

УДК 551.2:553.49:550.4:551.2:550.428

## ХАРАКТЕР МАГМАТИЗМА, ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ И ФИЛЬТРАЦИОННО-ТРАНСПОРТНЫХ ПРОЦЕССОВ В УРАНОНОСНЫХ ВУЛКАНОГЕННЫХ СТРУКТУРАХ

© 2023 г. В. А. Петров<sup>a</sup>, \*, О. В. Андреева<sup>a</sup>, В. В. Полуэктов<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, Старомонетный пер., 35, Москва, 119017 Россия

\*e-mail: vlad243@igem.ru

Поступила в редакцию 03.05.2023 г.

После доработки 08.06.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

Создание уточненной концептуальной модели формирования урановых месторождений вулканогенного типа включает в себя исследования характера магматических, гидротермально-метасоматических и фильтрационно-транспортных процессов, а также физико-химических условий переноса и отложения урана. Эти вопросы рассмотрены нами на примерах Стрельцовской кальдеры и одноименного рудного поля в Восточном Забайкалье, Сианшаньской (Xiangshan) вулканической структуры в Южном Китае и кальдеры МакДермитт (McDermitt) на западе США (штаты Орегон и Невада). По классификации МАГАТЭ [Geological Classification ..., 2018] эти рудные поля и месторождения относятся к вулканогенному (volcanic-related) типу, а в Стрельцовском и Сианшаньском рудных полях наблюдается сочетание вулканогенного в чехле и гранитного (granite-related) в фундаменте типов месторождений. Основная часть промышленных месторождений урана вулканогенного типа в перечисленных регионах формировалась в течение мезозойской и кайнозойской эпох (хотя в мире известны более древние, палеозойские, объекты). Несмотря на разные временные интервалы образования рудоносных вулканогенных построек, многие черты проявлений в них магматических, гидротермальных и фильтрационно-транспортных процессов весьма близки. Предполагается, что эти особенности обусловлены общим влиянием внутриплитных тектонических режимов или эволюцией внешних частей зон океан-континент, где магматическая активность продуцировала вулканизм бимодальной серии в преобладающей последовательности базиты — кислые вулканы — базиты, а миграция уранотранспортирующих флюидов задавалась солидарным воздействием сейсмогеодинамических и термоконтрактивных процессов.

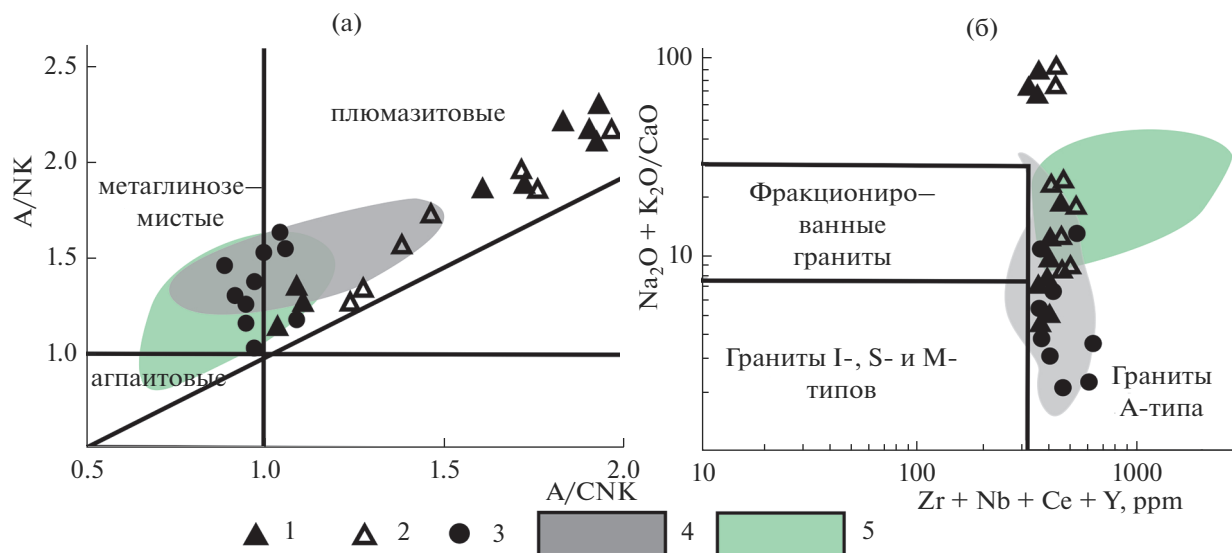
**Ключевые слова:** вулканогенные урановые месторождения, внутриплитные геодинамические режимы, фильтрационно-транспортные процессы, сейсмогеодинамические и термоконтрактивные процессы, околорудные метасоматиты, кислотные и низкокислотные фации метасоматитов

DOI: 10.31857/S0203030623700281, EDN: FMFGTV

### МАГМАТИЗМ УРАНОНОСНЫХ КАЛЬДЕР И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЧЕРТЫ ВМЕЩАЮЩИХ ОРУДЕНЕНИЕ ИНТРУЗИВНЫХ И ВУЛКАНИЧЕСКИХ ПОРОД

Большинство исследователей признают ведущую роль в урановом рудообразовании магматических пород кислого субщелочного состава (как эффузивных, так и интрузивных разной степени абиссальности), имеющих вышекларковые содержания урана, а также и других некогерентных и рудных элементов: Mo, Cu, Au, Ag, Pb, Zn, Sn, W, Li и др. [Cuney, 2014; Henrey et al., 2017]. Субщелочные (peralkaline) эффузивные и субвулканические породы распространены в разных по возрасту областях континентального вулканизма

Земли, в пределах континентальных рифтогенных систем, а также в тыловых частях Тихоокеанского активного вулканического кольца [Магматические ..., 1987; Геохимия ..., 1984; Cuney, 2014]. Они формируют основной объем кальдер мезозойско-кайнозойского и более древних возрастов. Их отличительной особенностью является обогащенность летучими компонентами и, прежде всего, фтором (что особенно отчетливо выражено в Восточном Забайкалье и в Монголии). Породы калиевой серии являются вмещающими и, возможно, имеют парагенетические взаимосвязи с разнообразными, кроме урана, полезными ископаемыми (Au, Mo, Cu, Ag) во многих рудных районах (Перу, Боливия, Западные штаты США, Юго-Восточный Китай, Забайкалье, Хинган



**Рис. 1.** Составы кислых и субщелочных эффузивных пород Стрельцовой кальдеры, а также Сианшань и МакДермитт [Петров и др., 2022], на диаграммах  $A/CNK$ – $A/NK$ , (по [Maniar, Piccoli, 1989]),  $A/CNK = Al/(Na + K + 2Ca)$ ,  $A/NK = Al/(Na + K)$  (а) и дискриминационная диаграмма (по [Whalen et al., 1987]) с данными по составам эффузивов кальдер Стрельцовой (значки), Сианшань и МакДермитт (в виде полей составов) (б).

1, 2 – риолиты Стрельцовой кальдеры, 3 – жильные и субвулканические сиениты и кварцевые монцитоны той же кальдеры, 4 – риолиты и риодациты структуры Сианшань, 5 – риолиты и игнимбриты кальдеры МакДермитт.

и Аргунская зона Северо-Восточного Китая и др.) [Геохимия ..., 1984; Спиридонов и др., 2006; Xu et al., 2013; Gou et al., 2019]. По ряду геохимических характеристик эти породы соответствуют гранитам А-типа (“анорогенные граниты” по [Eby, 1990]) (рис. 1).

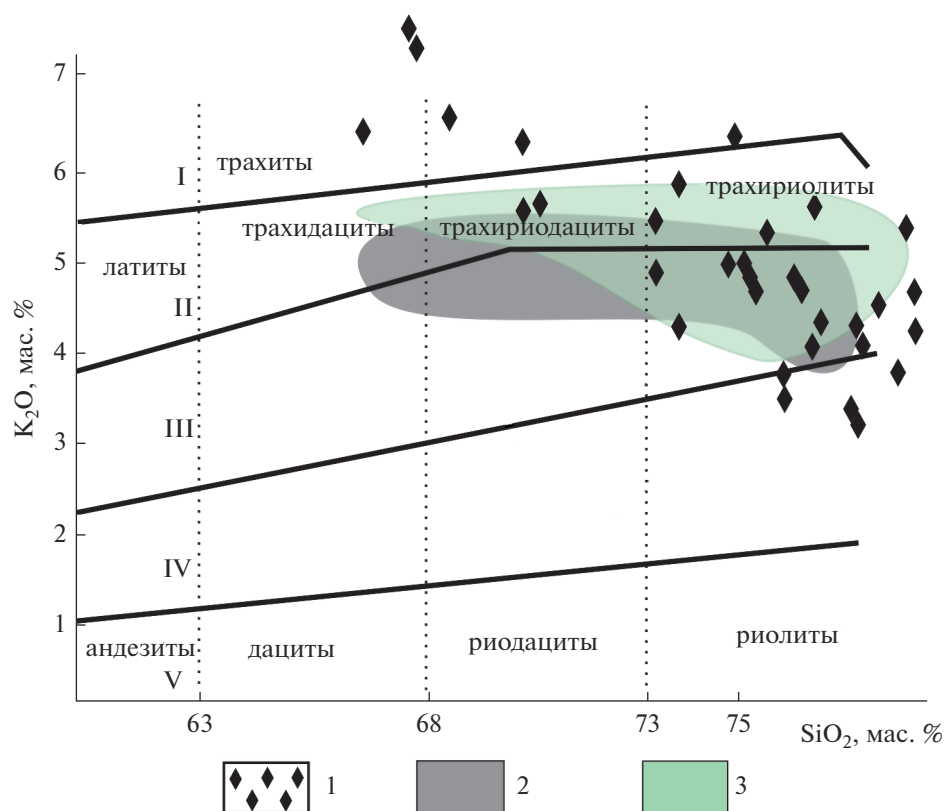
Метаалюминиевые, умеренно пералюминиевые и субщелочные (peralkaline) калиевые риолиты, трахириолиты, трахириодациты, а также экструзивные сиениты, кварцевые сиениты, реже риолитовые дайки и купола, относящиеся к этому типу магматических пород характерны практически для всех регионов распространения вулканогенных месторождений урана в Восточном Забайкалье, Юго-Восточном Китае, в западных штатах США и некоторых других регионах проявлений мезозойско-кайнозойской и более древней магматической активности.

Предполагается, что пералкалиновые расплавы, обладающие высокой степенью поляризации, легко растворяют высокозарядные некогерентные элементы (U, Th, Zr, REE, Nb и др.) [Peiffert, 1996; Cuney, 2014 и др.], и в ходе дифференциации этих магм перечисленные элементы осаждаются, входя в состав акцессорных минералов, в том числе и уранинита. В дальнейшем уран в благоприятной структурно-тектонической среде выщелачивается из этих минералов метеорными или гидротермальными окислительными водами и при наличии восстановителей может образовывать скопления урановых руд. Кроме того, уран легко выщелачивается из стекловатого матрикса эффу-

зивных, обогащенных калием пород, часто содержащих вышекларковые количества урана. В связи с вулканами пералюминиевого состава известно только незначительное количество объектов, среди которых можно упомянуть небольшое месторождение Макусани (Перу), локализованное в игнимбритах кислого риолитового состава, и бериллиевое месторождение Спор Маунтин (США), где урановая минерализация имеет подчиненное значение. Существенно калиевый тип вулканитов ураноносных вулканических построек отчетливо выражен на классификационной диаграмме калий–кремнезем (рис. 2).

