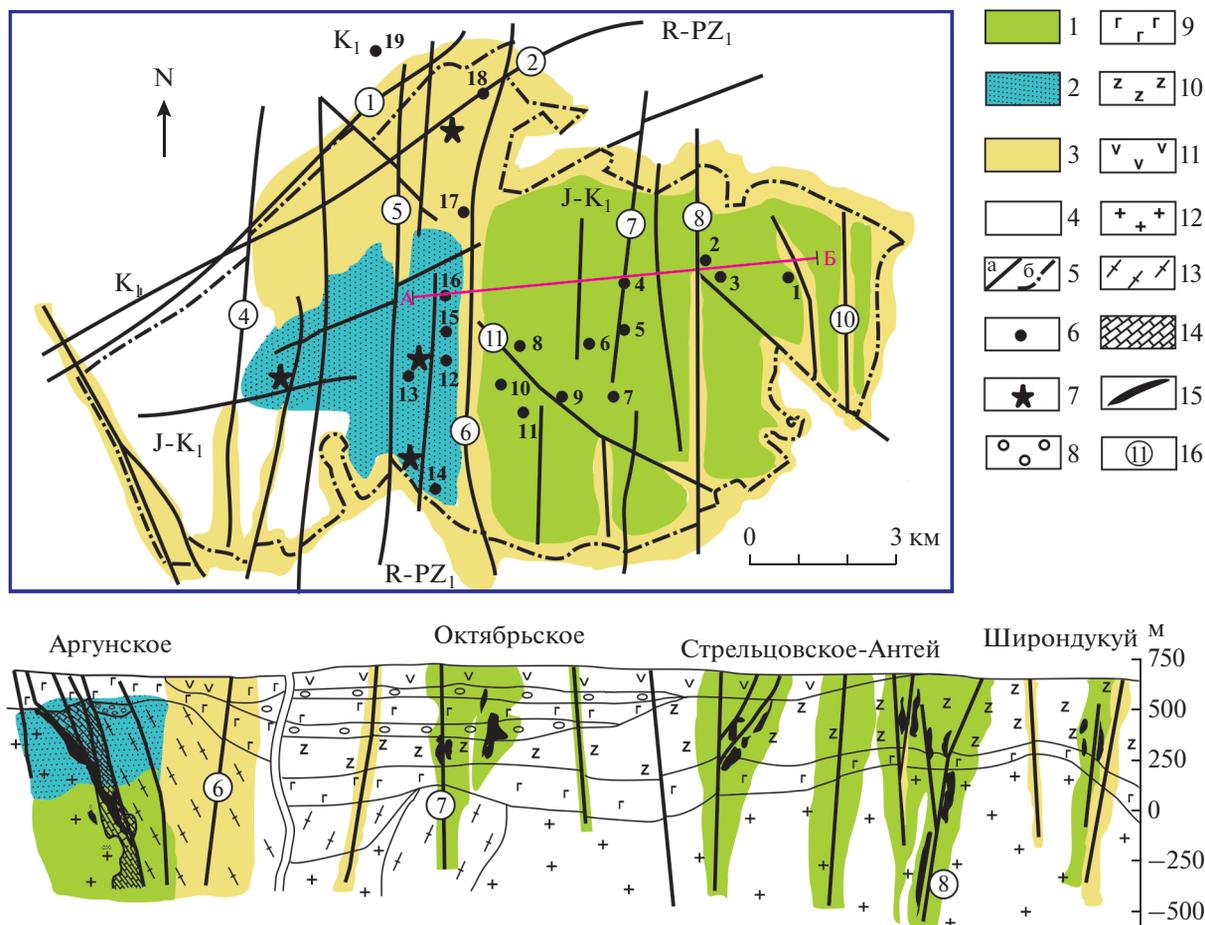
Описание главных типоморфных особенностей развития гидротермально-метасоматических процессов в рудоносных структурах целесообразно начать с краткого обзора этих преобразований в пределах Стрельцовской кальдеры в Восточном Забайкалье. Среди всех известных месторождений урана в континентальных вулканических поясах месторождения Стрельцовского рудного поля являются уникальными по запасам и качеству руд (Машковцев и др., 2010; Geological Classification..., 2018). Во многих других мезозойских вулканогенных постройках Восточного Забайкалья обнаружены только мелкие месторождения и

рудопроявления урана. По мнению большинства исследователей этого региона, концентрации рудной минерализации в Стрельцовской кальдере благоприятствует наличие глубоко проникающих разломов, обогащенность ураном кристаллических пород фундамента и эффузивных пород, чрезвычайно интенсивное проявление вулканизма контрастного состава в виде разных фаций, как эффузивных, так и экструзивных. К одной из выдающихся особенностей Стрельцовской кальдеры относится также необычно широкое развитие почти всего спектра низкотемпературных метасоматитов, известных в рудных месторождениях эндогенного типа (фиг. 7). Мощности измененных пород достигают десятков, иногда – первых сотен метров. Во многих случаях абсолютно свежие неизмененные разности эффузивных пород обнаруживаются с большим трудом.

Для метасоматических процессов Стрельцовской ураноносной кальдеры возможно выделение трех основных эпизодов в развитии постмагматической гидротермальной активности: 1) предрудные метасоматические преобразования (главным образом обширная иллитизация), не содержащие скоплений рудных (урановых) минералов, или сопровождающиеся жилами ранних генераций сульфидов; 2) рудосопровождающие преобразования – альбитизация, карбонатизация, флюоритизация, бертьеринизация (7 \AA химический аналог Fe-хлорита), окварцевание, в этот же эпизод вписываются собственно рудные стадии – браннеритовая и настуран-коффинитовая; 3) пострудные изменения, выраженные в развитии глинистых минералов, карбонатов, адуляра, цеолитов. На фоне этих изменений возможны незначительные выделения позднего коффинита.

Главные каналы поступления гидротерм располагались, по-видимому, в основном во внутренних частях Стрельцовской кальдеры и были связаны с жерлами отдельных вулканов. Участки развития низкотемпературных аргиллизитов более развиты в периферических зонах, проявлялись спорадически при режиме растекания основных флюидопотоков в условиях последовательного центробежного приоткрывания флюидопроводящих структур. Этот тектонодинамический механизм в деталях описан для Дорнотской вулкано-тектонической структуры в Монголии (Мионов и др., 1993).

Согласно многочисленным данным определенных изотопного возраста K–Ar, Rb–Sr, U–Pb методами, временной разрыв между последними проявлениями магматизма (140 млн лет) и U-оруденением (135 млн лет) не превышает 3–5 млн лет (Андреева и др., 1991; Андреева и др., 1996; Чернышев, Голубев, 1996). Однако данные U–Pb датирования, полученные для цирконов из потоков витрофировых риолитов, указывают на более молодой возраст этих лав – до 128 млн лет (Шатков



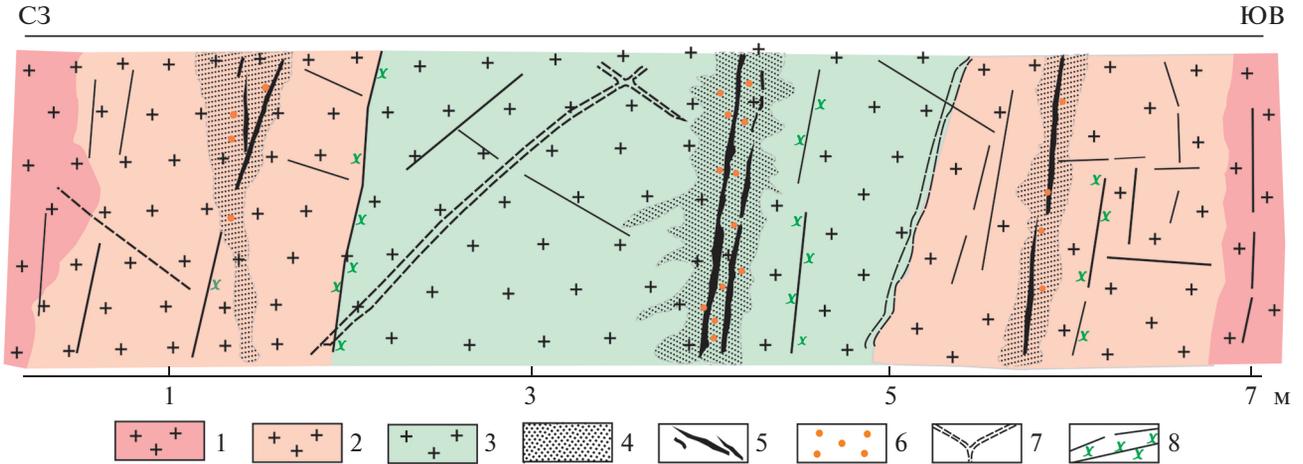
Фиг. 7. Геологическая схема строения Стрельцовской кальдеры и распространение метасоматических преобразований; геологическая основа по Ищуковой и др., 2007. Масштабы карты и разреза не совпадают. 1 – иллитовые метасоматиты; 2 – каолиновые аргиллизиты; 3 – смектиновые и смектит-цеолитовые метасоматиты; 4 – неизменные и слабоизмененные вмещающие породы; 5 – разрывные нарушения: а – крутые и пологие внутрикальдерные, б – кольцевые; 6 – месторождения урана: 1 – Широндукуевское, 2 – Стрельцовское, 3 – Антей, 4 – Октябрьское, 5 – Лучистое, 6 – Мартовское, 7 – Мало-Тулукуевское; 8 – Тулукуевское, 9 – Юбилейное, 10 – Весеннее, 11 – Новогоднее, 12 – Пятилетнее, 13 – Красный Камень, 14 – Юго-Западное, 15 – Жерловое, 16 – Аргунское, 17 – Безречное, 18 – Дальнее, 19 – Полевое; 7 – риолитовые палеовулканы, жерловые фации; 8 – туфогенные и терригенные породы; 9 – базальты и андезиты; 10 – трахидазиты и их игнимбриты; 11 – риолиты и риолитовые игнимбриты; 12 – гранитоиды; 13 – гнейсы, кристаллические сланцы, амфиболиты; 14 – мраморы; 15 – рудные тела; 16 – номера разломов.

и др., 2010). Возможно, процессы уранового минералообразования частично совпадали с самыми последними вспышками эффузивного магматизма. Дискуссии, посвященные вопросам стадильности процессов рудообразования на месторождениях Стрельцовского рудного поля, подробно отражены в серии работ (Ищукова и др., 2007; Наумов, 1998; Алешин и др., 2007; Лаверов и др., 2012).

Самый распространенный тип предрудных изменений в Стрельцовской кальдере представлен кварц-карбонат-иллитовым, который наиболее характерен для крупнейших месторождений восточной части кальдеры (иллит в данном случае обозначает собирательное название для смешаннослойных иллит-смектитов, содержащих не бо-

лее 40% разбухающих межслоев). Кварц-каолиновые (иногда с карбонатами) аргиллизиты, распространены в основном в центральной и западной части кальдеры. В ее северном секторе развиты преимущественно смектиновые и цеолит-смектиновые метасоматиты (аргиллизиты).

Для большинства месторождений Стрельцовского рудного поля характерно развитие обширных и протяженных (до первых километров) ореолов иллитовых изменений вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород. Главным типоморфным минералом метасоматитов являются смешаннослойные иллит-смектиты преимущественно с незначительным (до 15%) содержанием разбухающих межслоев, которые характерны для



Фиг. 8. Гидротермальные преобразования и оруденение в гранитах месторождения Антей. Документация стенки горной выработки, горизонт 114 м. 1 – слабоизмененные биотитовые граниты; 2 – умеренно измененные граниты состава кварц + микроклин + иллит + анкерит + реликты плагиоклаза; 3 – интенсивно измененные граниты состава кварц + иллит ± анкерит, сидерит ± микроклин; 4 – альбитизированные граниты; 5 – урановые руды; 6 – гематитизация вдоль прожилков урановых минералов; 7 – прожилки криптокварца; 8 – разрывные нарушения, часть которых сопровождается бертьерином.

месторождений в восточной части кальдеры. Одна из отличительных особенностей метасоматитов – почти полное отсутствие в их составе пирита, а Fe связано в карбонатах, анкерите или сидерите. Их количество в измененных основных эффузивах может возрастать до 40–45%. Подробные исследования иллитов (Андреева, Головин, 1998; Dorzhieva et al., 2018) показали, что на глубинах более 1800 м они содержат менее 5% разбухающих слоев, приближаясь к составам серицит-фенгитов. В верхних частях Антей-Стрельцовского месторождения содержания смектитовых межслоев может возрасти до 45%. Упорядоченность переслаивания сохраняется высокой или имеет тенденцию к высокой. Распределение ν и σ структурных типов и политипных модификаций иллитов по вертикали в месторождении Антей показывает постепенное возрастание упорядоченности их структур с глубиной. Для Аргунского месторождения в западной части кальдеры характерны менее упорядоченные и более разбухающие иллит-смектиты (Петров и др., 2014).

Рудосопровождающие (syn-ore) прожилково-метасоматические изменения на месторождениях Стрельцовской кальдеры проявлены очень интенсивно. Наиболее распространены альбитовые и хлорит-бертьериновые, но также наблюдаются карбонатные, флюоритовые, они всегда пространственно сопряжены с рудными телами. Мощность их, как правило, не превышает 1 м, но в случаях сближенных зон может достигать нескольких метров, редко до десятков метров. Наиболее тесно связаны с рудными телами альбитовые метасоматиты, которые особенно широко развиты в измененных гранитах, трахидацитах, менее – в

базальтах и практически исчезают в осадочно-туфогенных породах. Содержание Na_2O может достигать 10% (в измененных гранитах). Легче всего тонкозернистые агрегаты плохо сдвойникового альбита развиваются по калиевым полевым шпатам. Почти всегда альбиту сопутствуют мельчайшие выделения титанатов урана, отмечаются также апатит, циркон. Совместно с альбитом присутствуют в разных количествах кварц и анкерит, гематит. На уровнях ниже 1800 м от современной поверхности альбитовые метасоматиты не встречаются. На фиг. 8 приведен пример взаимоотношений рудосопровождающих метасоматитов с иллитизированными гранитами и урановым оруденением.