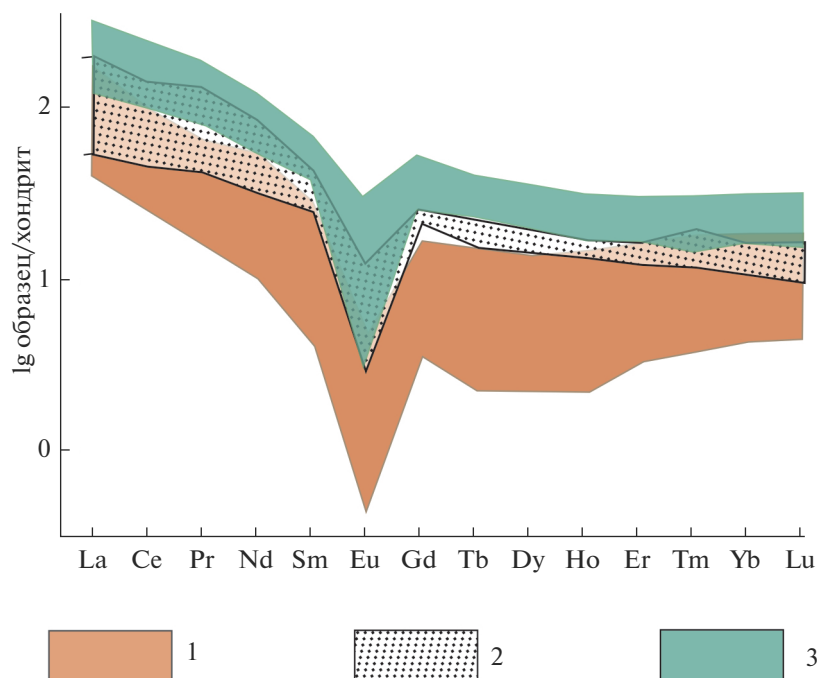
Вулканические породы кислого состава ураноносных кальдер значительно обогащены несовместимыми элементами, Li, Rb, Ta, U, а также F при резком снижении Ba и Sr, относительно верхней континентальной коры. На спайдер-диаграммах кислых и субщелочных пород Стрельцовой кальдеры [Петров и др., 2017; Андреева и др., 2020] и кальдер Сианшань [Jiang et al., 2005; Yang et al., 2010; Bonnetti et al., 2020] и МакДермитт фиксируются минимумы Ba, Sr, Eu, Ti, вероятно, связанные с фракционированием из расплава полевых шпатов, титаномagnetита или сфена. Высокая степень фракционирования для риолитов, риодацитов, трахириолитов, а также экструзивных сиенитов и кварцевых сиенитов, выражена также в обогащении их LREE и отчетливой отрицательной Eu аномалией (рис. 3).

Общие содержания урана в риолитах Стрельцовой кальдеры колеблются от 4 до 23 ppm по на-



**Рис. 2.** Диаграмма K<sub>2</sub>O-SiO<sub>2</sub> для пород завершающей фазы вулканизма кальдер Стрельцовой (1), Сианшань (2), МакДермитт (3).

I-V – серии пород: I – калиевая щелочная, II – субщелочная (латитовая, шошонитовая), III – высококалиевая известково-щелочная, IV – известково-щелочная, V – толеитовая. Классификация – по [Pescerillo, Taylor, 1976].



**Рис. 3.** Спектры РЗЭ для вмещающих пород кислого и субщелочного составов в ураноносных структурах Стрельцовой, Сианшань и МакДермитт.

1 – Стрельцовская кальдера, 2 – структура Сианшань, 3 – кальдера МакДермитт (по [Петров и др., 2022]).

шим 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]. Сведения о еще более высоких содержаниях урана в стеклах кислого состава содержатся в работе [Gray et al., 2011], где сообщается о значительном обогащении ураном остаточных расплавных включений в позднепалеозойских риолитах мелкого U-месторождения в штате Брансвик в Канаде. Во включениях из вкрапленников полевых шпатов содержание урана достигают 34 ppm, а в остаточных расплавах в вакуолях стекловатой основной массы оно возрастает до 95 ppm. По-видимому, обогащенные ураном стекловатые матрицы эффузивных пород, легко теряющие его при любых поствулканических преобразованиях, старении и раскристаллизации, действительно могут служить одним из его источников (наряду с интрузивными телами и кристаллическими породами основания вулканических сооружений) [Пэк и др., 2020; Petrov et al., 2022]. Однако этот процесс может состояться только в благоприятной структурно-геологической обстановке, которая допускает интенсивное проникновение окисленных вод метеорного происхождения, а также и смешения их с гидротермальными флюидами внутри значительных объемов вмещающих пород разного: эффузивного, метаморфического (в основании кальдер) или интрузивного состава. Вопросу взаимосвязи магматизма ураноносных кальдер и процессов миграции рудоносных растворов ниже посвящен специальный раздел статьи.

Возможность извлечения урана из пород с выше- и близкларковыми содержаниями урана и формирования так называемых “рабочих” растворов, из которых могут откладываться оксиды и силикаты урана (при наличии восстановителей  $U^{+6}$ ), вполне доказана рядом экспериментальных работ (см. ниже). Вероятно, формирование руд других металлов (Mo, Cu, Ag, Au и пр.), свойственное тем же областям континентального вулканизма, не требует предварительного выщелачивания их из вмещающих пород и осуществляется согласно иным механизмам (этот вопрос находится вне обсуждения в настоящей работе).

Происхождение обогащенных калием вулканитов ураноносных кальдер (риолитов, риодацитов, трахириолитов) исследователями трактуется несколько различно. Так, для Сианшаньского рудного поля [Jiang et al., 2005; Cuney, 2014] предполагалось их образование путем частичного плавления главным образом чарнокитовой нижней коры в условиях субдукции и возможном внедрении разогретого мантийного материала. В дальнейшем [Bonnetti et al., 2020; Guo et al., 2020] в качестве еще одного источника рассматривалась возможность частичного плавления метаморфического фундамента вулканического сооружения ме-

зозой-палеозой-протерозойского возраста. Для Стрельцовой кальдеры изучение изотопно-геохимического (Nd и Sr) состава вмещающих оруденение пород показало, что наиболее обогащенные ураном калиевые риолиты являются скорее всего поздними кислыми дифференциатами латитовой серии магматитов, но, возможно, отчасти наследуют и составы континентальной коры [Коваленко и др., 2014, 2015].

Изотопное датирование в ближайших к Стрельцовой кальдере районах развития редкометальных Li-F гранитов и их субвулканических аналогов (145.7–140.6 млн лет) послужило одной из причин появления гипотезы об общем как для кислых эффузивов Стрельцовой кальдеры, так и для редкометальных гранитов очаге, индуцировавшем также и урановое оруденение [Лаверов и др., 2012]. Однако эволюционные процессы в позднеюрских-раннемеловых лейкократовых и редкометальных Li-F гранитах кукульбейского комплекса, как показано многими исследованиями (см. ссылки в работах [Андреева и др., 2020; Петров и др., 2022]), привели в итоге к заметному обогащению пород некоторыми редкими элементами (Ta, Nb, Li, Be) и не имели существенного значения для концентрирования урана. Этот элемент, по-видимому, остается в основном в малоподвижном ( $U^{IV}$ ) состоянии в составе акцессорных минералов биотитовых и двуслюдяных гранитов восстановленного (ильменитового) типа, к которому и относятся гранитоиды кукульбейского комплекса. При дальнейшем застывании магматических тел  $U^{IV}$  в восстановительных гидротермальных (ниже 500°C) условиях умеренной кислотности не образует растворимых соединений и не способен к интенсивной миграции.

## МЕТАСОМАТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВНУТРИ УРАНОНОСНЫХ КАЛЬДЕР

Постоянной и повторяющейся во многих рудоносных кальдерах особенностью урановых месторождений вулканогенного типа является широкое распространение в них почти всего спектра низкотемпературных метасоматитов, известных в рудных месторождениях эндогенного типа. Особенно интенсивно гидротермальная проработка пород выражена в Стрельцовой кальдере, хотя с теми или иными вариациями аналогичные гидротермальные преобразования развиты повсеместно и не обязательно являются свойством только урановых месторождений. Мощности измененных пород в Стрельцовой кальдере достигают десятков, иногда — первых сотен метров, и абсолютно свежие неизменные разности вмещающих пород обнаруживаются с большим трудом.

Для метасоматических процессов в ураноносных кальдерах возможно выделение трех основ-



ных 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. Для большинства месторождений Стрельцовского и Сианшанского рудных полей характерно развитие обширных и протяженных (до первых километров) ореолов иллитовых изменений вулканогенных и вулканогенно-осадочных пород. Главным типоморфным минералом метасоматитов являются смешанослойные иллит-сметиты преимущественно с незначительным (до 15%) содержанием разбухающих межслоев, которые особенно характерны для месторождений в восточной части Стрельцовской кальдеры. Судя по литературным источникам, в Сианшанском рудном поле преобладают серициты и слаборазбухающие иллиты. В кальдере МакДермитт большее распространение имеют глинистые минералы. Одна из отличительных особенностей дорудных метасоматитов состоит в незначительном содержании пирита, а имеющееся Fe связано в карбонатах, анкерите или сидерите. Метасоматиты ультракислого типа для дорудных метасоматитов не характерны, хотя единичные находки алунита в них вполне возможны, что является результатом окисления сульфидов или, что менее вероятно, присутствием в виде реликтовых остатков приповерхностных гидротермальных преобразований.

2) Рудосопровождающие преобразования – альбитизация, карбонатизация, флюоритизация, бертьеринизация (бертьерин –  $7 \text{ \AA}$  химический аналог Fe-хлорита) и окварцевание во многих случаях совпадают по времени с собственно рудными стадиями. Из них наибольшее значение как индикатор урановой минерализации имеет альбитизация. Она предшествует массовому формированию основного уранинит-настуранового оруденения и сопряжена с отложением браннерита при подчиненном значении настурана и еще более редкого ураноторита [Андреева и др., 2022]. Наиболее контрастные проявления альбитового метасоматоза, имеющего как метасоматический, так и метасоматически-прожилковый характер, известны на урановых месторождениях Стрельцовского (Восточное Забайкалье) и Сианшанского (Южный Китай) рудных полях, но альбит также обнаружен и в других месторождениях урана жильного типа разных регионов и возрастов (сводка в работе [Андреева и др., 2022]). Спутником урановых минералов (браннерита) могут быть торийсодержащие минералы, причем в месторождениях Сианшаня содержания тория достигают 1900 ppm [Bonnetti et al., 2020]. Появлению альбитовых метасоматитов низкотемпературного (около  $200^\circ\text{C}$ ) типа и миграции урана и

тория благоприятствуют условия повышенной щелочности и активности Na во флюиде. Этому способствуют также явления сейсмотектоники, включая приоткрывание разломно-трещинных систем, резкий сброс давления (декомпрессия) и дегазация, которые сопровождаются интенсивным выщелачиванием Na из вмещающих пород. Дегазация, кроме того, сопровождается резким скачком значений pH флюида. При этом в натровой щелочной среде, вероятно, могут образовываться легкоподвижные комплексные соединения натриевых трикарбоната урана и тетра- и пентакарбонатов тория, которые, разрушаясь, способствуют выпадению минералов урана и тория. В наиболее изученной Стрельцовской кальдере на уровнях ниже 1800 м от современной поверхности альбитовые метасоматиты не встречены. Основная рудная стадия с настураном и коффином развивается позже и сопровождается формированием ореолов и прожилков разнообразных, преимущественно железистых, карбонатов, бертьерина, гематита, флюорита.

3) Пострудные изменения, которые выражены в развитии глинистых минералов: смектитов, каолинита, диккита, смешанослойных минералов, Li-тосудита, бертьерина, а также карбонатов, адюляра, цеолитов. Например, проявления смешанослойного Li-тосудита более характерны для западной части Стрельцовской кальдеры (Аргунское месторождение), где содержания  $\text{Li}_2\text{O}$  в глинистой фракции измененных пород (тосудит  $\pm$  каолинит, смектит) достигает 0.7 мас. %.

Главные каналы поступления гидротерм чаще всего располагались во внутренних частях ураноносных кальдер, что справедливо для Стрельцовского рудного поля и, отчасти, кальдеры МакДермитт, и были связаны с жерлами отдельных вулканов. Участки развития низкотемпературных аргиллизитов в Стрельцовской кальдере более характерны для ее периферических зон и проявляются спорадически при режиме растекания основных флюидопотоков в условиях последовательного центростремительного приоткрывания флюидопроводящих структур. Этот тектонодинамический механизм в деталях описан также для Дорнотской вулканотектонической структуры в Монголии [Petrov et al., 2022]. Однако, в Сианшанском рудном поле концентрация рудных тел и вмещающих их метасоматитов происходит по периферии и в северо-западной части, что, вероятно, связано со сложным мозаично-блоковым строением вмещающего вулканокупольного сооружения.

#### ПРОЦЕССЫ МИГРАЦИИ РУДООБРАЗУЮЩИХ ФЛЮИДОВ В ВУЛКАНОГЕННЫХ СТРУКТУРАХ

В настоящее время происходят знаковые изменения в алгоритме обоснования поисково-раз-

ведочных работ на уран от “классической” описательной структурно-формационной классификации МАГАТЭ, содержащей 15 типов, 37 подтипов и 14 классов урановых месторождений [Geological Classification ..., 2018], к геолого-генетическим моделям месторождений (моделям урановых минеральных систем) с акцентом выявления состава и свойств рудоносных флюидов [Descriptive Uranium ..., 2020]. Геолого-генетические модели, основанные на минерально-системном подходе, открывают новую страницу в урановой геологии и создают новые перспективы в поисках и разведке минеральных ресурсов и воспроизводству минерально-сырьевой базы для ядерной энергетики России.

Концепция минеральных систем была предложена в работе [Wyborn et al., 1994, p. 109] в качестве мультидисциплинарного подхода, ориентированного на анализ “всех геологических факторов, которые контролируют формирование и сохранность минеральных месторождений, с особым вниманием к процессам мобилизации рудных компонентов из их источника, транспортирования и аккумуляции в более концентрированной форме и сохранности в последующей геологической истории”.

Методология минеральных систем успешно использовалась при анализе условий формирования рудных месторождений различных генетических типов [Pirajno, 2009, 2016; Hagemann et al., 2016; Huston, 2016]. В приложении к металлогении урана она была сформулирована в работе [Skirrow et al., 2009, p. 2, 17] для группировки минеральных систем урановых месторождений по параметрам, “подчеркивавшим общие черты в процессах формирования урановых месторождений”, с особым вниманием к условиям транспорта урана водными флюидами, т. к. “в формировании почти всех крупных месторождений урана участвовали водные флюиды ... различия в геологических обстановках формирования флюидов и путях их миграции предопределяли разнообразие типов урановых месторождений”. Принятая в работе [Skirrow et al., 2009] систематизация параметров урановых минеральных систем конкретизирует известную парадигму “источник → транспорт → отложение” с акцентом на процессах флюидного массопереноса.

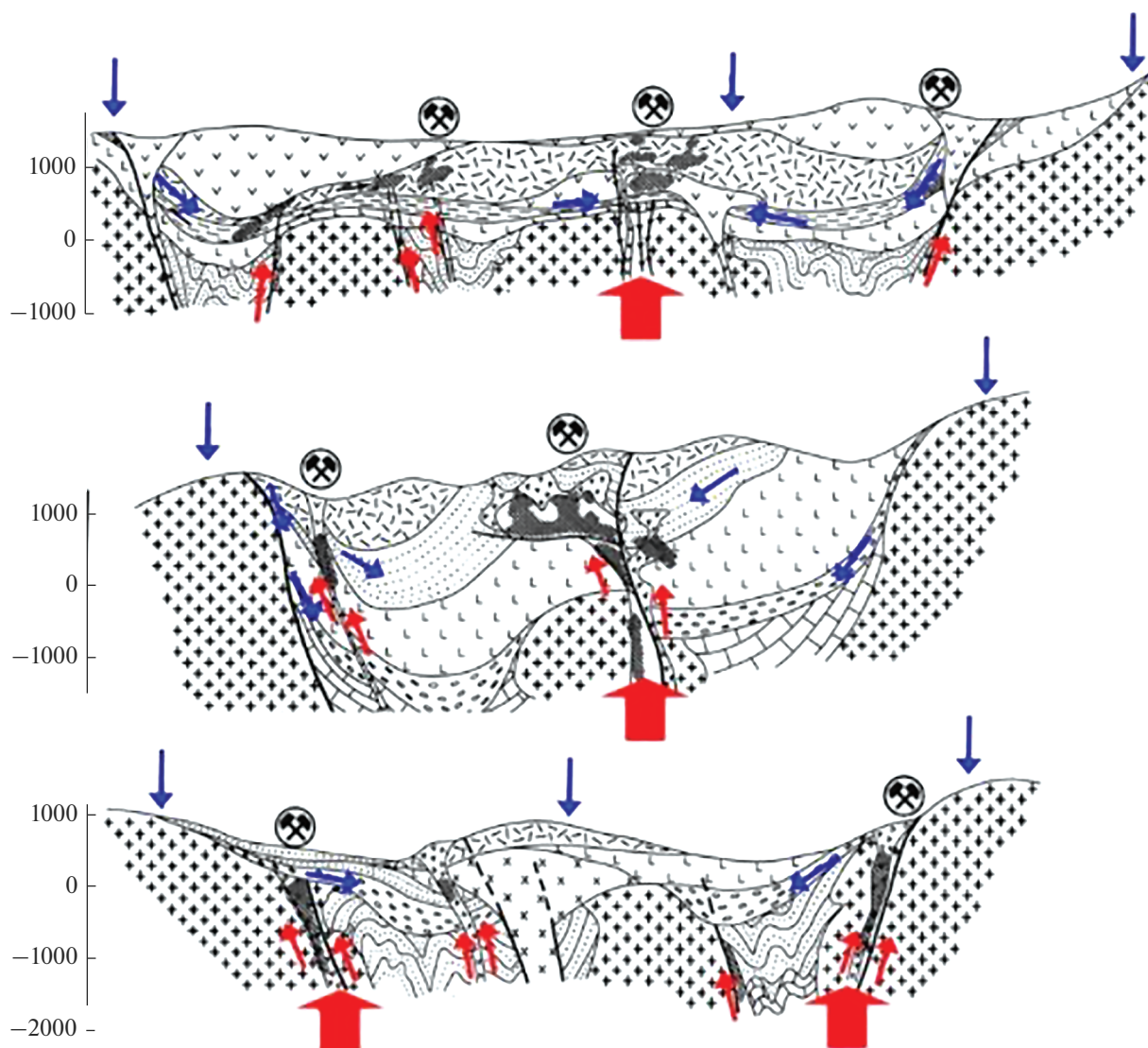
Наряду с этим практика применения минерально-системного подхода показала, что одной из нерешенных фундаментальных проблем уранового рудообразования является часто наблюдаемое в ураноносных минеральных системах смешение рудообразующих флюидов магматогенной, метаморфогенной и метеорной природы [Descriptive Uranium ..., 2020]. Так, например, в формировании крупнотоннажных месторождений вулканогенного типа, относимых к системам, связанным с магматизмом, принимают участие не только магма-

тические и магмато-гидротермальные флюиды, но также метеорные и морские воды. Это “роднит” ураноносные вулканогенные минеральные системы (магматогенные) с осадочными и приповерхностными системами, включающими калькриты, месторождения песчаникового типа и типа структурных несогласий.

Наш подход к решению проблемы смешения рудообразующих флюидов в ураноносных минеральных системах вулканогенной природы состоит в реконструкции солидарного развития флюидодинамических и сейсмогеодинамических процессов при учете механизмов тепломассопереноса и структурообразующей роли напорных флюидов.

Одной из пионерских работ, посвященных взаимодействию гидротермальных, метеорных и базальных растворов в напорных гидродинамических палеоартезианских урановых рудообразующих системах областей континентального вулканизма, является работа Н.П. Лаверова и И.В. Чернышева [1977]. Была выдвинута гипотеза генетической связи вулканизма и рудообразования, согласно которой “магматические очаги, на раннем этапе своего развития поставляющие вулканический материал, на стадии консолидации являлись источником урана, фтора, молибдена и других сопутствующих компонентов молибден-урановых месторождений”. При этом палеогидродинамические обстановки рудообразования связаны с “термоартезианскими системами вулканических депрессий, определявшими условия мобилизации рассеянных рудных компонентов, их миграцию и положение полей разгрузки продуктивных гидротерм”. Иллюстрацией гипотезы (рис. 4) служили материалы по рудным районам, локализованным в депрессиях вулканического происхождения, субвулканических, гипабиссальных интрузивах и вулканических куполах кислых-субщелочных пород кальдерных построек (Бабайтагский, Чаулийский и Стрельцовский районы), обобщенные в докторской диссертации Н.П. Лаверова [1972].