Этот процесс не всегда развит на месторождениях Стрельцовской кальдеры и не является неизменным спутником урановой минерализации. Например, альбититы практически отсутствуют на всех месторождениях западной части кальдеры, включая и крупное Аргунское месторождение, очень слабо проявлены даже и на некоторых месторождениях ее восточной части. Исследования распределения урана в альбититах методом осколковой радиографии и микрозонда показали, что в них присутствуют рассеянные выделения браннерита, а также апатит, циркон, ксенотим, монацит. Мощность единичных зон около 1–1.5 м. Браннерит может развиваться и вне зон альбитизации, замещая при этом акцессорные сфен и рутил. Во многих случаях альбитизация сопровождается растворением кварца, образованием пустот на его месте, которые могут быть заполнены минералами самых поздних стадий – диккитом, кальцитом, смектитом, гребенчатым

кварцем. Это явно низкотемпературный процесс, поэтому применение к нему термина “эписиенитизация” мы полагаем неудачным.

Бертьериновые метасоматиты и прожилковые образования распространены повсеместно во всех типах пород, но на глубине около 1900 м бертьерин исчезает, сменяясь изохимическим ему 14\AA Fe-хлоритом. Этот минерал отличается от 7\AA -разностей только несколько большим содержанием Al^{IV} и более симметричным распределением Al по тетраэдрическим и октаэдрическим позициям. Mg- и Fe–Mg-бертьерины и хлориты для рудосопровождающих метасоматитов не характерны.

На всех месторождениях Стрельцовой кальдеры распространены пострудные аргиллизиты, приуроченные к участкам катаклаза и трещиноватости (по-видимому, это аналог стадии “post-ore” для Сианшаньского рудного поля). Для них характерно секущее положение по отношению к рудным телам. Мощность аргиллизитов не превышает первых метров, а на глубину они прослежены до 1 км. В их состав входят смектиты (в основном высокозарядные бейделлитового типа), каолинит, диккит и Li-тосудит. Последний является причиной появления Li-аномалий, особенно в фундаменте кальдеры на месторождении Аргунское, где содержание Li_2O в аргиллизитах достигает 1 мас. %. В этой связи интересны данные о развитии Li-содержащих иллитовых глин в осадках озер внутри кальдеры МакДермитт (Henry et al., 2017; Castor, Henrey, 2020). Авторы предполагают, что источником лития могли быть исходные породы, слагающие стенки и дно кальдеры, которые могли содержать первичные литиевые минералы или обогащенное литием вулканическое стекло. При этом носителем Li в туфогенных осадках, по-видимому, является не гекторит, но редкий литийсодержащий слюдястый минерал иллитового типа – тайниолит. Возможность существования этого минерала имеет совершенно определенный минералогический интерес, и мы можем надеяться на продолжение исследований литиевой минерализации в этой рудоносной кальдере.

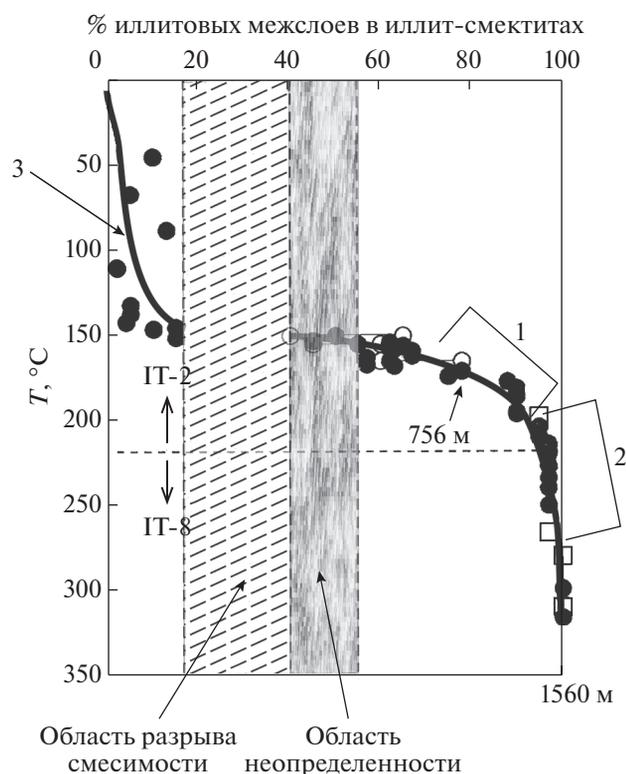
Температурные условия протекания рудно-метасоматических процессов в Стрельцовой кальдере неоднородны, и ближе к периферическим кольцевым разломам наблюдается некоторое снижение интенсивности гидротермальных процессов, а характер их меняется на низкотемпературный. Здесь расположено пластообразное месторождение Дальнее (Андреева и др., 2010). Судя по литературным источникам, такого рода месторождения не отмечены в Сианшаньском рудном поле. Минеральные ассоциации вулканогенно-осадочных вмещающих пород месторождения Дальнее характеризуются широким распространением смектита, цеолитов (клиноптилолита, морденита), неупорядоченных смешаннослойных иллит-

смектитов, каолинита, селадонита, флюорита. В составе урановых руд присутствует коффинит и настуран и не характерный для других месторождений кальдеры самородный мышьяк. Эти минеральные ассоциации свидетельствуют о малоглубинном образовании месторождения Дальнее и более мелких рудопроявлений в этой части кальдеры в условиях небольших давлений (не более 100 атм), невысоких температур (около 150°C) и при воздействии субнейтральных вод, что благоприятствует широкому распространению перечисленных минералов. Кроме того, здесь устанавливался восстановительный режим, обусловленный присутствием углефицированных остатков растений в прослоях туфогенных песчаников, что способствовало отложению самородного мышьяка.

Широкое распространение парагенезисов с участием смешаннослойных иллит-смектитов (“гидрослюд”) и иллита позволяет использовать их для определения температур минералообразования в сочетании с данными экспериментальных исследований и прямых наблюдений в высокотемпературных скважинах в областях активного вулканизма. Эти данные, а также обилие бертьерина (хлоритоподобного минерала с 7\AA структурой), указывают на температурный интервал образования метасоматитов $120\text{--}250^\circ\text{C}$ при невысоких давлениях (не более 500 бар).

В качестве иллюстраций применения этих природных геотермометров можно привести закономерности, установленные по наблюдениям в высокотемпературных скважинах (Inoue et al., 2004). Авторами подчеркивается важное для термометрии значение определения структурной упорядоченности и содержаний разбухающих межслоев в иллит-смектитах, замещающих вулканическое стекло и минералы в составе туфов и игнимбритов (фиг. 9). Эти данные целесообразно применить к изучению мезозойских вулканогенных кальдер как аналогов современных вулканических построек.

На месторождениях Сианшаньского рудного поля выделяют (Dalhkamp, 2009; Pirajno, 2013; Yao et al., 2013; Li et al., 2016; Yu et al., 2019; Bonetti et al., 2020) две (иногда три) основные рудно-метасоматические стадии: 1) дорудная (pre-ore) стадия, она особенно развита в северной и восточной частях кальдеры и представлена альбитизацией и подчиненной околотрещинной иллитизацией (гидромусковитизацией в китайской литературе). Согласно (Bonnetti et al., 2020), альбитизация развивалась при относительно повышенных ($>250^\circ\text{C}$) температурах, которые оценивались по косвенным данным (данные по флюидному включением отсутствуют). С этой стадией ассоциирует браннеритовая минерализация при подчиненном значении настурана; 2) синрудная стадия характеризуется широко проявленной иллитизацией, а также



Фиг. 9. Вариации процентных содержаний иллита в смешаннослойных иллит-сметкитах как функция температуры в скважинах активных современных геотермальных систем (по Inoue et al., 2004). Возможные температурные условия формирования и состав иллитов: 1 — в верхней части месторождения Антей и Стрельцовское, 2 — в нижней части месторождения Антей, 3 — в месторождении Дальнее.

хлоритизацией, флюоритизацией и гематитизацией, которые отчетливо контролируются разрывными нарушениями. С ними связано основное оруденение, представленное, главным образом, настурном с редким ураноторитом; 3) пострудная стадия, по данным разных авторов, представлена околотрещинной карбонатизацией, флюоритизацией, окварцеванием и развитием глинистых (сметтит, каолинит) минералов.

По данным (Bonnetti et al., 2020), урановые руды Сианшаня (особенно ранняя браннеритовая стадия) характеризуются ярким проявлением $\text{Th-U-Mo-P-REE-Y-Ti-Zr}$ геохимического спектра, что привело к широкому распространению торийсодержащих минералов (ураноторита, торианита, торийсодержащего браннерита). При этом содержание тория в руде может достигать 1900 ppm. Однако в работах других исследователей рудного поля (Dalhkamp, 2009; Pirajno, 2013; Yao et al., 2013; Li et al., 2016; Yu et al., 2019; Guo et al., 2020) эти данные не подтверждаются. Образование этой ранней альбит-браннеритовой ассоциации К. Бонетти связывает с присутствием на глуби-

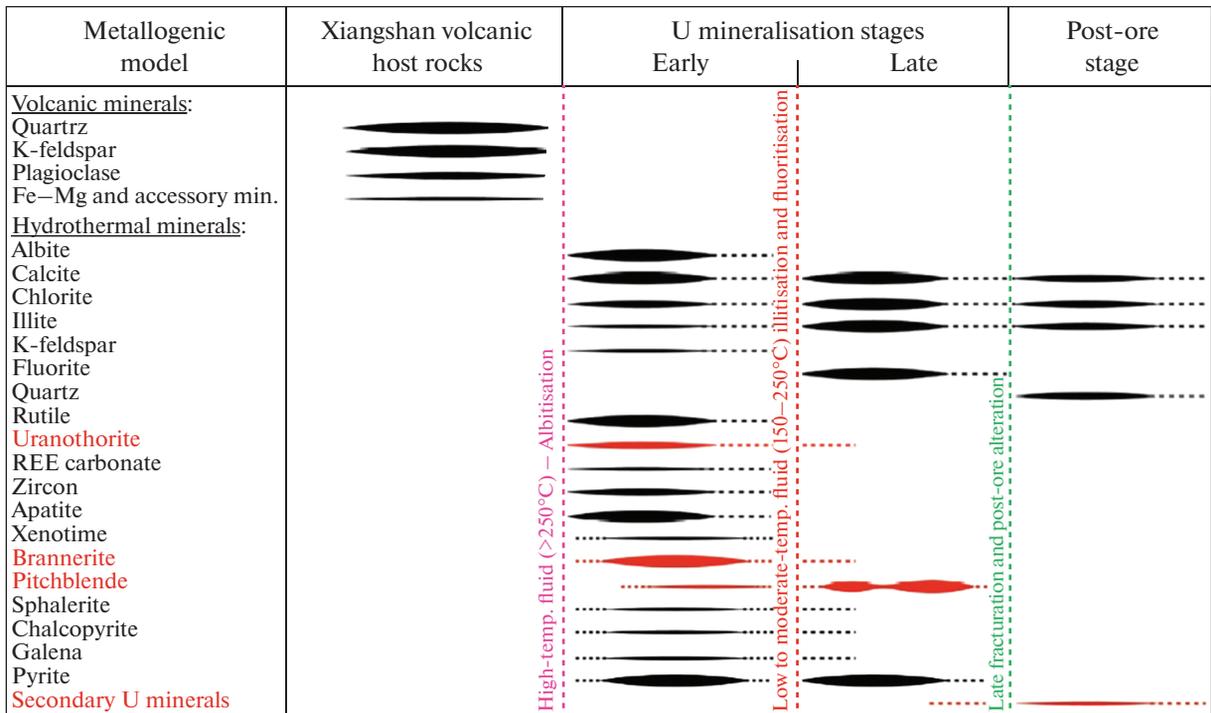
не под кальдерой массива субщелочных калиевых гранитов, с их фракционированием и индуцированием рудоносных гидротерм (последнее утверждение, в свете имеющихся многочисленных экспериментальных данных по коэффициентам распределения расплав-флюид, представляется сомнительным).

Большинство имеющихся данных изотопного датирования в Сианшаньском рудном поле указывает на существенные интервалы между временем окончания вулканической деятельности (около 135 млн лет) и первой рудной стадией (125–110 млн лет), а также между первой настурной стадией и второй основной (100–80 млн лет), которая значительно отделена от первой. Все данные подтверждены большим количеством изотопных исследований урановых минералов, сульфидов, калиевых слюд.

В вулканогенных (volcanic-related) месторождениях Сианшаньского рудного поля, по данным его исследователей, мощности приуроченных к трещинным зонам метасоматических ореолов не превышают 1 метра, хотя есть указания и на примеры (Guo et al., 2020) более мощных, до первых сотен метров, проявлений иллитового метасоматоза.

Очень интересен вопрос, связанный с положением альбитовых метасоматитов в общей схеме развития гидротермального процесса. Они присутствуют в обоих рудных полях — и в Восточном Забайкалье, и в Южном Китае. По данным многих авторов (Dalhkamp, 2009; Pirajno, 2013; Bonnetti et al., 2020; Guo et al., 2020 и др.), в Сианшане околотрещинный альбитовый метасоматоз представлен в самой первой рудно-метасоматической стадии (фиг. 10), которая удалена по времени от завершения эффузивной деятельности более чем на 10 млн лет.

Мощность зон альбитизации не превышает нескольких десятков сантиметров, количество Na_2O в измененных породах достигает 7.5%, появляются участки выщелачивания кварца. В связи с альбитизацией распространена преимущественно вкрапленная браннеритовая и в меньшей степени настурная и ураноторитовая минерализация. Только спустя 15–20 млн лет развивается вторая основная урановорудная стадия и сопровождающие ее (syn-ore) иллитовые околорудные метасоматиты. Хотя в работах по Сианшаньскому рудному полю и приводится документация открытых и подземных горных выработок (Bonnetti et al., 2020; Guo et al., 2020), четкие доказательства более раннего проявления альбитизации отсутствуют. На месторождениях Стрельцовского рудного поля альбитовые метасоматиты всегда тесно пространственно связаны с рудными телами и появились позже иллитовых (гидрослудистых) изменений, что подтверждается и взаимными пересечениями



Фиг. 10. Принципиальная схема развития гидротермального рудообразования на месторождениях Сианшаньского рудного поля (Bonnetti et al., 2020).

этих зон, взаимоотношениями альбита и слюды, прекрасно наблюдаемыми в шлифах. Документации горных выработок, приводимые К. Бонетти (Bonnetti et al., 2020), на которых показаны узкие зоны альбитизации внутри ореолов иллитизации, обнаруживают практическое сходство этих процессов с проявлениями альбитизации в Стрельцовском рудном поле.

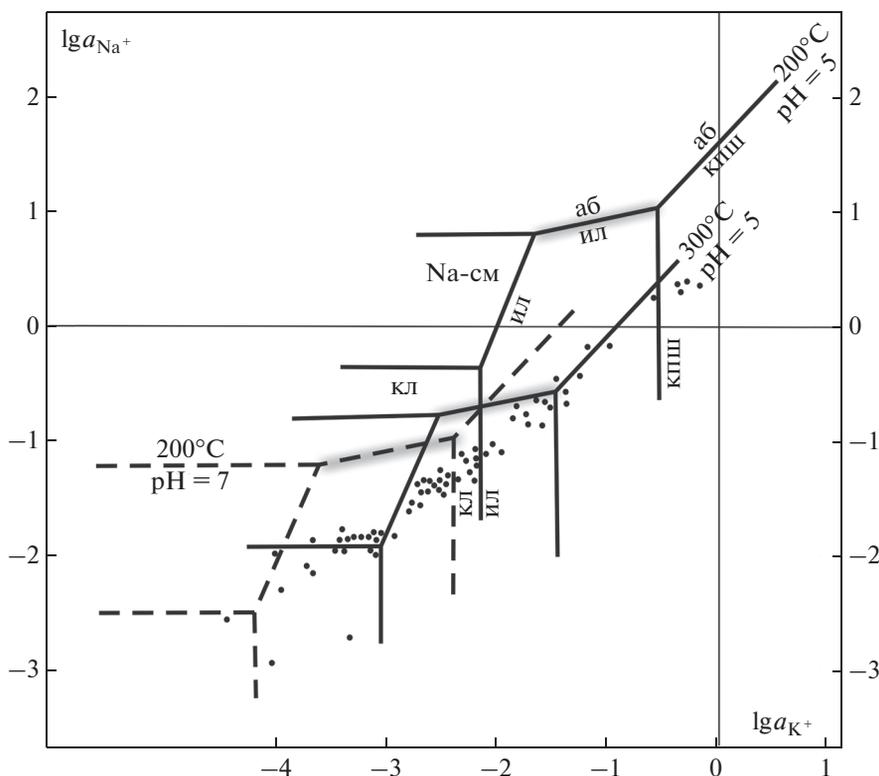
Природа появления зон альбитизации и положение их в общей для вулканогенных месторождений схеме рудообразования не вполне ясна и может быть предметом особого рассмотрения. Альбит развивается метасоматически, замещая калиевый полевой шпат или иллит (и серицит). Эти реакции изучены экспериментально, подтверждены расчетными и природными наблюдениями (Hemley et al., 1964; Покровский, 1982; Зарайский, 1989 и др.). Константы равновесия этих реакций (особенно в случае замещения иллита альбитом) резко возрастают с падением температуры, и образование альбита в низкотемпературной (<300°C) области весьма затруднено. Эти взаимоотношения отражены на полуколичественной расчетной диаграмме (фиг. 11), где показаны положения реакций в системе $K_2O-Na_2O-SiO_2-Al_2O_3-H_2O$ и точками вынесены (по литературным источникам) реальные составы вод в отношении K и Na в современных термопроявлениях и в составе ГЖВ жильных минералов.

Температуры формирования альбититов в месторождениях Антей и Стрельцовское не превы-

шают 200–220°C (неопубликованные фондовые материалы И.В. Мельникова¹; Ищукова и др., 2007). Следовательно, для отложения альбита требуется одновременно значительное, до двух порядков, превышение натрия над калием и повышение щелочности до значений pH около 8–9. Последнее вполне возможно при резком сбросе давления в результате (сейсмо)тектонических подвижек, приоткрывания трещин и общей дилатансии пород. Действительно, зоны альбитизации в месторождениях Стрельцовой кальдеры отчетливо тяготеют к участкам повышенной нарушенности, как таклаза и брекчирования пород. Возможность резкого (до 2 единиц) скачка величин pH обусловлена интенсивной дегазацией растворов и удалением CO_2 и других газов при резком сбросе давления (Browne, Ellis, 1970; Наумов, 1998 и др.). Заметим, что натриевый смектит условно помещен нами в поле парагонита, поскольку этот минерал в предлагаемых температурных условиях не образуется (Iiyama, 1964; Зарайский, 2007; и др.).

Очевидно, что подобного рода процессы минералообразования альбита с преобладанием таклаза и выполнения трещин возможны только в обстановке упруго-хрупкого разрушения (Петров и др., 2014). Действительно, в Стрельцовой кальдере на больших (около 3 км) глубинах,

¹ Мельников И.В. Неопубликованные данные. Фонды ИГЕМ РАН, Москва.



Фиг. 11. Основные взаимоотношения в системе $K_2O-Na_2O-SiO_2-Al_2O_3-H_2O$ с избытком кварца в зависимости от рН, активностей калия, натрия и температуры (Андреева, Головин., 1998). Точки – составы природных термальных вод и газовой-жидких включений по литературным данным; кл – каолинит, ил – иллит (или серицит), аб – альбит, кпш – калиевый полевой шпат, Na-см – натриевый смектит. Равновесие “альбит-иллит” выделено серым ореолом.

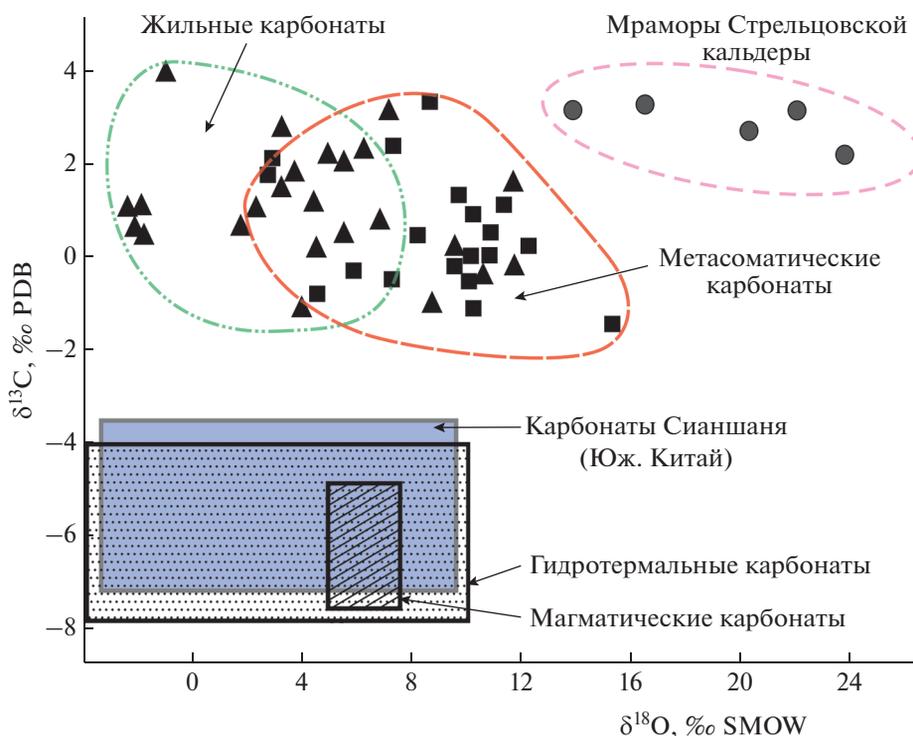
вскрытых скважинами, крупные зоны дробления и рудосопровождающая альбитизация, как и кондиционные урановые руды, не обнаружены. Резкое возрастание содержания натрия, скорее всего, связано с массовым высвобождением его при процессах предшествующей интенсивной иллитизации, которой в первую очередь подвержены плагиоклазы. Следовательно, процесс гидротермальной альбитизации может быть спровоцирован резким скачком значений рН без дополнительного привноса магматогенного натрия в результате приоткрывания трещин при температурах не ниже 190–200°C. При более низких температурах альбит замещается анальцитом или другими натровыми цеолитами (см., например, Matthews, 1980).

Исследования изотопных составов кислорода и углерода в метасоматических и жильных карбонатах указывают на значительную обогащенность их тяжелым углеродом, что приближает их по изотопному составу к осадочно-метаморфическим карбонатам (фиг. 12).

Близкие к нулевым значения $\delta^{13}C_{PDB}$ для карбонатов месторождений Стрельцовского рудного поля отмечались и у других авторов (Ищукова и др., 2007). Изотопный состав кислорода для жильных карбонатов в общем соответствует водам гидро-

термального происхождения. Однако для метасоматических карбонатов он близок к составу кислорода гранитов, что, возможно, связано с кислородным сдвигом, обменом с минералами вмещающих гранитоидов. По нашим данным, кварц гранитов обнаруживает вариации $\delta^{18}O$ ‰ от +7 до +9. Более низкие значения $\delta^{18}O$ ‰ кислорода жильных карбонатов, вероятно, объясняются напряженным тектоническим и гидродинамическим режимом жильного минералообразования, когда гидротермальные флюиды не успевали прийти в равновесие с вмещающими породами. Эта закономерность подтверждается и данными о распределении изотопов углерода и кислорода по глубине (фиг. 13).

Жильные образования, как правило, сосредоточены на верхних горизонтах разреза, где, как видно из приведенной иллюстрации для верхних частей Антей-Стрельцовского месторождения, распределение изотопов кислорода и углерода довольно хаотично. Тот же эффект наблюдается и для Аргунского месторождения, которое локализовано в области чрезвычайно интенсивной тектонической нарушенности пород вблизи крупного Меридионального разлома. Наряду с этим метасоматические карбонаты обнаруживают с глубиной тенденцию к возрастанию значений $\delta^{18}O$ ‰ и, со-



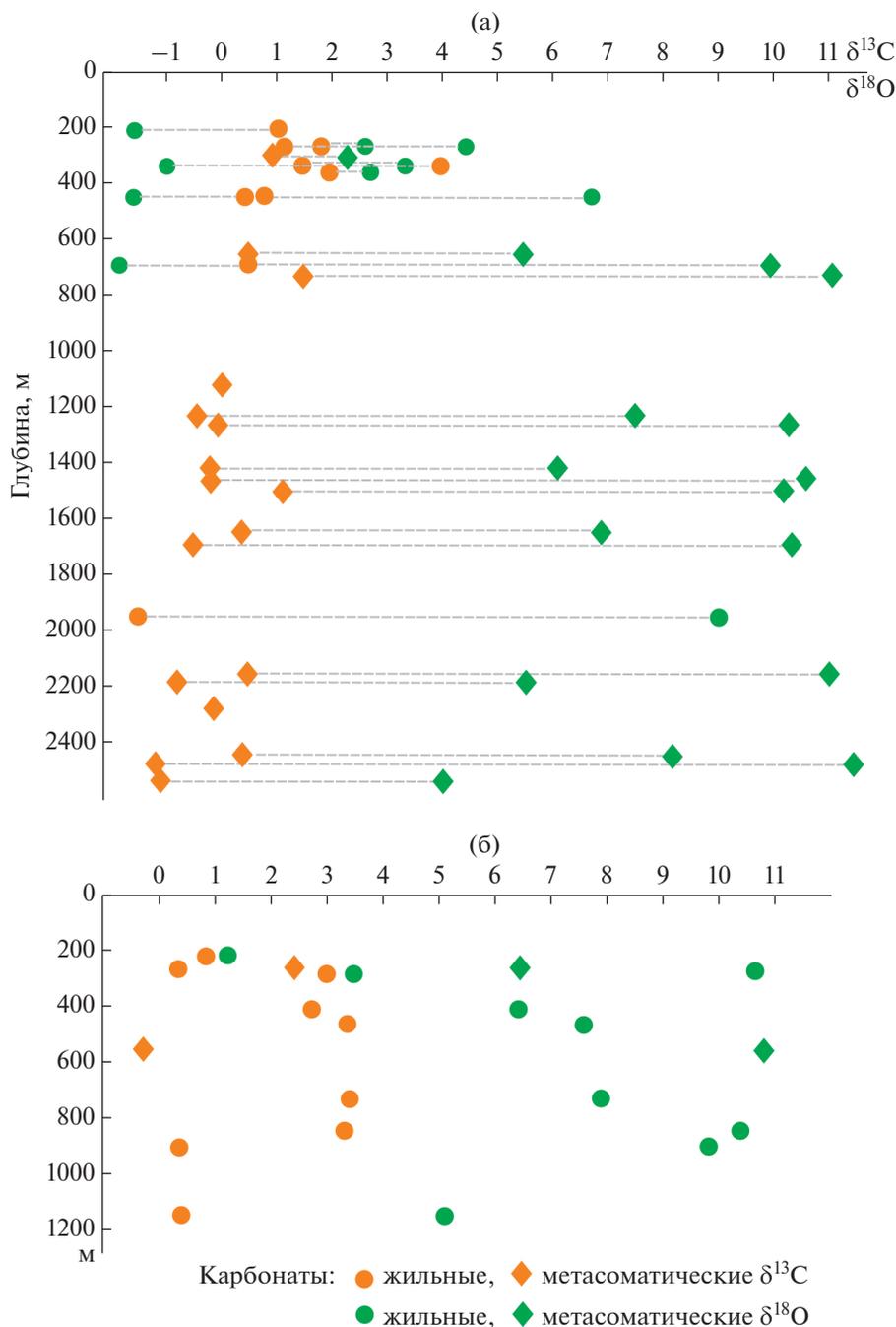
Фиг. 12. Соотношения изотопов углерода и кислорода в жильных и метасоматических карбонатах урановых месторождений Стрельцовского и Сианшаньского (по Hu et al., 2008) рудных полей. Треугольники – жильные карбонаты, квадраты – метасоматические, кружки – мраморы. Данные для магматических и гидротермальных карбонатов указаны по (Покровский, 2000).