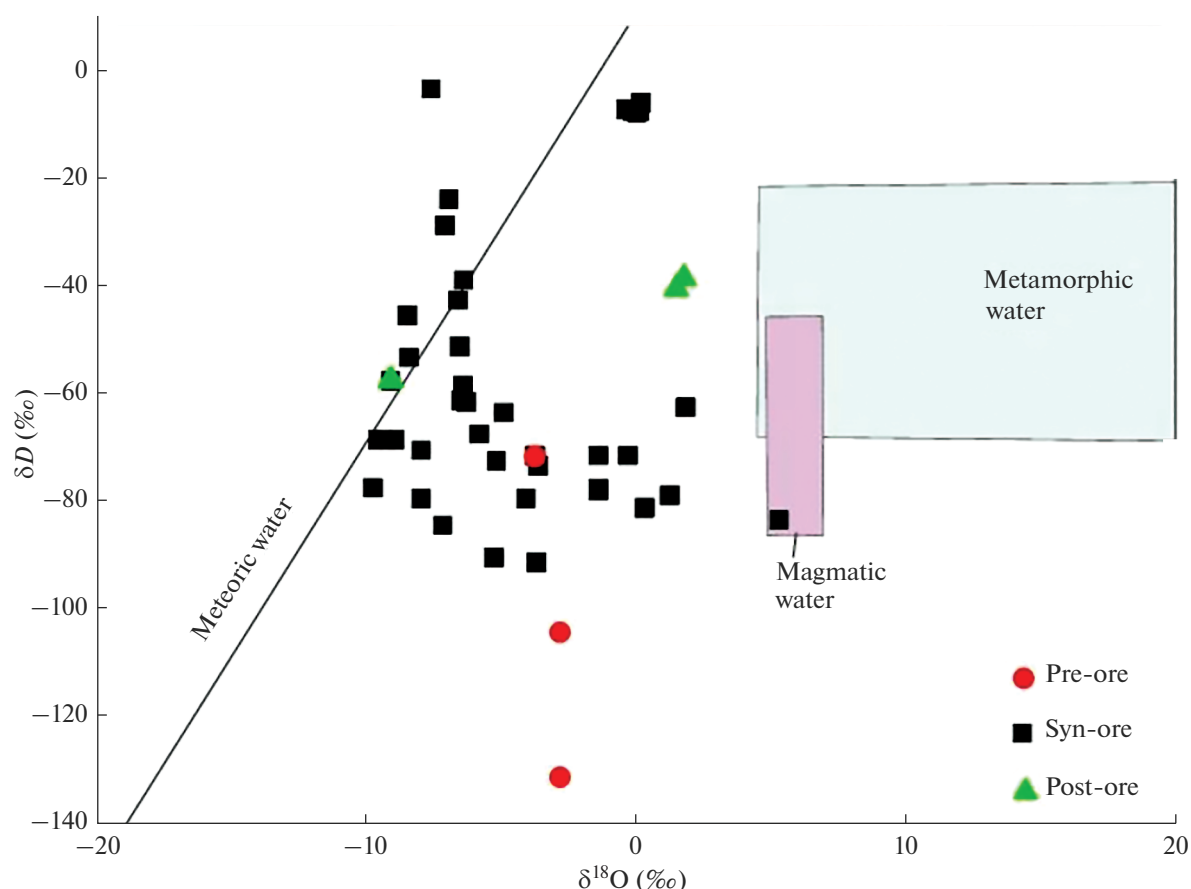
Важная роль флюидов метеорной природы в рудообразовании установлена для урановых месторождений вулканогенного типа в Сианшаньском рудном поле [Guo et al., 2020]. В этой работе показано, что, хотя точная последовательность геологических событий является дискуссионным вопросом, но большинство исследователей сходится во мнении, что месторождения урана в бассейне Сианшань — это структурно-контролируемая гидротермальная минерализация, сформированная в рудовмещающих вулканических породах ~125–70 млн лет назад со значительным отрывом (>10 млн лет) от завершающих стадий вулканической деятельности. Вклад вулканических пород в рудообразование состоит в том, что они выступают в качестве одного из источников урана из-за относительно высокого его содержания. Такая



**Рис. 4.** Контроль разрывными нарушениями потоков гидротермальных (красные стрелки) и метеорных (синие стрелки) растворов, взаимодействие которых приводит к рудообразованию в напорных термоартезианских системах вулканотектонических структур (по [Лаверов, 1972]).

модель подразумевает извлечение урана из вулканических пород кислородсодержащими растворами, проникающими по ранее сформированным разломам, которые за счет реактивации в обстановке рифтогенного растяжения получают гидравлическую связь с поверхностью. Наличие разрывных структур, формирующихся в вулканическом бассейне, является важным фактором, контролирующим поток рудообразующих флюидов. Проведен детальный анализ материалов по природе рудоносных флюидов, включая метеорные воды и магматический флюид. Показано преимущественно метеорное происхождение рудообразующего флюида, о чем свидетельствуют изотопные данные по водороду и кислороду (рис. 5).

Таким образом, минерализация урана в Сианшане связывается с проникновением и глубокой циркуляцией метеорных вод, взаимодействующих с вулканическими породами, тогда как первичным магматическим флюидам отводится незначительная роль в процессах минералообразования. Наряду с этим указывается, что данные по изотопии кислорода были в основном расчетными, а не измеренными. Это вносит существенную неопределенность в их интерпретацию из-за различных выбранных уравнений фракционирования изотопов кислорода в растворах, а также использованных средних температур гомогенизации по включениям в минералах.



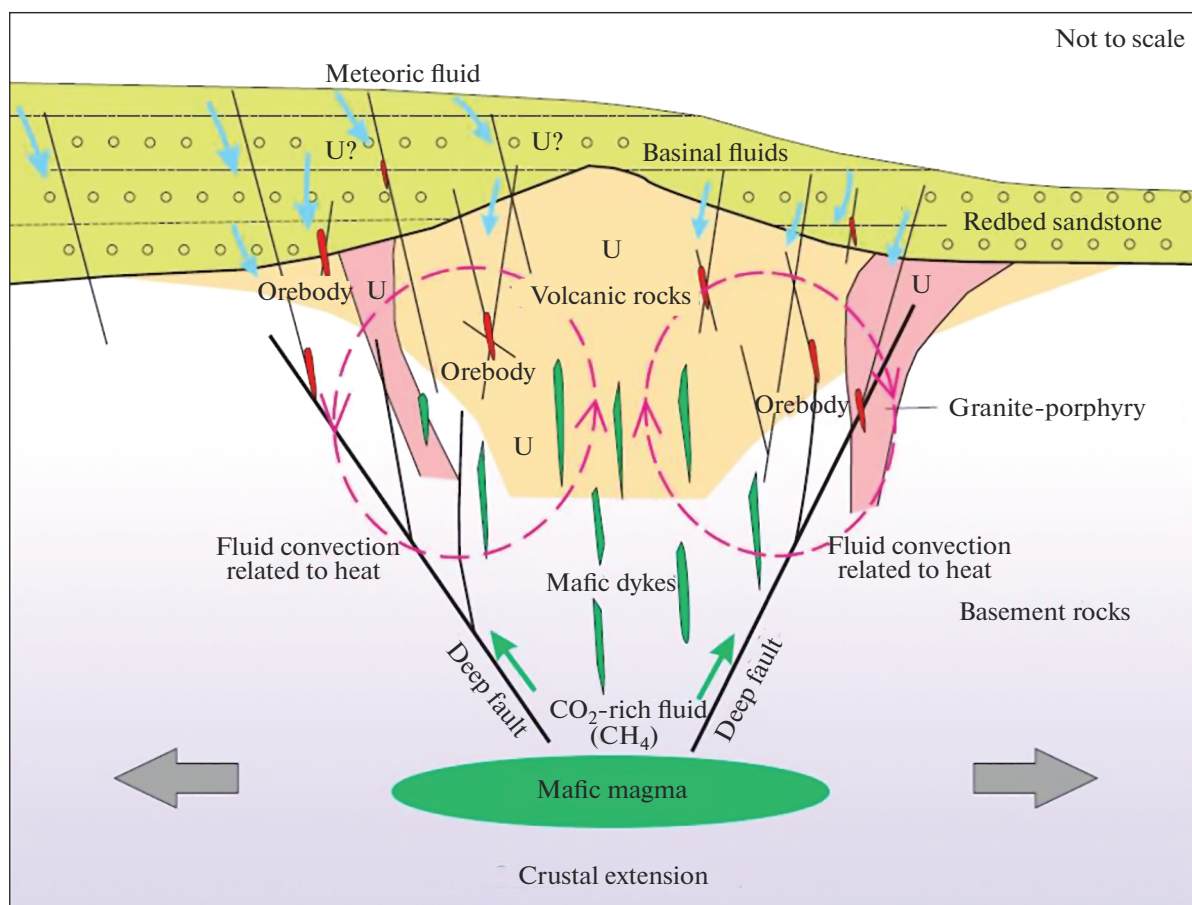
**Рис. 5.** Изотопия флюидов, ассоциирующих с урановой минерализацией в Сианшаньском рудном поле, иллюстрирующая тот факт, что рудообразующие флюиды имеют метеорную природу (по [Guo et al., 2020]). Pre-ore, syn-ore и post-ore – дорудная, синрудная и пострудная минерализация соответственно.

В последнее время получила развитие иная точка зрения, основанная на тесной пространственно-временной взаимосвязи между красноцветами в бассейнах накопления осадков и урановой минерализацией в Южном Китае. Так, в работе [Chi et al., 2020] предполагается, что рудообразующие флюиды являются базальными. Прежде чем проникнуть в нижележащие вулканические породы и выщелачивать уран в результате реакции флюид-порода, метеорные воды, возможно, сначала накапливались в осадочном бассейне с красноцветами, где эволюционировали в высокосолёные окисляющие флюиды, богатые Cl из-за реакции с эвапоритами (гипс и соль). Это подтверждается LA-ICP-MS анализом флюидных включений во флюорите и кварце в урановых рудах месторождения Зуиашань, показавшим обогащённость флюида Cl и U (12.7–58.5 ppm) при относительно высокой летучести кислорода.

Обзор геологических материалов по урановым месторождениям Сианшаньского рудного поля, предпринятый в работе [Guo et al., 2020], привел к выводу о том, что ключевые факторы, контролирующие урановую минерализацию, связаны с

сочетанием малоглубинных (развитие окислительных флюидов в толще красноцветов и разрывные структуры в вулканических породах) и глубинных (термическая активность, связанная с основным магматизмом) геологических процессов. Предполагается, что метеорные воды проникали в высокопроницаемые горизонты красноцветов и в обстановке бассейна накопления превращались в кислородсодержащие высокосолёные базальные растворы. Окисляющие флюиды далее циркулировали в вулканическом бассейне по разрывным структурам и извлекали уран из вулканических пород. Тепло, выделяемое внутрикоровым очагом магмы основного состава, в результате тепловой конвекции на восходящей ветви перемещали флюиды из глубоких источников, а на нисходящей ветви способствовали вовлечению метеорных и базальных растворов в процесс рудообразования (рис. 6).

Таким образом, циркуляция рудообразующего флюида в минеральной системе вулканогенных месторождений Сианшаньского рудного поля может быть обусловлена флюидопотоками, перемещение которых в пространстве и времени



**Рис. 6.** Концептуальная модель рудообразования для урановых месторождений Сианшаньского рудного поля, показывающая, что толщи красноцветных пород и верхнекоровый магматический очаг являются элементами минеральной системы, задаваемой свободной тепловой конвекцией флюидов разной природы [Guo et al., 2020].

определяется такими факторами, как тектонические преобразования пород и тепловая конвекция флюидов [Chi et al., 2020].

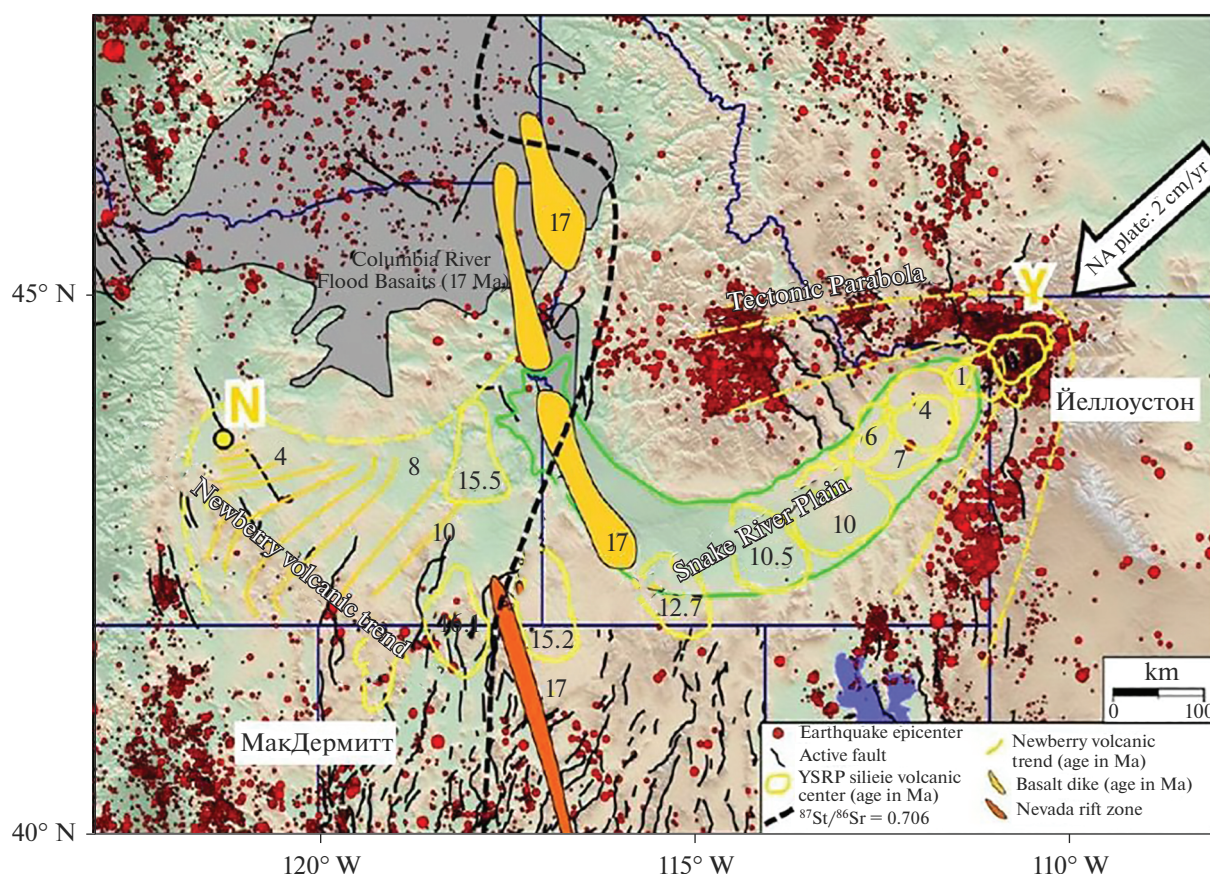
Яркой иллюстрацией функционирования подкальдерного очага кристаллизующейся магмы, генерирующей магматические флюиды, которые смешиваются с гидротермальными флюидами, и, мигрируя вверх по восстанию единым потоком, взаимодействуют с метеорными водами в результате термоконвекции, происходящей на фоне интенсивно развивающихся сеймотектонических процессов, являются материалы по урановмещающей кальдере МакДермитт. Она находится на ЮЗ фланге трассы Йеллоустонской горячей точки и приурочена к западному крылу субмеридионально ориентированной Невадской рифтовой зоны в области ее замыкания (рис. 7).

Интеграция геофизических и геологических данных, приведенных в работах [Pierce, Morgan, 2009; Smith et al., 2009; Henry et al., 2017], показывает, что горячая точка Йеллоустона возникла в результате взаимодействия мантийного плюма с продвигающейся в юго-западном направлении

Североамериканской плитой. Этот процесс сильно модифицировал континентальную литосферу магматическими и тектоническими событиями и породил протяженную (~700 км) вулканическую систему Йеллоустоун–Снейк Ривер Плейн (YSRP), объединяющую (см. рис. 7) вулканогенные структуры с возрастом от 16–17 млн лет (кальдера МакДермитт на юго-западе) до современного (кальдера Йеллоустон на северо-востоке).

Магматическая активность вокруг кальдеры МакДермитт началась с извержений базальта Стинса (между 16.85 и 16.74 млн лет назад) и прогрессировала до извержения туфов МакДермитт (около  $16.39 \pm 0.02$  млн лет), а затем формировались посткальдерные исландиты (примерно 16.1 млн лет назад). Туфы Уайтхорс-Крик извергались около 15.7 млн лет назад предположительно к северо-западу от кальдеры. Самая молодая магматическая активность в районе кальдеры представлена высокоглиноземистыми оливин-толеитовыми лавами с возрастом  $14.9 \pm 0.74$  млн лет. Рудная минерализация, представленная киноварью в шахте МакДермитт (около 16.6 млн лет назад) и насту-





**Рис. 7.** “Тектоническая парабола” Йеллоустона, формируемая эпицентрами землетрясений [Smith et al., 2009]. YSRP – система вулканических аппаратов кислого состава плато Йеллоустон–Снейк Ривер (Yellowstone–Snake River Plain). 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. Скорость продвижения континентальной плиты в ЮЗ направлении составляла от 2 до 4.5 см/год.

раном месторождения Мунлайт (около 16.3 млн лет назад), формировалась практически одновременно с основным импульсом магматической активности, но литиевая минерализация образовалась позднее ( $14.87 \pm 0.05$  млн лет назад) [Henry et al., 2017].

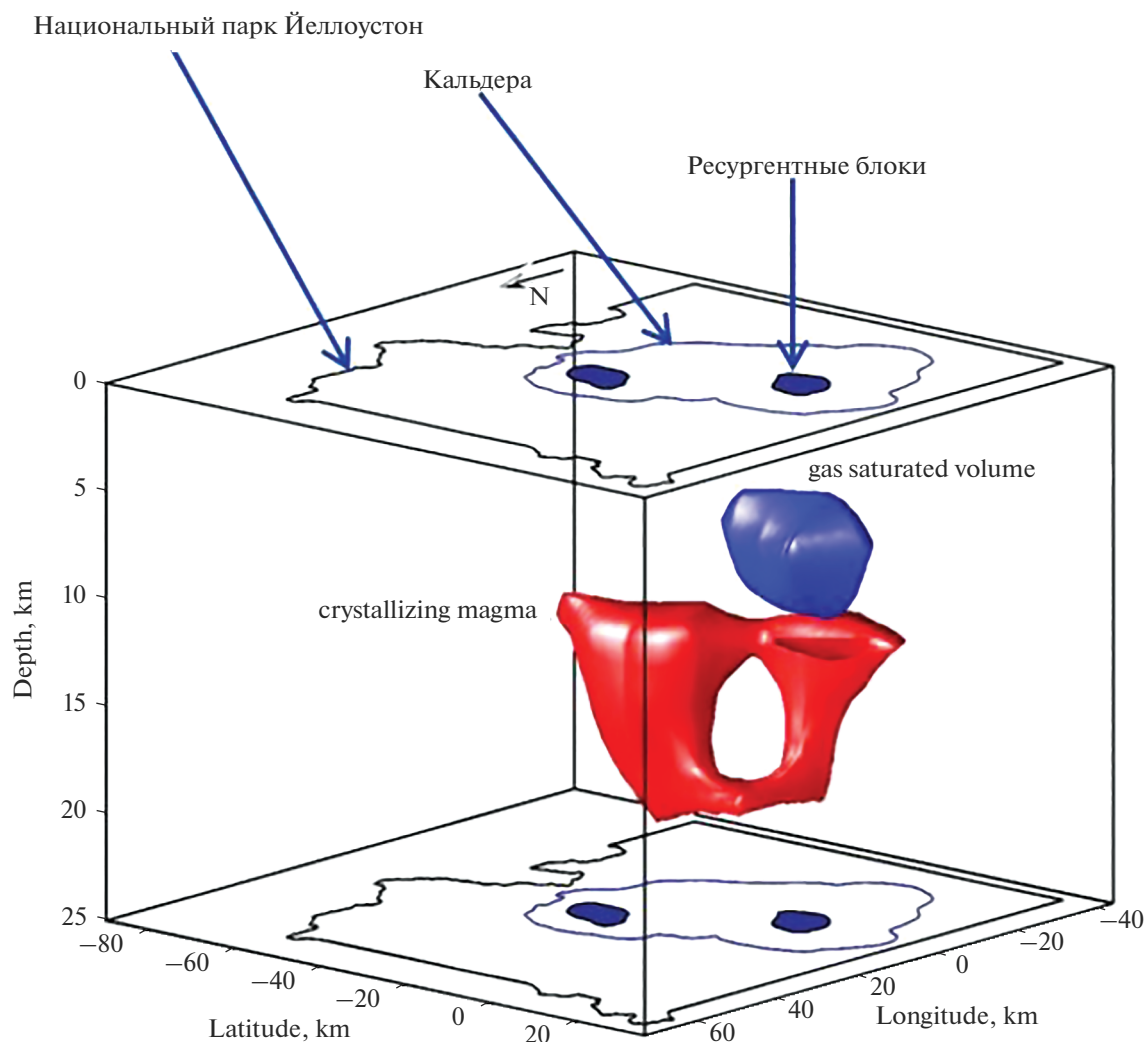
Поскольку информация о соучастии в формировании рудной минерализации сейсмотектонических и флюидодинамических процессов в кальдере МакДермитт практически отсутствует, то пользуясь принципом аналогии, предпримем реконструкцию этих процессов на примере активной в настоящее время системы кальдеры Йеллоустон.

Более чем 80-летняя история мониторинговых высокоточных геодезических наблюдений за движением земной поверхности в районе Йеллоустона показывает, что проседания и поднятия происходят с амплитудой в среднем  $\sim 2$  см/год, что связывается с гидротермально-магматическими воздействиями. Эпизод ускоренного подъема поверхности Йеллоустонской кальдеры со ско-

ростью до 7 см/год за период 2004–2009 гг. был смоделирован как результат подъема кровли магматической камеры [Smith et al., 2009]. Форма и размер камеры, расположенной под Йеллоустонской кальдерой на глубине от 6 до 16 км, и сопровождающего объема газонасыщенных пород установлены с помощью сейсмической томографии (рис. 8). Предполагается, что содержание магматического расплава в камере может составлять от 5 до 15% [Husen et al., 2004].

С учетом установленных в работе [Waite, Smith, 2002] процессов миграции флюидов на фоне региональной сейсмической активности и проседания кровли кальдеры в работе [Smith et al., 2009] предложена геодинамическая модель Йеллоустонского плюма, которая, в том числе, включает процессы взаимодействия магматических и гидротермальных флюидопотоков (рис. 9).

В этой модели, помимо прочего, обращает на себя особое внимание формирование термоконвективных ячеек в околокальдерном пространстве, обеспечивающих смешение флюидов ме-



**Рис. 8.** 3D сейсмотомография (скорости Р-волн) подкальдерного кристаллизующегося (частичное плавление до 15%) магматического очага (источник кислой и основной магмы) и вышерасположенного тела (“пузыря”) газонасыщенных пород (по [Husen, Smith, 2004]).