ответственно, к уравниванию их с минералами вмещающих гранитов, а также, одновременно, некоторое смещение значений $\delta^{13}\text{C}$ ‰ в нулевую или слабоотрицательную область. Последнее гипотетически может быть обусловлено примесью магматического углерода на больших глубинах. Поэтому внутри Стрельцовской кальдеры можно предполагать ведущее значение в процессах минералообразования углерода осадочного происхождения с возможной примесью магматической компоненты. Наряду с этим восстановителями урана могут быть не только углефицированные прослои туфогенных пород, но и газоидные восстановители эндогенного происхождения, как это установлено нами в крутопадающих рудовмещающих разломах на месторождении Тулукуевское (Petrov et al., 2008).

Совершенно иные характеристики для изотопов углерода из рудосопровождающих кальцитов получены (Hu et al., 2008; Yu et al., 2019) для месторождений Сианшаньской структуры. Все они отвечают интервалу от -3.5 до -5.9 , что соответствует мантийному их источнику, а эманиацию CO_2 большинство авторов связывают с обстановкой растяжения этой территории, сопровождающейся внедрением мафических даек. В отличие от Стрельцовской кальдеры, в Сианшаньском рудном поле отсутствуют карбонатные породы как в составе

комплекса раннемеловых эффузивов, так и в протерозойском кристаллическом фундаменте. Этот феномен столь резкого различия изотопных составов углерода для двух рудоносных вулкано-генных структур и возможное влияние источника углерода на масштабы уранового рудоотложения, несомненно, требует дальнейшего изучения.

Для урановых месторождений и рудопроявлений Восточного Забайкалья и Гань-Ханского металлогенического пояса Южного Китая характерно отсутствие метасоматических ореолов высококислотного типа (advanced argillic alterations) – вторичных кварцитов и аргиллизитов с алунином, пирофиллитом, диаспором, андалузитом, ангидритом и другими кислотофильными минералами, а также с характерным набором рудных минералов в группе сульфидов – энаргитом, люционитом, фаматинитом и др. Судя по имеющимся данным, в кальдере МакДермитт присутствуют адулярсодержащие минеральные ассоциации (месторождение урана Мунлайт), что также свидетельствует об отсутствии там кислотных метасоматитов. Парагенезисы, характеризующие кислотно-серную среду минералообразования при высокой активности серы и кислорода (Sillitoe, Hedenquist, 2003; Sillitoe, 2010; Hedenquist, Taran, 2013 и др.), широко распространены в пределах современного и молодого кайнозойского вулканизма Тихо-



Фиг. 13. Распределение изотопных составов жильных и метасоматических карбонатов по глубине в месторождениях Антей-Стрельцовское (а) и Аргунское (б). Тонкие пунктирные линии объединяют анализированные образцы.

океанского кольца в областях с тонкой сиалической корой и преобладающей ролью базитовых магм. Предполагается, что высокая фугитивность кислорода в магматических системах этих областей связана с затягиванием океанической коры, насыщенной кислородом и водой, под зоны субдукции (Ballhaus, 1993; Рябчиков, 1997), а обогащенность серой – с преобладанием основного магматизма (Русинов, 2001). Гидротермальные

месторождения урана для этих областей не характерны.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сравнительный анализ трех урановорудных полей, связанных с вулканогенными постройками, требует рассмотрения по крайней мере трех основных аспектов: 1) проблем источников урана, механизмов его переноса и осаждения, 2) геотек-

тонического положения и геодинамических условий формирования ураноносных структур, 3) взаимосвязей рудоотложения с определенным типом магматизма и метасоматизма.

До настоящего времени вопросы об источниках, механизме переноса и отложения урана, генетической взаимосвязи рудообразования с процессами магмообразования или об экстракции урана из консолидированных пород во многом остаются дискуссионными.

Например, для Стрельцовской кальдеры длительное время обсуждаются три основные гипотезы для источников урана: 1) мантийный, 2) магматические источники в виде U(IV) и 3) инфильтрационные.

Относительно мантийного источника урана предполагается, что он локализован в горизонтах неистощенной средней и глубинной мантии, в которые проникают глубинные постгранитные разломы (Летников, 2006). Эти структуры являются проводниками высокотемпературных флюидов, инициирующих формирование предполагаемых на глубине малых тел рудоносных Li–F-лейкогранитов (Алешин и др., 2007) и привнос компонентов “гранитоидного ряда”, включая уран. Перенос урана осуществляется этими автономными мантийными флюидами, не зависящими от петрохимических и геохимических свойств вмещающих пород. Форма переноса урана в случае мантийного источника не обсуждается. Гипотеза мантийного происхождения урана в Монголо-Забайкальской провинции, по аналогии с урановыми месторождениями Средней Азии, рассматривалась ранее специалистами ИГЕМ РАН (Модель..., 1990). В этой работе основным фактором концентрирования урана в мезозое в вулканических структурах Восточного Забайкалья и Монголии считается гранитоидный магматизм.

Гипотеза о магматических источниках урана в виде U(IV) может быть разделена на два направления в части условий и форм его переноса. Первое направление определяет, что в системе уран-содержащий расплав–флюид уран всегда распределяется в пользу расплава, и концентрация урана в 100–500 раз выше в расплаве относительно равновесного с ним флюида. При этом установлено, что концентрация урана во флюиде, равновесном с лейкогранитным расплавом, составляет всего 10^{-5} – 10^{-4} мас. %, что недостаточно для формирования крупных, а тем более уникальных по запасам месторождений. Однако сериями экспериментальных работ разных авторов показано, что в высокотемпературных (500°C и выше) и в восстановительных условиях при высоких содержаниях HF значимый перенос урана магматогенными флюидами возможен (Жариков и др., 1987; Редькин и др., 1988; Коваленко и др., 2012; Keppler, Wyllie, 1990; Peyffert et al., 1995). Основ-

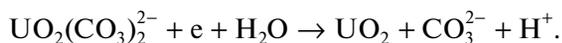
ным условием фракционирования урана в расплав является высокое содержание в нем фтора, не менее 0.5–1.0 m (хлор менее благоприятен), и температуры около 500°C . Только тогда уран может переноситься в концентрации до $n \times 10^{-2}$ моль/л. Определены возможные формы переноса урана в виде оксифторидных комплексов. Все полученные данные относятся к высокотемпературным условиям. Осаждение урана происходит при охлаждении системы.

Согласно второму направлению, экстракция металлов осуществляется высокоплотными солевыми галогенидными фазами. Экспериментальные работы указывают на эффективное и избирательное концентрирование ряда металлов (W, Sn, Mo, Pb, Zn, Nb, Ta) в плотных солевых фазах, отделяющихся от гранитоидных расплавов, богатых F и Cl при 880 – 900°C (Редькин, Величкин, 2013; Маракушев, 1988; Чевычелов, 1992; Маракушев, Шаповалов, 1994; Шаповалов, 2001). В природных условиях застывший кальциево-фторидно-алюмосиликатный расплав обнаружен в онгонитах и гранитах массива Ары-Булак в Восточном Забайкалье (Перетяжко и др., 2007; Перетяжко, Савина, 2010). Вместе с тем, имеются экспериментальные данные, указывающие на существенное влияние фторидов в магматических условиях на растворимость уранинита, особенно в области флюидной несмесимости. Вопрос о причинах мобилизации и формах нахождения урана в высокотемпературных системах с участием фторидных флюидов в настоящее время изучается (Редькин и др., 2021). Однако возможности переноса рудных компонентов к местам их концентрации не обсуждаются, хотя очевидным является гораздо более низкотемпературный фон уранового рудообразования, чем эксперименты при высоких *PT*-параметрах высокотемпературной ликвации.

В рамках гипотезы инфильтрационных источников урана в гидротермальных и гидрогенных месторождениях в качестве источников рассматриваются вмещающие породы, содержащие его кларковые концентрации. Экспериментальными работами (Рафальский, Осипов, 1967; Шмариович и др., 1984) показана возможность выщелачивания урана окислительными растворами из пород разного состава при разных температурах. При этом формируются растворы с концентрацией до $n \times 10^{-3}$ моль/л, которые можно рассматривать как рудоносные. Эта модель хорошо объясняет формирование гидрогенных месторождений.

Для гидротермальных месторождений вулканогенного типа выделяются ближние и удаленные источники урана. Ближние источники – породы, вмещающие рудные жилы (Наумов, 1978; Модников, Сычев, 1984; Шатков, Бутаков, 2013). Удаленные источники – экстракция урана растворами, как ювенильными, так и метеорными,

по пути их следования к области рудоотложения (Наумов, 1990; Наумов и др., 2012; Модников, Сычев, 1984). Предполагается, что перенос урана осуществляется в основном в виде различных уранилкарбонатных комплексов, а осаждение уранинита происходит по схеме



Приведенный краткий анализ показывает большое разнообразие и нередко взаимодополняемость подходов к определению источников урана. Наряду с этим для предложенных альтернатив сохраняется неопределенность в вопросах условий переноса и отложения урана. Эта проблема имеет длительную историю, но главная сложность в ее решении состоит в невозможности, с одной стороны, переноса урана в виде U^{IV} (или его комплексов) в условиях невысоких ($<500^\circ\text{C}$) температур, а с другой стороны – неустойчивости комплексов шестивалентного урана при повышенных ($>250^\circ\text{C}$) температурах. В последнем случае неизбежно возникает проблема восстановителей урана и механизма формирования рудных тел.

Исследования последних лет (Timofeev et al., 2018; Migdisov et al., 2018) показали возможность переноса четырехвалентного урана в виде галогенных комплексов в относительно низкотемпературных условиях ($250\text{--}350^\circ\text{C}$), но только в растворах с высокой концентрацией хлоридов (или фторидов) и с очень низкими значениями pH, что нереально для рассматриваемого типа месторождений. Кроме того, существование фторидных комплексов шестивалентного урана (Guo et al., 2020), как главных агентов переноса в условиях невысоких температур, также возможно лишь в очень кислой среде, что не согласуется с характером минеральных ассоциаций, наблюдаемых на этих месторождениях.

Крупнейшие по классификации МАГАТЭ (Geological Classification..., 2018) промышленные урановорудные объекты в вулканогенных структурах (Стрельцовская в Восточном Забайкалье, Сианшань в Южном Китае и МакДермитт на западе США) отчетливо тяготеют к областям проявления контрастного (бимодального) вулканизма и повышенной флюидно-магматической проницаемости коры. Поскольку источники магматических масс (согласно имеющимся изотопным данным) сосредоточены, скорее всего, в мантии и нижних горизонтах коры, то эти массы могли служить и источниками рудного вещества. Однако для ураноносной Стрельцовской кальдеры возможен альтернативный вариант (Пэк и др., 2020), который предполагает поступление урана из нескольких источников его ближней мобилизации при условии реализации механизма свободной тепловой конвекции флюидов в остаточном тепловом

поле корового магматического очага. Проведенный анализ позволил обосновать представление о преемственных формах переноса урана магматическим расплавом и рудообразующим флюидом в минеральную систему Стрельцовской кальдеры. В концептуальной модели глубинный магматический источник был питающим очагом для переноса урана магматическими расплавами в верхние горизонты коры с формированием урансодержащих пород субвулканического очага и вулканических извержений Стрельцовской кальдеры. После приноса урана магматическими расплавами его дальнейшее перераспределение происходило в палеогидродинамической системе со свободной тепловой конвекцией флюидов в остаточном тепловом поле субвулканического очага Стрельцовской кальдеры. Предложенный механизм конвективного движения флюидов может объяснить и повсеместное развитие в пределах кальдеры гидротермальных карбонатов с осадочными изотопными характеристиками. Материал для отложения жильных и метасоматических карбонатов мог заимствоваться из крупных ксенолитов докембрийских мраморов, особенно широко распространенных в западной части 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. Предполагается (Пэк и др., 2020), что соучастие в формировании рудной минерализации этих трех потенциально высокопродуктивных источников урана объясняет происхождение уникальных урановорудных запасов месторождений Стрельцовского рудного поля. В этой связи интересно провести сравнительный анализ основных характеристик, влияющих на рудоносность рассматриваемых вулканогенных структур (табл. 1).