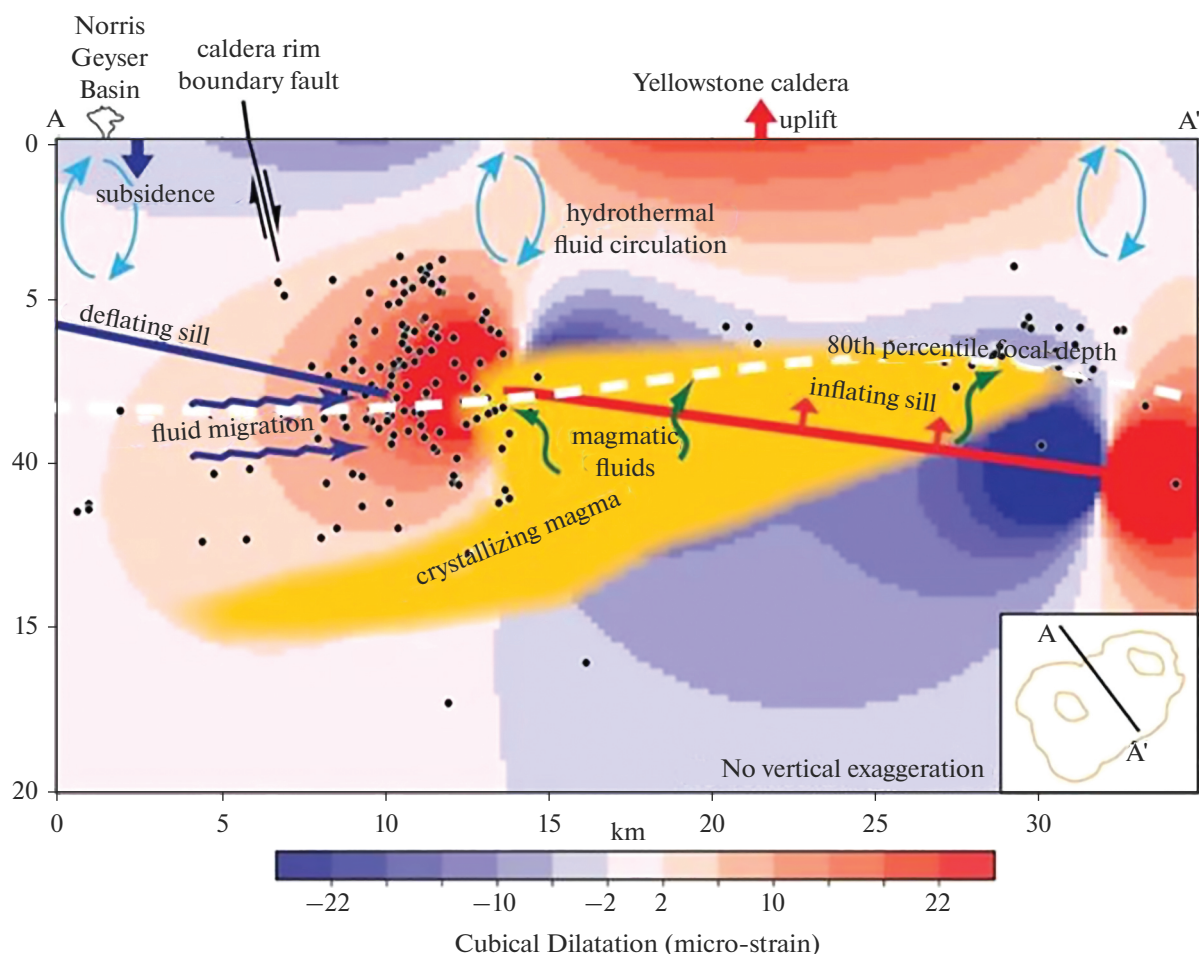
теорной и магматической природы на фоне интенсивной сейсмической активности этого блока земной коры.

Солидарное участие в урановом рудогенезе гидротермально-метасоматических и сейсмогеодинамических процессов в сочетании с термоконвективной циркуляцией флюидов четко прослеживается на месторождениях вулканогенного типа [Петров и др., 2014, 2022; Андреева и др., 2020; Пэк и др., 2020].

Так, на примере Стрельцовой кальдеры мезозойского возраста, вмещающей крупнейшее в России Стрельцовское рудное поле (20 молибден-урановых месторождений с уникальными об-

щими запасами около 300 тыс. т), рассмотрены возможные причины и механизмы развития вертикальной зональности околорудных метасоматических изменений вмещающих пород [Петров и др., 2014]. Установлено широкое распространение метасоматических пород с участием разнообразных слоистых силикатов, карбонатов, альбита, цеолитов. Наряду с этим в восточном блоке кальдеры, где сосредоточены самые крупные месторождения, преимущественно распространены гидрослюдистые метасоматиты, которые с глубиной сменяются березитами. Аргиллизиты типичны для западного блока, где они сменяются гидрослюдизитами и березитами только на значительных





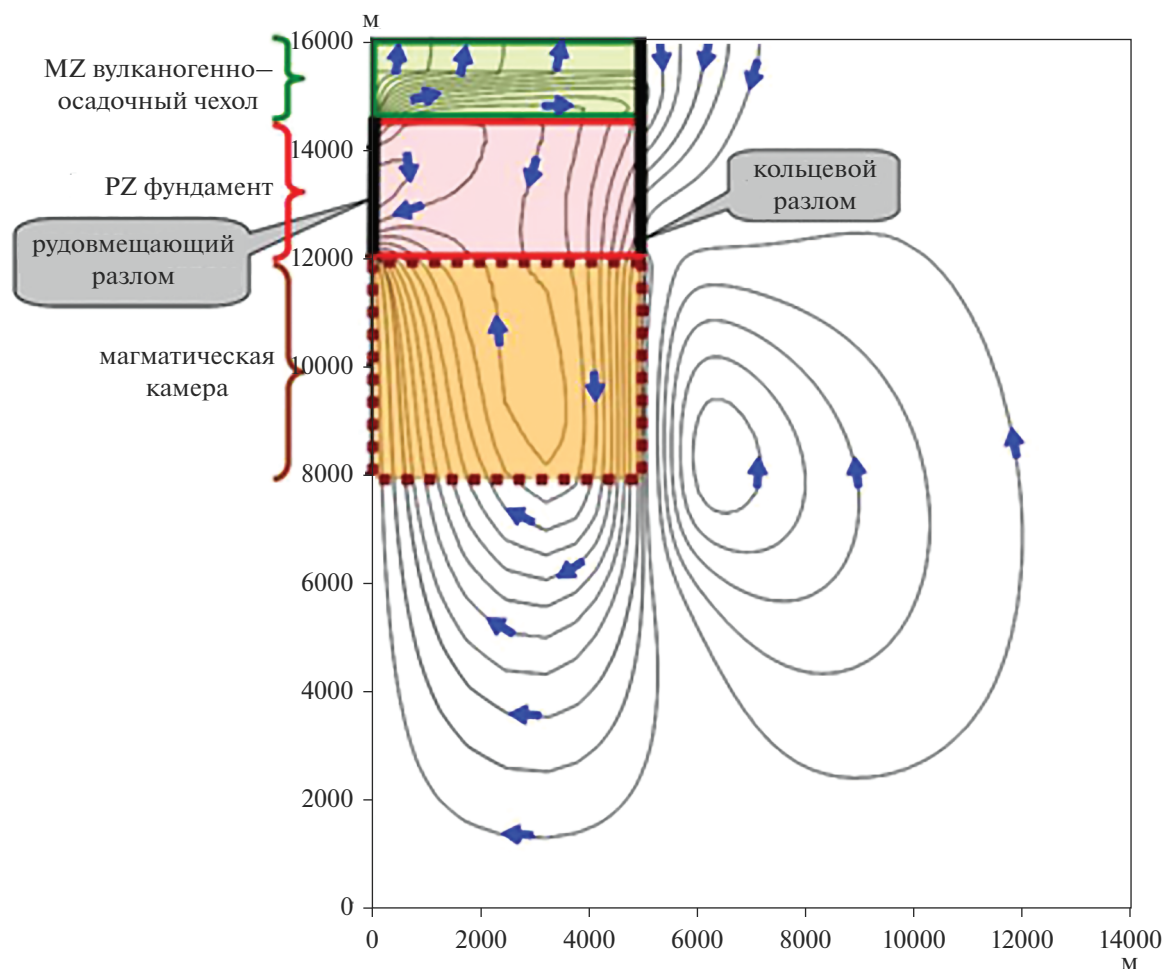
**Рис. 9.** Разрез (А—А') через кальдеру Йеллоустона.

Цветовая гамма — увеличение (красный) или уменьшение (синий) кулоновского напряжения (дилатации пород), вызванное подъемом кровли магматического очага. Гипоцентры землетрясений, произошедших в период этого подъема, показаны черными точками [Smith et al., 2009].

глубинах. При этом в нижней части разреза проявлены пострудные аргиллизиты, которые наложены на березитизированные породы. Петрофизические исследования показали, что формирование двух мотивов вертикальной метасоматической зональности обусловлено разным характером деформационных преобразований пород в западной и восточной частях кальдеры. Фактором, вызывающим фациальное разнообразие метасоматитов, могла послужить миграция границы перехода от упруго-хрупкого к упруго-пластичному поведению вещества на более глубокие горизонты в результате тектонотермальных воздействий, которые выражались в увеличении скорости деформаций пород и внедрении разогретых флюидов, в том числе за счет термоконвективного переноса. Временное опускание этой границы увеличивало глубину гидродинамически открытой зоны, связанной с поверхностью, что приводило к ускоренному проникновению на большие глубины холодных метеорных вод. Это вызывало пониже-

ние температур гидротерм и, как следствие, развитие более протяженных по вертикали ореолов аргиллизации, а также концентрирование богатой урановой минерализации глубже, чем в других участках кальдеры.

Уникальные общие запасы урана определяют рудное поле в качестве эталонного объекта “вулканогенного типа” по структурно-формационной классификации МАГАТЭ [Geological Classification ..., 2018]. Однако факт пространственно-временного совмещения на Антей—Стрельцовском месторождении (запасы более 90 тыс. т) руд в гранитном фундаменте (минеральная система, связанная с гранитоидами) и вулканогенно-осадочном чехле (минеральная система, связанная с вулканизмом) кальдеры приводит к многолетним дискуссиям о генезисе месторождений с высказыванием альтернативных точек зрения. В настоящее время известно несколько генетических моделей образования месторождений Стрельцов-



**Рис. 10.** Конфигурация флюидопотоков как функция проницаемости структурных элементов в Стрельцовой кальдере (по [Пэк и др., 2020] с дополнениями). Числовая модель для 20 000 лет после начала термоконвективной циркуляции флюидов.

ского рудного поля, основанных на различных представлениях об источнике и механизмах миграции урана. В этом ряду стоит разработанная и верифицированная числовыми моделями (рис. 10) гипотеза свободно-конвективного перемещения урана [Пэк и др., 2020], которая объясняет его поступление из трех источников ближней мобилизации: 1) подкальдерного очага кислых расплавов, 2) гранитоидных пород фундамента и 3) вулканических пород выполнения кальдеры.

Соучастие трех высокопродуктивных источников урана проливает свет на происхождение уникальных по запасам месторождений в Стрельцовой кальдере. Эта гипотеза может использоваться для реконструкции обстановок рудогенеза в вулканогенных структурах Сианшаня (Китай) и в кальдере МакДермитт (США).