Сравнительный анализ характеристик вулканогенных структур показывает, что если принять гипотезу реализации механизма свободной тепловой конвекции флюидов в остаточном тепловом поле корового магматического очага, то Стрельцовская кальдера будет являться единственным объектом, в котором поступление урана происходило из нескольких источников его ближней мобилизации (из консолидированного субвулканического очага, из гранитоидных пород фундамента структуры и из покровов кислых вулканических пород в ее вулканогенно-осадочном чехле). Соучастие в формировании рудной минерализации этих трех потенциально высокопродуктивных источников урана предположительно объясняет происхождение уникальных урановорудных запасов месторождений Стрельцовской

Таблица 1. Сравнительная характеристика ураноносных вулканогенных структур

Параметры объекта	Стрельцовская кальдера	Вулкано-плутонический комплекс Сианшань	Кальдера МакДермитт
Тип вулканогенной структуры	Кальдера ресургентная с несколькими вулканическими аппаратами (Краснокаменский, Тулукуевский, Юго-Западный)	Вулкано-плутонический комплекс с центральным штоком порфирокластических риолитов и риодацитов, включающий несколько кратеров и вулканических аппаратов	Кальдера ресургентная: четыре перекрывающих друг друга кальдеры
Глубина подкальдерной магматической камеры	5–6 км	13–26 км	Плоская, мощностью до первых километров, неглубоко погруженная камера
Кристаллические породы фундамента кальдер – возраст и содержание урана (ppm)	Гнейсо-граниты PR ₂ (1800 млн лет) кристаллические сланцы, амфиболиты (1600–870 млн лет) – 2.6–9.3; граниты гнейсовидные PZ ₁ (430 млн лет) – 3.2–5.4; граниты ундинского комплекса PZ ₂ (254–245 млн лет) – 2.8–4.6; зоны домезозойской альбитизации, калишпатизации, биотитизации – до 24 ppm	Слюдяные, ставролитовые, кордиеритовые сланцы, амфиболиты PR ₂ (1766–1113 млн лет) – 0.5–7.03; граниты, гранито-гнейсы PZ ₁ – до 9.74; граниты J _{1–2} (180–160 млн лет) – 7.5 до 81.7 ppm	Гранодиориты K ₁ – данные по содержаниям урана отсутствуют. Докальдерные андезиты и дациты возрастом 47–18 млн лет, в андезитах содержание урана около 3 ppm
Внутрикальдерные вулканы – возраст и содержание урана (ppm)	Базальты (170–153 млн лет) – 0.5–7.3; трахидациты (170–149 млн лет) – 5.8–11.9; риолиты покровные (140–128 млн лет) – 6.1–21.2; риолиты экстрезивные (146–140 млн лет) – 6.1–21.3; сиенит-порфиры, кварцевые монцитоны (139 млн лет) – 2.9–6.6 ppm	Риодациты (137 млн лет) – 5; риолиты (137 млн лет) – 6.2–15.6; игнимбриты и кристаллотуфы – 4–6.3; субвулканические сиенит-порфиры (135 млн лет) – 3.5–4.5 ppm	Возраст всех риолитов 16.7–16.3 млн лет. Стекловатые риолиты – 12–15; риолиты порфировые – 2–8.9; биотитовые риолиты – 2–12 ppm
Возраст урановых руд	138–135 млн лет	109–81 млн лет	16.13–15.7 млн лет
Преобладающий метаморфизм кристаллических пород фундамента	Метаморфизм в пределах амфиболитовой и гранулитовой фаций, ультраметаморфизм с формированием мигматитов. Слюдяные сланцы с кордиеритом, силлиманитом, ставролитом, андалузитом. Диафторез в пределах зеленосланцевой фации	Преимущественно метаморфизм амфиболитовой фации, частично гранулитовой, мигматизация	Явлений метаморфизма не отмечено за исключением контактных зон между докальдерными дацитами-андезитами и комплексом риолитов (до 5 горизонтов).
Типы околорудных метасоматитов	Дорудные – иллитизация, аргиллизация; рудосопровождающие – альбитизация, карбонатизация, хлоритизация, флюоритизация, окварцевание; пострудные – смектитизация с цеолитами, диккитизация, адуляр	Дорудные – иллитизация, альбитизация; рудосопровождающие – флюоритизация, хлоритизация, окварцевание; пострудные – аргиллизация	Дорудные – иллитизация, аргиллизация; рудосопровождающие – адуляр, флюорит, карбонаты, кварц

Таблица 1. Окончание

Параметры объекта	Стрельцовская кальдера	Вулкано-плутонический комплекс Сианшань	Кальдера МакДермитт
Наличие внутрикальдерных флюидопроводящих каналов	В основном внутрикальдерные проводники, связанные с жерлами вулканов и/или крупными разломными зонами, которые определяют локализацию месторождений и рудопроявлений. Кольцевые разломы выполнены дайками сиенитов, сиенит-порфиров, граносиенит-порфиров	Слабовыраженные кольцевые разломы, выполненные в ряде случаев мафическими дайками мелового возраста. В северной части комплекса проявлена система линейных разломно-трещинных зон, к которым тяготеет ряд рудопроявлений	Ярко проявленные кольцевые периферические кальдерные разломы при слабо выраженных внутрикальдерных разломных зонах. Горизонты поздних (16.4–14.9 млн лет) базальтов (высокоалюминиевые оливиновые толеиты – исландиты) вмещают урановые руды (месторождение Аврора)

По данным: Ищукова и др., 2007; Чернышев, Голубев, 1996; Петров и др., 2017; Jiang et al., 2005; Dahlkamp, 2009; Guo et al., 2018; Guo et al., 2020; Bonnetti et al., 2020; Pirajno, 2013; Castor, Henrey, 2000; Nash, 2010; Henrey et al., 2017; Castor, Henrey, 2020; Yu et al., 2019.

кальдеры по сравнению с рудными объектами в Сианшане и МакДермитте.

Также, если принять гипотезу формирования рудных тел за счет выщелачивания урана из вмещающих обогащенных им пород (Пэк и др., 2020), то единственным его носителем являются карбонатные комплексы. Они устойчивы в достаточно широком интервале внешних условий, а восстановителями урана могут быть не только углефицированные прослои туфогенных пород, но и газо-жидкие восстановители эндогенного происхождения в рудовмещающих разломах Стрельцовской кальдеры (Petrov et al., 2008).

Относительно происхождения урана в Сианшане все авторы сходятся в представлениях о том, что его наиболее вероятными источниками являются сами вмещающие вулканические породы, но, также с возможным участием более древних гранитоидных пород и метаморфических толщ протерозоя. Принципиальная схема уранового рудообразования, представленная в работах последних лет (Guo et al., 2020; Bonnetti et al., 2020), предполагает, что основной транспорт урана осуществляется разнообразными, но главным образом карбонатными или фторидными уранильными комплексами. Вопросы о возможных восстановителях в упомянутых работах детально не рассматриваются, но в качестве возможных агентов предлагаются восстановительные газы в связи с поствулканическими интрузиями мафических даек, а также взаимодействие с рассеянными сульфидами минерализованных зон или с полиметаллическими рудными телами в основании вулкано-плутонического комплекса Сианшань (Guo et al., 2018).

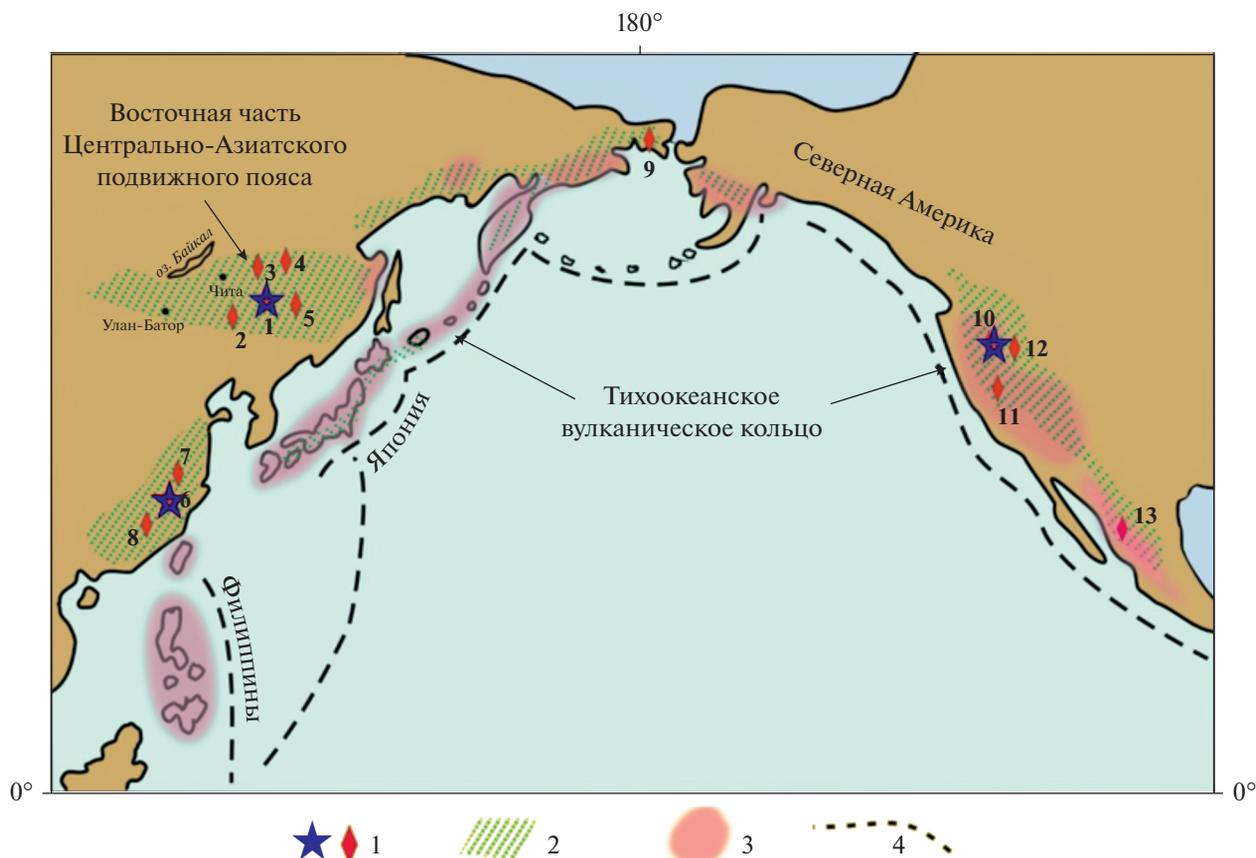
Приведенный анализ показывает разнообразие мнений по источникам урана, условиям его переноса и накопления. Наряду с этим отсутствие

полного понимания в вопросе взаимосвязи этих процессов с геодинамическими обстановками их функционирования указывает на необходимость продолжения работ в этом направлении.

Крупнейшие проявления урановой минерализации располагаются в основном в мезозойских и кайнозойских вулканических структурах, приуроченных к областям внутриплитного вулканизма с мощной континентальной корой и развитым гранитно-метаморфическим слоем, бедным серой. Для этих областей типичны семейства метасоматитов низкокислотного или промежуточного типа (березиты, иллитовые метасоматиты, умеренно-кислотные аргиллизиты с адуляром) (Андреева, Головин, 2001). Во внешней или переходной зоне Тихоокеанского кольца (Камчатка, Провинция Бассейнов и Хребтов в США, Чили и другие регионы) эти семейства метасоматитов могут присутствовать совместно с кислотными метасоматитами (фиг. 14).

Для регионов нахождения крупнейших по классификации МАГАТЭ ураноносных вулкано-генных построек (Стрельцовская в Восточном Забайкалье, Сианшань в Южном Китае и МакДермитт на западе США) ведущим геодинамическим механизмом развития и функционирования рудно-магматических систем являются процессы растяжения. В Восточном Забайкалье они происходили в основном в позднеюрско-раннемеловое время, в Южном Китае – в позднем мелу и начале палеоцена, в районе Йеллоустонской горячей точки – в миоцене.

В Восточном Забайкалье и сопредельных территориях Северного Китая они проявились, в основном, в раннем мелу. Растяжение в этом регионе обусловлено левосдвиговыми перемещениями в зоне конвергенции тихоокеанских плит и при за-



Фиг. 14. Схема распространения месторождений урана и сопровождающих их околорудных метасоматитов относительно Тихоокеанского мезозойско-кайнозойского вулканического пояса (северное полушарие). 1–2 – урановые рудные поля и месторождения; метасоматиты умеренно-кислотного типа (low- and intermediate sulfidation), сопровождающие месторождения урана (и других металлов); 3 – метасоматиты кислотного типа (high sulfidation); 4 – глубоководные желоба (зоны субдукции). Урановые месторождения и рудные поля: 1 – Стрельцовское рудное поле, 2 – Дорнотское рудное поле, 3 – Олов, 4 – месторождения Алданской группы, 5 – Ласточка, 6 – Сианшаньское рудное поле, 7 – Шенгуань, 8 – Сиаогуань, 9 – Киф-Провиденское, 10 – МакДермитт, 11 – Мерисвейл, 12 – Фронт-Рейндж, 13 – Нопал. С использованием материалов (Русинов, 2001; Шумилин, 2007).

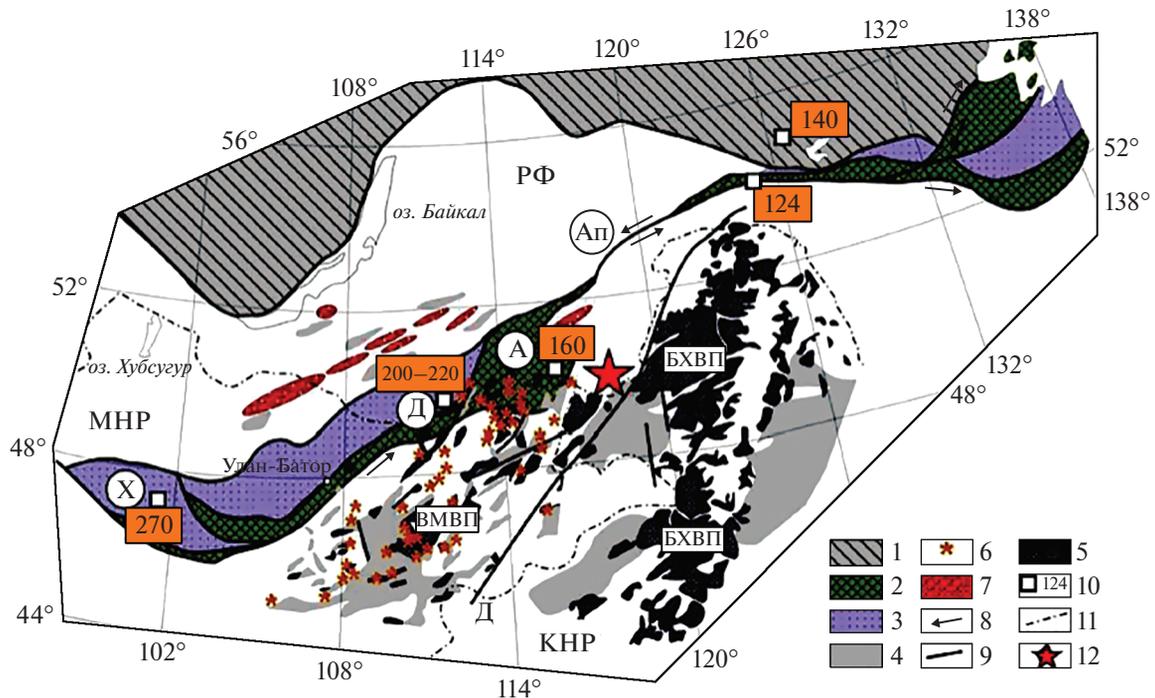
крытии Монголо-Охотского океана, деламинацией литосферной мантии и внедрением астеносферного вещества (Shao, 1994; Zhang et al., 2010 и др.). Перемещение литосферных масс для Восточного Забайкалья можно предполагать по омоложению времени коллизионных деформаций в северо-восточном направлении (фиг. 15).