В целом наш подход к рассмотрению механизмов смешения рудообразующих флюидов в ураноносных минеральных системах в связи с солидар-

ным развитием флюидодинамических и сейсмогеодинамических процессов при учете механизмов тепломассопереноса и структурообразующей роли напорных флюидов [Петров и др., 2008; Петров, 2011, 2017] согласуется с представлениями о вариациях трещинно-поровой флюидопроницаемости пород, происходящих на фоне резких изменений их напряженно-деформированного состояния, вызванных сейсмогеодинамическими воздействиями [Sibson, 2001; Cox, 2016]. Как отмечено в работе [Злобина и др., 2020], “землетрясения с гипоцентрами на разных глубинах в разломе-проводнике могут вскрывать коллекторы флюидов разной природы; обеспечивать смешение флюидов и их перемещение по проницаемым каналам в сферу минералообразования. После крупного землетрясения (главный толчок — main-shock) резко снижается глубина рубежа хрупкости—пластичности пород [Cox, 2005; Sibson, 2004]. Каскады последующих более слабых толчков (афтершок — aftershock sequences) создают высокоди-

намичные системы, в которых все процессы: геохимического, магматогенно-метаморфогенного преобразования среды и состава флюидов; колебаний давления флюидных систем; хрупкого разрушения и дилатационного расширения (разуплотнения) пород, взаимосвязаны". Этот вывод был сделан в результате детального анализа сейсмогенной природы флюидодинамических структурных парагенезов Уряхского золоторудного поля в Северо-Восточном Забайкалье. Очень близкие по сути представления о механизме активизации флюидопроницаемости зон разломов в косейсмическую стадию сейсмического цикла высказаны для урановых месторождений в зонах древних структурных несогласий в бассейнах Атабаски в Канаде и МакАртур в Австралии [Li et al., 2021]. Проведенное моделирование с альтернативным расположением флюидоподводящих разломов в фундаменте бассейна Атабаски показало, что при относительно высокой скорости деформации ( $6.66 \times 10^{-11} \text{ с}^{-1}$ ) из-за быстрого развития избыточного давления тектоническое сжатие может практически мгновенно разрушить тепловую конвекцию, существующую в осадочных породах. С течением времени конвекция флюидов восстанавливается по мере прогрессивного "снятия" деформации. Напротив, тектоническое сжатие при относительно низкой скорости деформации ( $6.66 \times 10^{-13} \text{ с}^{-1}$ ) не влияет на ранее имевшуюся тепловую конвекцию и вызванный деформацией сжатия поток минералообразующих растворов в фундаменте сосуществует с тепловой конвекцией в осадочных породах бассейна. В контексте сейсмотектонических событий также ярко проявляется клапанный гидродинамический механизм течения внутриразломных рудоносных флюидов [Nguyen et al., 1998; Sibson, 2019]. В условиях бассейна Атабаски он способствовал перекачке растворов из нижних в верхние части геологического разреза и функционировал во взаимосвязи с термоконвекцией [Chi et al., 2022].

Таким образом, солидарное развитие флюидодинамических и сейсмогеодинамических процессов, а также сопутствующие им тепломассоперенос и структурообразование под воздействием напорных флюидов обладает универсальным характером. Эти взаимосвязи проявляются не только в минеральных системах урановых месторождений различного генезиса, но также в месторождениях других полезных ископаемых, относимых, например, к магмато-гидротермальным системам, структурно контролируемым минеральным системам с неясными источниками флюидов, гидротермальным системам в осадочных бассейнах и т.д. Данный вопрос требует своей дальнейшей проработки.

## О ВОЗМОЖНЫХ МЕХАНИЗМАХ ПЕРЕНОСА И ОСАЖДЕНИЯ УРАНА

Неопределенность в вопросах реальных условий переноса и отложения урана сохраняется и по сей день. Эта проблема разрабатывается не одно десятилетие, но главная сложность в ее решении состоит в невозможности, с одной стороны, переноса урана в виде  $\text{U}^{\text{IV}}$  (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 [Наумов, 1978; Skirrow, 2009 и др.].

Серией экспериментальных работ разных авторов показано, что в высокотемпературных ( $500^\circ\text{C}$  и выше) и в восстановительных условиях при высоких содержаниях HF значимый перенос урана магматогенными флюидами возможен (см. ссылки в работе [Петров и др., 2022]). Основным условием фракционирования урана в раствор является высокое содержание в нем фтора, не менее 0.5–1.0 м (хлор менее благоприятен), и температуры не менее  $500^\circ\text{C}$ . Только тогда уран может переноситься в концентрации до  $n \times 10^{-2}$  моль/л в виде оксифторидных комплексов. Все полученные данные относятся к высокотемпературным условиям, а осаждение урана происходит при распаде этих комплексов в ходе охлаждения системы. В относительно низкотемпературных условиях ( $350^\circ\text{C}$  и ниже) существование галогенидных комплексов урана возможно только в очень кислой среде с низкими значениями pH (около 1) [Langmuir, 1978; Timofeev et al., 2018; Migdisov et al., 2018], что не согласуется с характером минеральных ассоциаций, наблюдаемых в вулканогенных месторождениях урана, в которых, как отмечалось выше, отсутствуют минеральные парагенезисы кислотного типа.

Согласно другой альтернативе экстракция металлов (но также в высокотемпературных условиях) 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  $T$   $880\text{--}900^\circ\text{C}$  (сводка в статье [Петров и др., 2022]). Вместе с тем, имеются экспериментальные данные, указывающие на существенное влияние фторидов в магматических условиях на растворимость уранинита, особенно в области флюидной несмешиваемости. 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 и механизмы переноса рудных компонентов к местам их концентрации в рудных телах при этих исследованиях не обсуждаются. При этом очевидным является гораздо более низко-

температурный фон уранового рудообразования, чем те высокие Р-Т параметры, при которых проводятся современные эксперименты.

Ввиду очевидных трудностей применения механизма фторидной миграции урана важное значение приобрела гипотеза его карбонатного низкотемпературного переноса в виде разнообразных комплексов  $U^{VI}$ . Она была подтверждена также и экспериментальными работами [Рафальский, Осипов, 1967; Шмариович и др., 1984 и др.], в которых показана возможность выщелачивания урана окислительными растворами из пород разного состава при разных (но невысоких, не более 250°C) температурах. При этом формируются растворы с концентрацией до  $n \times 10^{-3}$  моль/л, которые можно рассматривать как рудоносные, а осаждение уранинита происходит по схеме  $UO_2(CO_3)_2^{2-} + e + H_2O \rightarrow UO_2 + CO_3^{2-} + H^+$ . Эта модель хорошо объясняет формирование гидротермальных месторождений, но сохраняет некоторую неопределенность в проблеме восстановителей  $U^{VI}$  и механизма формирования жильных рудных тел в гидротермальных месторождениях вулканогенного типа. Предполагается, что такими восстановителями могут быть прослои угле- и битумосодержащих пород, а также восстановительные флюиды с метаном, водородом и другими газообразными агентами, которые привносятся в ходе процессов рудогенеза [Petrov et al., 2008]. Последние нередко обнаруживаются в составе газовой-жидких включений в жильных минералах [Наумов и др., 2015].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассматриваемые в данной статье “ типовые ” по классификации МАГАТЭ 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 не только в структурно-тектонических позициях, но и в развитии магматических, гидротермальных и структурообразующих процессов.

Физико-химические условия протекания минералообразующих процессов внутри ураноносных вулканических кальдер возможно восстановить с привлечением данных лабораторных экспериментов, теоретического моделирования или натурных наблюдений в областях современного или молодого плейстоцен-голоценового вулканизма. Существующие данные о гидротермальных преобразованиях вмещающих пород в скважинах действующих гидротермальных систем (глубиной до 2.5 км) дают указания на наиболее вероятные пределы устойчивости ряда минералов, особенно глинистых, цеолитов, изучение полей стабильности

которых в лабораторных условиях не всегда возможно вследствие ряда кинетических причин. Конечно, подавляющее большинство рудных месторождений формировалось в более глубинных условиях, при больших лито- и гидростатических давлениях и слабее выраженных градиентах физико-химических параметров. Так в вертикальном интервале менее 1.5 км температура в действующих термопроявлениях может меняться от 300°C у забоя скважины до почти атмосферной в ее устье. Литостатическое давление при этом не превышает 350 атм в низах разреза. При таком низком давлении (обычно не более 50–150 атм) в условиях действия субнейтральных гидротерм интенсивно развиты разнообразные цеолиты, которые в рудных месторождениях встречаются значительно реже. Кроме того, особенностью гидротермальных аргиллизитов современных гидротермальных систем является сосуществование неравновесных ассоциаций минералов: смектита, гиббсита, галлуазита, смешанослойных слоистых силикатов, алуинита, цеолитов, адуляра, опала, что определяется крайней нестабильностью процесса в приповерхностной зоне вскипания.

Исходя из этих данных, температурные условия протекания гидротермальных процессов в древних ураноносных кальдерах можно оценивать, как интервал ~100–300°C. Общее давление, в основном флюидное в верхних горизонтах рудообразующей системы, в нижней ее части, где преобладают условия хрупко-пластических деформаций, вероятно, может достигать 1 кбар. Наличие протяженных открытых трещин может способствовать быстрому проникновению высоконагретых флюидов в условиях декомпрессии. Это обстоятельство, например, наглядно подчеркивается характером слоистых силикатов в ореолах предрудных метасоматитов. Постоянной особенностью их является почти повсеместное отсутствие смешанослойных иллит-смектитов с большим, чем 50%, содержанием разбухающих (смектитовых) межслоев с полным беспорядком переслаивания слюдяных и смектитовых пакетов. Такого вида смешанослойные фазы отсутствуют в составе предрудных метасоматитов, где даже во внешних зонах появляются сразу либо иллиты, либо упорядоченные смешанослойные иллит-смектиты. Таким образом, влияние кинетического фактора при замещении исходного материала (минералов или вулканического стекла) гораздо слабее. Тем не менее неупорядоченные смешанослойные могут появляться в аргиллизитах краевых частей кальдер (месторождения Дальнее, Широндукуй в Стрельцовском рудном поле). Подобного рода явления отмечены не только для околорудных метасоматитов, но и для многих современных термопроявлений высокотемпературного типа [Steiner, 1977; Inoue et al., 2004], где температуры на забое скважины приближаются или превыша-



ют 300°C. Кроме того, быстрое поступление флюидов обуславливает распространение жильно-метасоматических проявлений щелочных полевых шпатов, адуляра в современных и древних гидротермальных системах или, в случае, например, Стрельцовой кальдеры, — альбитовых метасоматитов [Андреева и др., 2022].

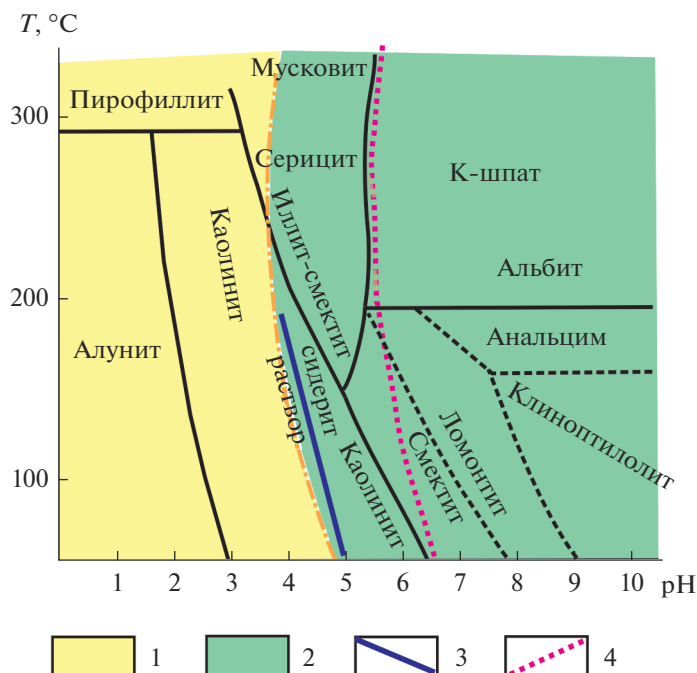
К числу ведущих признаков мезозойских палеокальдер относится отсутствие в их составе метасоматитов высококислотного типа с участием алунита и других кислотофильных минералов, которые обычны для областей молодого (неоген-четвертичного) и современного вулканизма. Они постоянно наблюдаются в приповерхностных частях зон разгрузки субнейтральных термальных вод (типа Паужетки и Паратунки на Камчатке или вулканической зоны Таупо в Новой Зеландии). При окислении сероводорода там формируются алунит- и каолинитсодержащие опалиты, сера и другие минеральные образования очень кислой среды. Однако, масштабы преобразований этого типа невелики и мощность их не превышает нескольких десятков метров. Поэтому, если приповерхностные кислотные метасоматиты и существовали в пределах более древних ураноносных кальдерных построек, то в течение времени (от мезозоя в Монголо-Забайкальском и Южно-Китайском регионе и палеоген-неогена — в западных штатах США) до голоцена, они были полностью уничтожены эрозионными процессами. Еще более показательным отсутствием в изучаемых кальдерах ультракислых метасоматитов глубинного типа, которые известны почти исключительно в пределах тихоокеанского вулканического кольца. Глубина вскрытия скважинами в этих участках достигает 2500 м (Филлипины), где температуры приближаются к 360°C. Минеральные преобразования обусловлены воздействием сульфатно-хлоридных вод, pH которых колеблется от 0 до 3, несколько возрастая на изливе (сводка по этому типу термопроявлений содержится в работе [Метасоматиты ..., 1998]. Проявления систем кислотных гидротерм и соответствующих метасоматитов известны в Японии (Отака, Матсукава), в Индонезии (о. Суматра), на Тайване, Филиппинах (Тонгонан), на Курильских островах (о. Кунашир). Кроме типичных для приповерхностных частей каолинита, алунита, серы, опала на больших глубинах развиваются дикиит, пиррофиллит, зунит, мусковит. В качестве окolorудных изменений (high sulfidation, advanced argillization, по [Sillitoe, Hedenquist, 2003]) такого рода метасоматиты присутствуют на известных сульфидно-золоторудных месторождениях Саммитвилл, Голдфилд (запад США), Au-Cu-месторождениях Лепанто (Филлипины) и Грасберг в Новой Гвинее, но они не отмечались в ураноносных кальдерах.