При этом установлены левосдвиговые смещения по зоне Монголо-Охотской сутуры, отделяющей жесткие блоки Западно-Становой области от Восточно-Монгольского вулканического пояса с цепочкой ураноносных вулкано-тектонических структур (с ЮЗ на СВ – Дорнотская, Куладжинская, Стрельцовская, Куйтунская). Региональные деформации сдвига и растяжения (транстенсивный стресс-режим) могли происходить на фоне взаимодействия процессов субдукции и плюм-тектоники. Такую возможность наглядно демонстрируют данные глубинной геофизики по ряду крупных субдукционных зон (Gu et al., 2012). Концепту-

альные модели взаимосвязи процессов плюм-тектоники и их важнейшая роль в формировании эндогенных месторождений детально рассмотрены в работах (Кузьмин, Ярмолук, 2014, 2016; Ярмолук и др., 2019).

Применительно к вопросу определения геодинамической обстановки формирования рудоносных вулкано-плутонических структур в Восточном Забайкалье, Восточной Монголии и сопредельных территорий Северного Китая высказанное нами ранее (Петров и др., 2017; Андреева и др., 2020) предположение о сочетании остаточного коллизионного и рифтогенного геодинамических режимов, иллюстрирует фиг. 16.

Подобной информации для района Сианшаньской вулкано-купольной структуры пока не имеется, хотя в юго-восточной части Китая намечается омоложение возраста гранитоидов (фиг. 17) в направлении с юго-запада на северо-восток (Wan, 2010; Bonnetti et al., 2018).



Фиг. 15. 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: Х – Хангайское нагорье, Д – Джаргалантуинский прогиб, А – Агинская зона, Ап – Аникинский порог, ВМВП – Восточно-Монгольский вулканический пояс, БХВП – Большехинганский вулканический пояс, Д – Даэрубуланская система разломов.

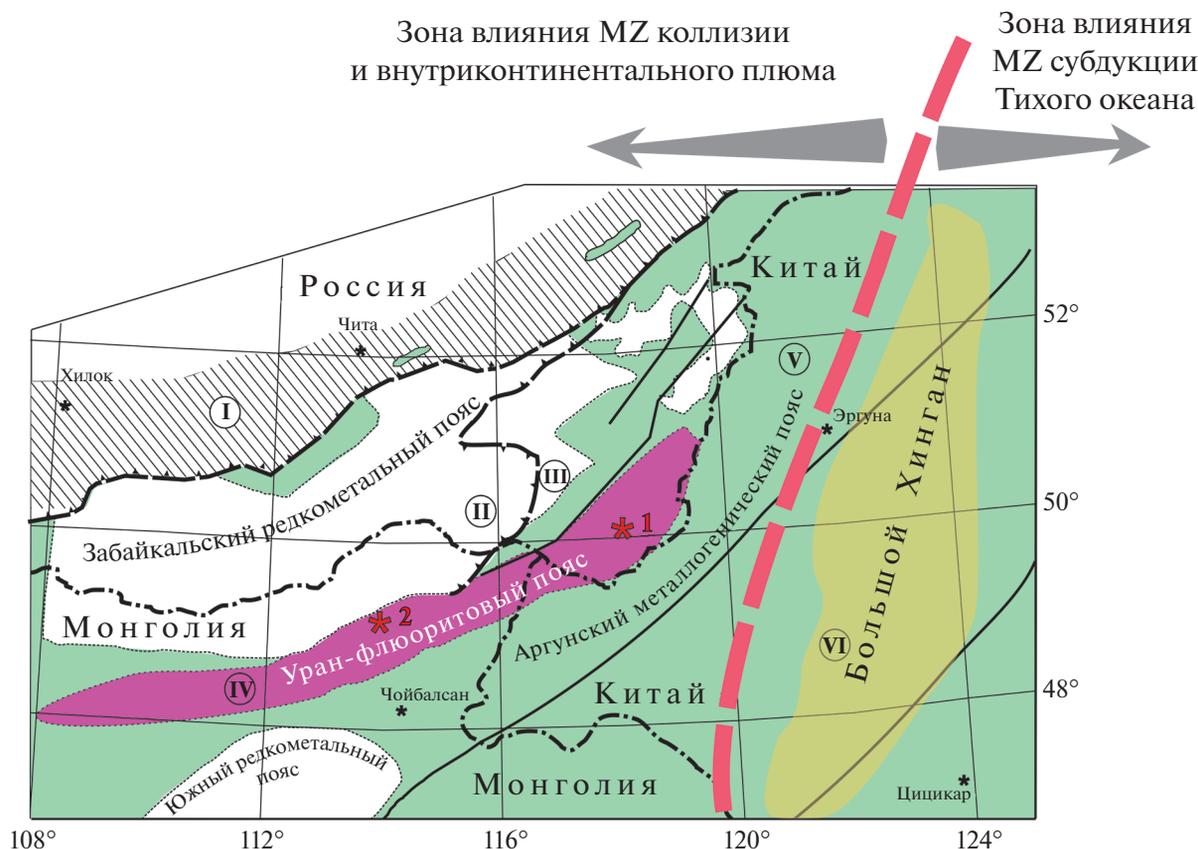
В целом для Южного Китая большинство авторов полагает важнейшим для мезозойско-кайнозойского рудообразования существование разломно-трещинных зон, формировавшихся в условиях растяжения, наступившего после субдукции палеотихоокеанской плиты под Евразийский континент в мезозое и начале кайнозоя (Hu et al., 2008; Xu et al., 2017; Guo et al., 2020). Эти зоны преобладающего юго-запад–северо-восточного простирания послужили не только путями внедрения магм, но и проводниками для циркулирующих окислительных вод, выщелачивающих и несущих уран, а также путями подъема восстановительных мантийных газов.

Наиболее ярко динамика продвижения литосферных плит над горячими областями мантии зафиксирована для трассы Йеллоустонской горячей точки, на юго-западе которой находится кальдера МакДермитт, а на северо-восточной оконечности – Йеллоустон (фиг. 18).

Расстояние между МакДермиттом и Йеллоустоном около 700 км. Основная магматическая активность вокруг кальдеры МакДермитт продолжалась в период 16.7–16.1 млн лет, хотя обнаружены высокоглиноземистые оливин-толеито-

вые лавы с возрастом 14.9 млн лет (Henry et al., 2017). Кальдера находится на западном крыле субмеридионально ориентированной Невадской рифтовой зоны в области ее замыкания. Параллельно рифту фиксируется граница отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, значение которого 0.706 интерпретируется как раздел между континентальной литосферой на востоке и океанической литосферой на западе (Smith et al., 2009). Расчеты показывают, что скорость продвижения континентальной плиты в ЮЗ направлении составляла от 2 до 4.5 см/г.

Приведенный обзор позволяет определить те узловые вопросы (источники урана, условия его переноса и накопления, геодинамические обстановки), по которым очевидно проявляются расхождения в интерпретации последовательностей развития минеральных систем (стадийности гидротермально-метасоматических и рудообразующих процессов) вулканогенных месторождений (volcanic-related type) Восточного Забайкалья, Южного Китая и Запада США при внешнем формальном сходстве минеральных ассоциаций, как рудных, так и нерудных. Анализ этих различий, возможно, позволит выработать дополнительные критерии, которые необходимо учитывать при



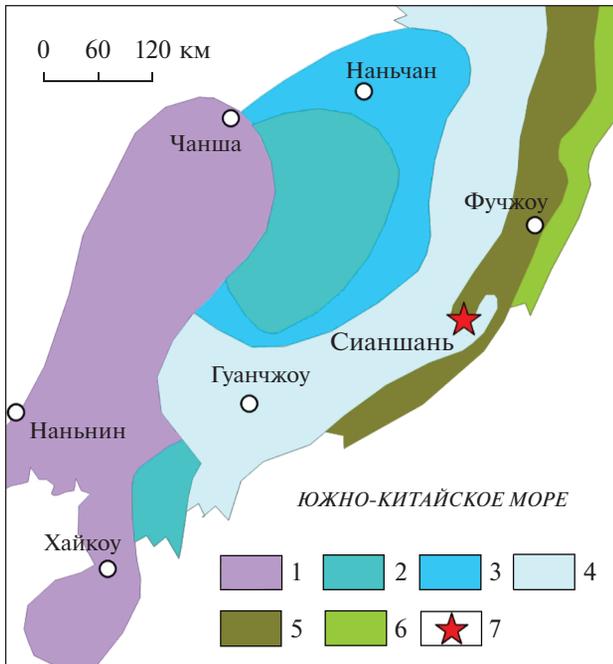
Фиг. 16. Структурно-металлогеническая схема Юго-Восточного Забайкалья и сопредельных стран. Структурно-тектонические зоны и спектр оруденения: I – Западно-Становая (Au, Mo, Cu, Pb, Zn, U); II – Агинская и III – Аргунская металлогенические зоны (Ta, Li, Nb, Sn, W, Be); IV – Монголо-Приаргунский металлогенический пояс (U, CaF₂, Mo, Pb, Cu, Au, Ag, Zn); V – Аргунский металлогенический пояс (Mo, Cu, Au, Pb, Zn, Ag, Au); VI – Большой Хинган (Mo, Au, Cu, Pb, Zn). Урановорудные поля: 1 – Стрельцовское, 2 – Дорнотское (по Эндогенные рудные..., 1984; Лишневский, Бескин, 1994; Pigaño, 2013; Li et al., 2018; Ярмолюк и др., 2020).

прогнозе крупномасштабных месторождений урана и сопутствующих ему элементов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вулканогенные постройки Стрельцовская в Восточном Забайкалье, Сианшаньская в Южном Китае и МакДермитт на западе США в действующей классификации МАГАТЭ определяются как ключевые (типовые) структуры, локализирующие урановые месторождения “вулканогенного типа” (Geological Classification..., 2018). Являясь по своей сути эмпирической системой, этот описательный структурно-формационный подход группирует месторождения урана, главным образом, по признаку вмещающей породы и/или рудокализирующей структуры. Однако в последнее время появляется все больше и больше публикаций (Descriptive Uranium..., 2020), в которых подчеркивается, что, несмотря на важность этой накопленной за долгие годы справочной информации, действующая классификация содержит множество вари-

ативных данных по условиям локализации урановых руд и многочисленные параметры, большинство из которых проявлены только в масштабе одного или нескольких месторождений. Имеющиеся описательные модели уранового рудообразования в значительной степени основаны на информации, полученной в ходе отработки месторождений без должного привлечения результатов региональных металлогенических и петрологических исследований. Поэтому такие модели следует использовать в качестве отправной точки для создания новых генетических моделей урановых месторождений, которые основаны на минерально-системном подходе, реализующем парадигму “источник → транспорт → отложение”. В этой связи рассматриваемые в данной статье “типовые” рудоносные вулканогенные структуры (Стрельцовская в Восточном Забайкалье, Сианшаньская в Южном Китае и МакДермитт на западе США), несмотря на разные временные рамки формирования, проявляют многие черты сходства в развитии магматических, гидротермальных и структу-



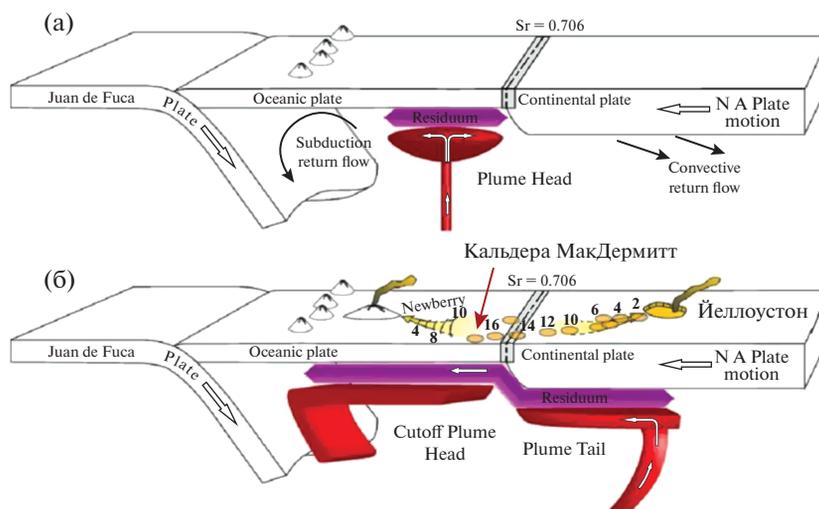
Фиг. 17. Ареалы распространения мезозойских гранитных интрузий в Южном Китае (по Wan, 2010). Разновозрастные интрузии: 1 – триасовые, 2 – раннеюрские, 3 – среднеюрские, 4 – позднеюрские, 5 – раннемеловые, 6 – позднемеловые. 7 – Сианшаньское рудное поле.

рообразующих процессов. Эти критически важные генетические процессы следует учитывать при создании моделей минеральных систем урановых месторождений в разновозрастных вулка-

но-тектонических структурах для обоснования постановки поисково-разведочных работ, связанных с определением местоположения и количества ресурсов урана.

Для регионов нахождения рассмотренных нами крупнейших ураноносных вулканогенных структур ведущим геодинамическим механизмом развития и функционирования рудно-магматических систем являются процессы растяжения. В Восточном Забайкалье они происходили в основном в позднеюрско-раннемеловое время, в Южном Китае – в позднем мелу и начале палеоцена, в районе Йеллоустонской горячей точки – в миоцене. Имеются подтвержденные свидетельства о динамике продвижения литосферных плит над горячими областями мантии. Региональные деформации растяжения, рифтогенеза и вулканической активности могли протекать на фоне взаимодействия процессов субдукции и плюм-тектоники, что наглядно демонстрируют данные глубинной геофизики по ряду крупных субдукционных зон.

Вмещающие породы урановых месторождений в вулканогенных постройках упомянутых регионов представляют собой метаалюминиевый или умеренно пералюминиевый высококалийевый тип вулканических пород, соответствующий гранитам А-типа (“анорогенные граниты”). Риолиты, риодациты, трахириолиты, а также экструзивные сиениты, кварцевые сиениты, риолитовые дайки и купола, обогащенные калием, обнаруживают довольно высокую степень фракционирования. Это выражается в распределении РЗЭ с отчетливой отрицательной Eu-аномалией, значительным обогащением несовместимыми и высокорядными



Фиг. 18. Модель формирования трассы Йеллоустонской горячей точки (по Smith et al., 2009). а – фаза воздействия (17 млн лет назад) плюма, расположенного под аккреотирующей океанической плитой Колумбийского плато в области субдукции Хуан-де-Фука, б – фаза современного состояния расщепленного плюма и взаимодействия расположенного над ним деплетированного верхнемантийного блока с континентальной литосферой. NA – североамериканская плита. Цифрами показан средний возраст внутрикальдерных вулканических пород.

элементами, например, Li, Rb, Ta и U при резком снижении Ba и Sr относительно верхней континентальной коры. По современным представлениям, эти породы образуются в условиях растяжения путем частичного плавления кристаллической земной коры, обогащенной перечисленными компонентами. При исследовании изотопов Nd и Sr установлено, что в формировании этих пород могут принимать участие также и процессы фракционирования щелочных базальтоидов.

Проявления рудно-метасоматических процессов в рудоносных вулканогенных структурах имеют очевидные черты сходства. Это касается как составов рудных минералов, так и метасоматических преобразований, в ряду которых ведущая роль принадлежит обширным ореолам иллитизации. Для урановых месторождений и рудопроявлений Восточного Забайкалья и Ган-Ханьского металлогенического пояса Южного Китая характерно отсутствие метасоматических ореолов высококислотного типа (advanced argillic alterations) – вторичных кварцитов и аргиллизитов с алунином, пиррофиллитом, диаспором, андалузитом, ангидритом и сульфидами – энаргитом, люцитом, фаматинитом. Эти парагенезисы характеризуют кислотную среду минералообразования при высокой активности серы и кислорода и широко распространены в пределах современного и молодого кайнозойского вулканизма Тихоокеанского кольца в областях с тонкой сиалической корой и преобладающей ролью базитовых магм. Гидротермальные месторождения урана для этих областей не характерны. Семейство же метасоматитов низкокислотного или промежуточного типа (березиты, иллитовые метасоматиты, умеренно-кислотные аргиллизиты с адуляром) сопровождают проявления урановой минерализации в мезозойских и кайнозойских кальдерах, которые располагаются в основном в областях внутриматерикового вулканизма с мощной континентальной корой и развитым гранитно-метаморфическим слоем, бедным серой, или присутствуют во внешней или переходной зоне Тихоокеанского кольца (Южный Китай, Провинция Бассейнов и Хребтов, США). Преобладание общего фона невысокой или умеренной кислотности флюидов и относительно невысоких (не более 300°C) температур гидротермальных рудообразующих систем более благоприятно для переноса урана в виде карбонатных, но не фторидных или хлоридных, комплексов.

Проблема возможных источников урана имеет две альтернативы. Одна из них, более традиционная, предполагает, что те объемы литосферы, которые служили протолитом для магнообразования, могли быть и источником рудного вещества. При этом коровые или подкоровые флюиды использовали те же тектонически ослабленные зоны земной коры, что и поднимающаяся магма.

Однако в настоящее время активно развиваются гипотезы, предполагающие поступление урана из нескольких источников его ближней мобилизации при условии реализации механизма свободной тепловой конвекции флюидов в остаточном тепловом поле корового магматического очага или при возобновлении тектонотермальной активности после завершения вулканической деятельности в условиях резкой активизации процессов растяжения. Последнее, например, характерно для территории Южного Китая.

Гипотеза поступления урана из нескольких источников его ближней мобилизации (консолированного субвулканического очага, гранитоидных пород фундамента и покровов кислых вулканических пород в чехле) за счет свободной тепловой конвекции флюидов, возможно, является ключом к пониманию причин формирования уникального по масштабам оруденения Стрельцовской кальдеры по сравнению с рудными объектами в Сианшане и МакДермитте.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аксюк А.М. Экспериментально обоснованные геофториметры и режим фтора в гранитных флюидах // Петрология. 2002. Т.10. № 6. С. 640–654.
- Алешин А.П., Величкин В.И., Крылова Т.П. Генезис и условия формирования месторождения уникального молибден-уранового Стрельцовского рудного поля: новые минералого-геохимические и физико-химические данные // Геология руд. месторождений. 2007. № 49. С. 446–470.
- Андреева О.В., Головин В.А., Гольцман Ю.В., Козлова П.С., Сельцов Б.М. Эволюция мезозойского магматизма и руднометасоматических процессов в Юго-Восточном Забайкалье (Россия) // Геология руд. месторождений. 1996. № 2. С. 115–130.
- Андреева О.В., Головин В.А. Метасоматические процессы на урановых месторождениях Тулукуевской кальдеры в Восточном Забайкалье (Россия) // Геология руд. месторождений. 1998. № 3 С. 205–220.
- Андреева О.В., Головин В.А., Петров В.А. Околорудная аргиллизация и урановое оруденение северо-западной части Стрельцовской кальдеры // Геология руд. месторождений. 2010. Т. 52. № 1. С. 36–52.
- Андреева О.В., Петров В.А., Полуэктов В.В. Мезозойские кислые магматиты Юго-Восточного Забайкалья: петрогеохимия, связь с метасоматизмом и рудообразованием // Геология руд. месторождений. 2020. Т. 62. № 1. С. 76–104.
- Жариков В.А., Иванов И.П., Омеляненко Б.И. и др. Экспериментальное изучение растворимости уранинита в

- модельных гранитных расплавах и растворах при высоких параметрах // Геология руд. месторождений. 1987. № 4. С. 3–12.
- Зарайский Г.П.* Зональность и условия образования метасоматических пород. М.: Наука, 1989
- Зарайский Г.П.* Условия образования редкометалльных месторождений, связанных с гранитоидным магматизмом // Смирновский сборник. М.: Фонд им. акад. В.И. Смирнова, 2004. С. 105–192.
- Зарайский Г.П.* Эксперимент в решении проблем метасоматизма. М.: GEOS, 2007.
- Ищуква Л.П., Модников И.С., Сычев И.В., Наумов Г.Б., Мельников И.В., Кандинов М.Н.* Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. Иркутск: ГК “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 мантийных пород Стрельцовской кальдеры (Восточное Забайкалье), мантийные домены Центральной Азии и Китая // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 4. Вып. № 28. С. 231–246
- Коваленко Н.И., Рыженко Б.Н., Присягина Н.И. и др.* Экспериментальное определение форм урана (IV) в растворах HF при 500°C, 1000 бар // Геохимия. 2012. № 1. С. 21–29.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В.* Мантийные плюмы Северо-Восточной Азии и их роль в формировании эндогенных месторождений // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 2. С. 153–184.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В.* Тектоника плит и мантийные плюмы – основа эндогенной тектонической активности Земли последние 2 млрд лет // Геология и геофизика. 2016. Т. 57. № 1. С. 11–30.
- Лаверов Н.П., Величкин В.И., Власов Б.П., Алешин А.П., Петров В.А.* Урановые и молибден-урановые месторождения в областях развития континентального магматизма: геология, геодинамические и физико-химические условия формирования. М.: ИФЗ РАН, ИГЕМ РАН, 2012. 320 с.
- Летников Ф.А.* Флюидный режим эндогенных процессов и проблемы рудогенеза // Геология и геофизика. 2006. № 12. С. 1296–1307.
- Маракушев А.А.* Петрогенезис. М.: Недра, 1988. 291с.
- Маракушев А.А., Шаповалов Ю.Б.* Экспериментальное исследование рудной концентрации во фторидных гранитных системах // Петрология. 1994. № 1. С. 4–23.
- Машковцев Г.А., Константинов А.К., Мигута А.К., Шумилин М.В., Щеточкин В.Н.* Уран российских недр. М.: ВИМС, 2010. 850 с.
- Миронов Ю.Б., Филоненко Ю.Д., Соловьев Н.С., Петров В.А., Головин В.А., Стрельцов В.А.* Свинцово-цинковые, урановые и флюоритовые месторождения в Дорнотской вулcano-тектонической структуре (Восточная Монголия) // Геология руд. месторождений. 1993. Т. 35. № 1. С. 31–43.
- Модель формирования урановых месторождений в областях континентального вулканизма (на примере месторождений Забайкалья, МНР, Средней Азии). Под ред. Б.М. Сельцова и В.Е. Вишнякова. М.: Фонды ИГЕМ РАН, 1990.
- 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.* Основы физико-химической модели уранового минералообразования. М.: Атомиздат, 1978.
- Наумов Г.Б.* Структурно-геохимический подход к решению вопросов рудообразования // Основные проблемы рудообразования. М.: Наука, 1990. С. 167–183.
- Наумов Г.Б.* Миграция урана в гидротермальных растворах // Геология руд. месторождений. 1998. Т. 40. № 4. С. 307–325.
- 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. Т. 52. № 11. С. 1736–1747.
- Наумов Г.Б., Беркелиев Т.К., Миронова О.Ф.* Метасоматическая природа гидротермальных рудообразующих растворов // Мінералогічний журнал- Mineral. Journ. (Ukraine). 2012. Т. 34. № 2. С. 100–111.
- Никольдс С.Р., Аллен Р.* Геохимические наблюдения. М.: Иностранная литература, 1958. 176 с.
- Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В.* Влияние петрофизических свойств и деформаций пород на вертикальную зональность метасоматитов в ураноносных вулканических структурах (на примере Стрельцовской кальдеры, Забайкалье) // Геология руд. месторождений. 2014. Т. 56. № 2. С. 95–117.
- Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В.* Тектономагматические циклы и геодинамические обстановки формирования рудоносных систем Южного Приаргунья // Геология руд. месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 445–469
- Перетяжко И.С., Загорский В.Е., Царева Е.А. и др.* Несмесимость фторидно-кальциевого и алюмосиликатного расплавов в онгонитах массива Ары-Булак (Восточное Забайкалье) // ДАН. 2007. Т. 413. № 2. С. 244–250.
- Перетяжко И.С., Савина Е.А.* Флюидно-магматические процессы при образовании пород массива онгонитов Ары-Булак (Восточное Забайкалье) // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 10. С. 1423–1442.
- Перетяжко И.С., Савина Е.А., Дриль С.И., Герасимов Н.С.* Rb-Sr изотопная система и особенности распределения Rb и Sr в породах массива онгонитов Ары-Булак, образованных при участии процессов фторидно-силикатной магматической несмесимости // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 11. С. 1776–1789.
- Покровский Б.Г.* Коровая контаминация мантийных магм. М.: Наука, 2000. 207 с.
- Покровский В.А.* Экспериментальное исследование равновесия $1.5 \text{Ab} + 0.5 \text{KCl} + \text{HCl} = 0.5 \text{Mc} + 3 \text{Kv} + 1.5 \text{NaCl}$ при 300–500°C и давлении 1 кбар // Докл. АН СССР. 1982. Т.262. № 2. С. 438–441.
- Пэк А.А., Мальковский В.И., Петров В.А.* Минеральная система урановых месторождений Стрельцовской кальдеры (Восточное Забайкалье) // Геология руд. месторождений. 2020. Т. 62. № 1. С. 36–54.
- Рафальский Р.П., Осипов Б.С.* Гидротермальные равновесия в системах, содержащих уран и сульфиды тяжелых металлов при 200–360°C // Геология руд. месторождений. 1967. Т. 9. № 2. С. 44–57.

- Редькин А.Ф., Величкин В.И.* Фториды урана в гидротермально-магматических системах // Доклады РАН. 2013. Т. 450. № 2. С. 218–221.
- Редькин А.Ф., Иванов И.П., Омеляненко Б.И.* Экспериментальное изучение растворимости двуокиси урана в кислых хлоридных флюидах при 400–600°C и 1 кбар // Доклады АН СССР. 1988. Т. 299. № 3. С. 726–729.
- Редькин А.Ф., Величкин В.И., Шаповалов Ю.Б.* Исследование поведения урана, ниобия и тантала в системе гранитный расплав – фторидный флюид при 800–950°C, 2300 бар // Геология руд. месторождений. 2021. Т. 63. № 4. С. 311–335.
- Русинов В.Л.* Два семейства эпитептермальных месторождений и петрологическая основа их различия // Доклады РАН. 2001. Т. 381. № 2. С. 239–242.
- Сырицо Л.Ф., Баданина Е.В., Абушкевич В.С., Волкова Е.В., Шуклина Е.В.* Вулканоплутонические ассоциации кислых пород в пределах редкометалльных рудных узлов Забайкалья: геохимия пород и расплавов, возраст, РТ-условия кристаллизации // Петрология. 2012. Т. 20. № 6. С. 622–648.
- Таусон Л.В.* Геохимия и металлогения латитовых серий // Геология руд. месторождений. 1982. № 3. С. 3–14.
- Таусон Л.В., Антипин В.С., Захаров М.В., Зубков В.С.* Геохимия мезозойских латитов Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1984.
- Чевычелов В.Ю.* Распределение полиметаллов между гранитоидным расплавом, флюидно-солевой и флюидной фазами // Доклады Академии наук. 1992. Т. 325. № 2. С. 378–381.
- Чернышев И.В., Голубев В.Н.* Изотопная геохронология процессов формирования месторождения Стрельцовское, Восточное Забайкалье – крупнейшего уранового месторождения России // Геохимия. 1996. № 10. С. 924–937.
- Шаповалов Ю.Б.* Галогенидная экстракция рудных и петрогенных элементов по экспериментальным данным // Геология, геохимия и геофизика на рубеже XX и XXI веков. 2001. Т. 2. С. 104–105.
- Шатков Г.А., Бережная Н.Г., Лепехина Е.Н., Родионов Р.В., Падерин И.П., Сергеев С.А.* U–Pb (SIMS SHRIMP II) возраст вулканических образований Тулукуевской кальдеры (Стрельцовский ураново-рудный узел, Восточное Забайкалье) // Доклады РАН. 2010. Т. 432. № 3. С. 360–364.
- Шатков Г.А., Бутаков П.М.* Признаки участия уранил-фторидов в формировании богатых урановых руд месторождений Стрельцовского типа, Восточное Забайкалье // Геохимия. 2013. Т. 449. № 6. С. 696–700.
- Шмариович Е.М., Агапова Г.Ф., Рехарская В.М. и др.* Экспериментальное изучение выщелачивания урана из различных пород термальными сульфидно-карбонатными растворами // Геология руд. месторождений. 1984. № 3. С. 87–98.
- Шумилин М.А.* Урановорудные провинции мира и ресурсный потенциал урана: попытки количественного анализа // Отечественная геология. 2007. № 2. С. 48–51.
- Ярмолюк В.В., Никифоров А.В., Козловский А.М., Кудряшова Е.А.* Позднемезозойская магматическая провинция востока Азии: строение, магматизм и условия формирования // Геотектоника. 2019. № 4. С. 60–77.
- Ярмолюк В.В., Козловский А.М., Саватенков В.М., Кудряшова Е.А., Кузнецов М.В.* Позднемезозойская Восточно-Монгольская вулканическая область: строение, магматические ассоциации, источники магматизма // Петрология. 2020. Т. 28. № 6. С. 563–590.
- Badanina E.V., Trumbull R.B., Dulski P.I.* The behaviour of rare-earth and lithophile trace elements in rare-metal granites: a study of fluorite, melt inclusions and host rocks from the Khangilay complex, Transbaikalia, Russia // Can. Mineral. 2006. V. 44. P. 667–692.
- Bonnetti C., Liu X., Mercadier J., Cuney M., Delouie E., Ville-neuve J., Wenquan L.* The genesis of granite-related hydrothermal uranium deposits in the Xiazhuang and Zhuguang ore fields, North Guangdong Province, SE China: Insights from mineralogical, trace elements and U–Pb isotopes signatures of U mineralization // Ore Geol. Rev. 2018. V. 92. P. 588–612.
- Bonnetti C., Liu X., Cuney M., Mercadier J., Riegler T., Chida Y.* Evolution of the uranium mineralization in the Zoujishan deposit, Xiangshan ore field: Implications for the genesis of volcanic-related hydrothermal U deposits in South China // Ore Geol. Rev. 2020. V. 122. 103514.
- Browne P.R.L., Ellis A.J.* The Ohaki-Broadlands hydrothermal Area, New Zealand: Mineralogy and related geochemistry // Amer. J. Sci. 1970. V. 269. P. 97–131
- Castor S.B., Henry C.D.* Geology, geochemistry, and origin of volcanic rock-hosted uranium deposits in northwestern Nevada and southeastern Oregon // Ore Geol. Rev. 2000. V. 16. P. 1–40.
- Castor S.B., Henrey C.D.* Lithium-rich claystone in the McDermitt Caldera, Nevada, USA: geologic, mineralogical, and geochemical characteristics and possible origin // Minerals. 2020. V. 10. 68.
- Chappell B.W., White A.J.R.* I- and S-type granites in the Lachlan Fold Belt // Trans. Roy. Soc. Edinb. Earth Sci. 1992. V. 83. P. 1–26.
- Chabiron A., Cuney M., Poty B.* Possible uranium sources for the largest uranium district associated with volcanism: the Streltsovka caldera (Transbaikalia, Russia) // Mineral. Deposita. 2003. V. 38. P. 127–140.
- Christiansen E.H., Sheridan M.F., Burt D.M.* The geology and geochemistry of cenozoic topaz rhyolites from the Western United States // Geological Soc. of Amer. Special Paper 205. 1986. P. 1–89.
- Cuney M.* Felsic magmatism and uranium deposits // Bull. Soc. Geol. France. 2014. V. 185. № 2. P. 75–92.
- Dahlkamp F.J.* Uranium deposits of the world. Asia. China Peoples Republic. Springer, Berlin. 2009. P. 493.
- Descriptive uranium deposit and mineral system models. IAEA, Vienna, Austria, 2020. 328 p.
- Dorzhieva O., Krupskaya V., Zakusin S., Sakharov B., Andreva O.* Structural features of hydrothermal illite-smectite in metasomatites at the Antei-Streltsovskoe uranium deposit (Russia) // Proceedings of 55th Annual Meeting of The Clay Mineral Society. 2018. P. 423–424.
- Eby G.N.* The A-type granitoids: a review of their occurrence and chemical characteristics and speculations on their petrogenesis // Lithos. 1990. V. 26. P. 115–134.
- Eby G.N.* Chemical subdivision of the A-type granitoids: petrogenetic and tectonic implications // Geology. 1992. V. 20. P. 641–644.
- Einaudi M.T., Hedenquist J.W., Inan E.* Sulfidation state of fluids in active and extinct hydrothermal systems: Transitions from porphyry to epithermal environments // Giggenbach Volume, Society of Economic Geologists and Geochemical Society, Special Publication 10, Chap. 15. 2003. P. 283–313.

- Geological classification of uranium deposits and description of selected examples. IAEA-TECDOC Series-1842. Vienna, 2018. 415 p.
- Gu Yu. J., Okeler A., Schultz R. Tracking slabs beneath northwestern Pacific subduction zones // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2012. № 331–332. P. 269–280.
- Guo C.L., Mao J.W., Bierlein F., Chen Z.H., Chen Y.C., Li C.B., Zeng Z.L. SHRIMP U-Pb (zircon), Ar-Ar (muscovite) and Re-Os (molybdenite) isotopic dating of the Taoxikeng tungsten deposit, South China Block // *Ore Geol. Rev.* 2011. V. 43(1). P. 26–39.
- Guo J., Li Z., Nie J., Huang Z., Wang J., Lai C.-K. Genesis of Pb-Zn mineralization Beneath the Xiangshan Uranium Orefield, South China: Constraints from H-O-S-Pb isotopes and Rb-Sr dating // *Resource Geology.* 2018. V. 68. P. 275–286.
- Guo Z., Li T., Deng M., Qu W. Key factors controlling volcanic-related uranium mineralization in the Xiangshan Basin, Jiangxi Province, South China: A review // *Ore Geol. Rev.* 2020. V. 122. 103517.
- Henry C.D., Castor S.B., Starker W.F., Ellis B.S., Wolff J.A., Laravie J.A., McIntosh W.C., and Heizler M.T. Geology and evolution of the McDermitt caldera, northern Nevada and southeastern Oregon, western USA // *Geosphere.* 2017. V. 13(4). 47 p.
- Hemley W.R., Jones J. Chemical aspects of hydrothermal alteration with emphasis on hydrogen metasomatism // *Econ. Geol.* 1964. № 1.
- Hu R., Bi X., Zhou M., Peng J., Su W., Leu S., Qi H. Uranium metallogenesis in South China and its relationship to crustal extension during the Cretaceous to Tertiary // *Econ. Geol.* 2008. V. 103. P. 583–598.
- Iiyama J.T. Etude des reactions d'échange d'ions Na-K dans la serie muscovite-paragonite // *Bull. Soc. Fran. Mineral. Cristallog.* 1964. V. 87. P. 532–541.
- Inoue A., Meunier A., Beaufort D. Illite-smectite mixed-layer minerals in felsic volcanoclastic rocks from drill cores, Kakkonda, Japan // *Clays and Clay Miner.* 2004. V. 52. No. 1. P. 66–84.
- Jiang Y.H., Ling H.F., Jiang S.Y., Fan H.H., Shen W.Z., Ni P. Petrogenesis of a late Jurassic peraluminous volcanic complex and its high-Mg, potassic, quenched enclaves at Xiangshan, Southeast China // *J. Petrology.* 2005. V. 46. № 6. P. 1121–1154.
- Keppler H., Wyllie P.J. Role of fluids in transport and fractionation of uranium and thorium in magmatic processes // *Nature.* 1990. V. 348. P. 531–533.
- Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids // *Bull. Geol. Soc. Amer.* 1989. V. 101. P. 635–43.
- Masuda A., Kawakami O., Dohmoto Y., Takenaka T. Lanthanide tetrad effect in nature: two mutually opposite types // *Geochemical Geology.* 1987. V. 21. P. 110–124.
- Matthews A. Influences of kinetics and mechanism in metamorphism: a study of albite crystallization // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1980. V. 44. № 3. P. 387–402.
- Nash J.T. Volcanogenic uranium deposits – geology, geochemical processes, and criteria for resource assessment // U.S. Geological Survey Open File Report 2010-1001. Reston, Virginia, 2010. 99 p.
- Petrov V.A., Poluektov V.V., Hammer J., Schukin S.I. Fault-related barriers for uranium transport // *Uranium Mining and Hydrogeology.* B.J. Merkel, A. Hasche-Berger (edit.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. P. 779–789.
- Petrov V.A., Golubev V.N., Golovin V.A. An unique uranium mineralization in pillow lavas, Dornot ore field, Mongolia // *Proceedings of the International Conference “Uranium geochemistry 2003”, 13–16 April, 2003, Nancy, France.* P. 289–292.
- Peyffert C., Chink N.T., Cuney M. Uranium in granitic magmas // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1995. V. 60. № 9. P. 1515–1529.
- Pirajno F. The geology and tectonic settings of China's mineral deposits. Springer Dordrecht-Heidelberg, 2013. 679 p.
- Shao J.A. Extension structure of orogen and asthenosphere upwelling – a case study of the Xing'an-Mongolia orogenic belt // *Chin. Sci. Bull.* 1994. № 39. P. 533–537.
- Sillitoe R. Porphyry copper systems // *Econ. Geol.* 2010. V. 105. № 1. P. 3–41.
- Timofeev A., Migdisov A.A., Williams-Jones A.E., Roback R., Nelson A.T., Hongwu Xu. Uranium transport in acidic brines under reducing conditions // *Nature Communications.* 2018. V. 9. 1469. P. 1–7.
- Uranium deposits in volcanic rocks. Panel proceedings series. IAEA, Vienna, 1985. 468 p.
- Wan T. The Tectonics of China: Data, Maps and Evolution. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010. 508 p.
- Whalen J.B., Currie K.L., Chappel B.W. A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis // *Contrib. Miner. Petrol.* 1987. V. 95. P. 407–419.
- World uranium geology, exploration, resources, and production. IAEA, Vienna, Austria, 2020. 988 p.
- Xu D., Chi G., Zhang Y., Zhang Z., Sun W. Yanshanian (Late Mesozoic) ore deposits in China – an introduction to the special issue // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 88. P. 481–490.
- Yang S.Y., Jiang S.Y., Jiang Y.H., Zhao K.D., Fan H.H. Zircon U-Pb geochronology, Hf isotopic composition and geological implications of the rhyodacite and rhyodacitic porphyry in the Xiangshan uranium ore field, Jiangxi Province, China // *Science China Earth Sciences.* 2010. V. 53. P. 1411–1426.
- Yao H., Lu G., Nie J., Zheng G., Cao X., Xu P., Zhang F., Zhu S. Characteristics of mineralizing alteration and hydrothermal sources in Zoujiashan uranium deposits in Xiangshan uranium ore field in Jiangxi Province // *Geoscience.* 2013. V. 27 (2). P. 332–338 (in Chinese with English abstract).
- Yu Z., Ling H., Mavrogenes J., Chen P., Chen W., Fang Q. Metallogeny of the Zoujiashan uranium deposit in the Mesozoic Xiangshan volcanic-intrusive complex, southeast China: Insights from chemical compositions of hydrothermal apatite and metal elements of individual fluid inclusions // *Ore Geol. Rev.* 2019. V. 113. 103085.
- Yu Z.Q., Chen W.F., Chen P.R., Wang K.X., Fang Q.C., Tang X.S., Ling H.F. Chemical composition and Sr isotopes of apatite in the Xiangshan A-type volcanic-intrusive complex, Southeast China: New insight into petrogenesis // *J. Asian Earth Science.* 2019. № 172. P. 66–82
- Zhang J.H., Gao S., Ge W.C., Wu F.Y., Yang J.H., Wilde S.A., Li M. Geochronology of the Mesozoic volcanic rocks in the Great Xing'an Range, northeast China: implications for subduction-induced delamination // *Chem. Geol.* 2010. № 276. P. 144–165.