Положение метасоматитов на урановых вулкано-генных месторождениях относительно общей со-

вокупности низко-среднетемпературных минеральных парагенезисов гидротермального типа может отчасти иллюстрировать диаграмма  $T^{\circ}C$ —pH. Линии минеральных равновесий на этой диаграмме достаточно условны, поскольку систематика низкотемпературных метасоматитов возможна лишь по ограниченному числу параметров, из которых наиболее важными для наших целей являются температура и кислотность (рис. 11).

Очевидно, что поля соседних метасоматических формаций могут перекрываться, но в целом они соответствуют наблюдаемым в природе метасоматическим ассоциациям. Часть границ этих полей представляет собой моновариантные равновесия, подтвержденные соответствующими лабораторными экспериментами (например, каолинит-пиррофиллит или мусковит-кпш) и термодинамическими расчетами, которые могут быть корректны для гипотетического термального раствора с заданными концентрациями летучих компонентов [Метасоматиты ..., 1998]. Те линии, которые обозначены штрихами, условно отделяют области преимущественного распространения тех или иных минералов, в отношении которых невозможно говорить о соответствующих полях их термодинамической устойчивости, поскольку некоторые из них являются метастабильными образованиями (например, цеолиты). Вся левая часть диаграммы (помечена желтым цветом) соответствует семейству низко- и среднетемпературных образований кислотного типа (в зарубежной литературе advanced argillic alterations) с алунитом, пиррофиллитом, диаспором, андалузитом, ангидритом, которое никогда не наблюдалось на месторождениях урана вулкано-генного типа. Правая часть диаграммы, помеченная зеленым цветом, соответствует метасоматитам, характерным для вулкано-генных месторождений урана (но также и многим месторождениям других металлов). Следует отметить, что эта закономерность справедлива не только для Восточного Забайкалья, но и для других областей внутриконтинентального вулканизма.

Березиты, иллитовые метасоматиты, умеренно-кислотные аргиллизиты с адуляром, которые постоянно сопровождают месторождения урана гидротермального типа, приурочены к мезозойским и кайнозойским кальдерам, расположенным в основном в областях внутриплитного вулканизма с мощной континентальной корой и развитым гранитно-метаморфическим бедным серой слоем, или присутствуют во внешней или переходной зоне Тихоокеанского кольца (Провинция Бассейнов и Хребтов, США). В этих зонах магматизм и связанные с ним проявления гидротермального минералообразования и метасоматизма могут иметь смешанный характер. Показательным примером является урановое месторождение Мэрисвейл (штат Юта), где урановые руды и ореол изменен-



**Рис. 11.** Основные минеральные равновесия и взаимоотношения минералов для низко-среднетемпературных около-рудных метасоматитов в зависимости от температуры и кислотности.

1 — поле метасоматитов кислотного типа (“high sulfidation” или “advanced argillization”), 2 — метасоматиты умеренно-кислотного, субнейтрального и щелочного типа (“low-intermediate sulfidation”), 3 — расчетная линия устойчивости сидерита, 4 — приблизительная линия нейтральных точек воды.

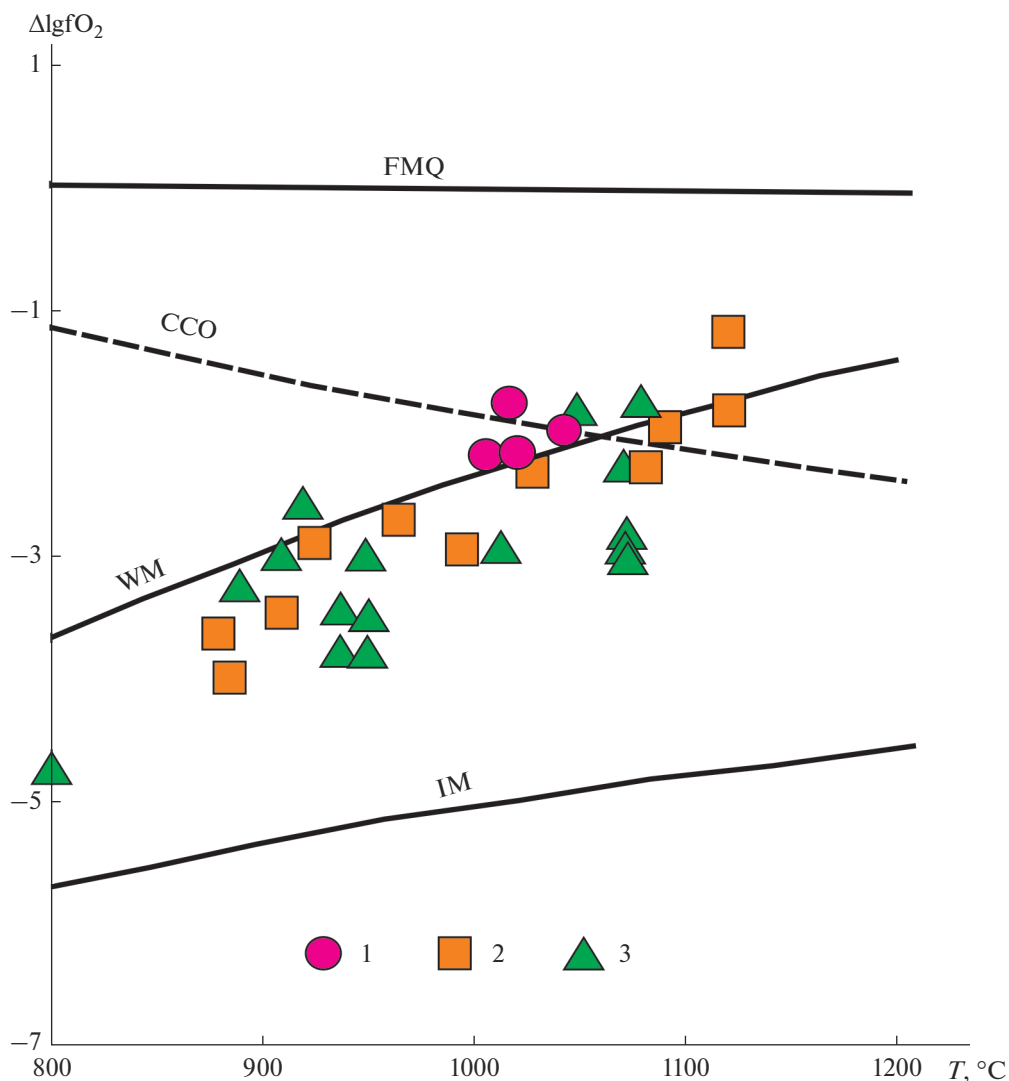
ных пород вполне отвечают типу невысокой кислотности с преимущественно иллитовым составом метасоматитов, присутствием адуляра, незначительным содержанием сульфидов. Тем не менее вблизи этого месторождения [Cunningham et al., 1998] залегает крупное тело алунитовых метасоматитов (alunite ridge), которые, согласно данным изотопного датирования, образованы на 3–4 млн лет позже уранового оруденения.

Преобладание общего фона невысокой или умеренной кислотности флюидов и относительно невысоких (не более 300°C) температур гидротермальных рудообразующих систем, по-видимому, более благоприятно для переноса урана в виде карбонатных, но не сульфатных, фторидных или хлоридных, комплексов.

Парагенезисы, характеризующие кислотную среду минералообразования при высокой активности серы и кислорода [Sillitoe, Hedenquist, 2003; Sillitoe, 2010; Hedenquist, Taran, 2013], широко распространены в пределах современного и молодого кайнозойского вулканизма Тихоокеанского 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 [Arculus, Delano, 1987; Рябчиков, 2003, Ка-

дик, 2006]. Процессы субдукции литосферы рассматриваются как один из главных механизмов повышения  $fO_2$  в верхней мантии. В рамках этих гипотез возрастание фугитивности кислорода является следствием потоков  $H_2O$ ,  $CO_2$  и  $Fe^{3+}$ , которые сопровождают погружение окисленных океанических плит как современных, так и древних возрастов. Продуцируемые мантией магмы, следовательно, могут также обладать окислительными характеристиками, и к тому же они обогащены серой [Русинов, 2001]. Для рассматриваемых областей континентального вулканизма и месторождений урана эта ситуация не типична, здесь преобладают термально-магматические процессы с иными характеристиками.

За основу для оценки окислительного состояния родоначальных для генерации магм участков мантии принято принимать буферное равновесие кварц–фаялит–магнетит (QFM). По величине летучести кислорода оно наиболее соответствует окислительно-восстановительному состоянию базальтовых магм вблизи или на поверхности Земли. Предполагаемые значения  $fO_2$  для конкретного региона целесообразно представлять как разницу между ним и буферным равновесием QFM для данной температуры. Величины  $fO_2$  и  $T^\circ C$  определяют по составам минералов из глубинных, вынесенных на поверхность, ксенолитов электрохимическим или термодинамическим ме-



**Рис. 12.** Значения  $fO_2$  относительно буфера кварц-магнетит-форстерит (FMQ) для ксенолитов гранат-шпинелевых лерцолитов и перидотитов из базальтов и щелочных базальтов Витимского плато (1), Байкальского рифта (2) и Монголии (3). Все данные приведены к общему давлению 15 кбар. Буферные равновесия: вюстит-магнетит (WM), железо-вюстит (IW), углерод (графит, алмаз) – углеродсодержащие флюиды ( $CO_2$ , CO и др.) (CCO) (по [Кадик, 2003, 2006]).

тодом по фазовым равновесиям железосодержащих минералов [Кадик, 2003, 2006; Никитина и др., 2010 и др.]. Для областей субдукции литосферных плит геохимические данные свидетельствуют о доминировании в этих регионах высоких величин  $fO_2$ . Они соответствуют отклонениям от буфера QFM в пределах от +1 до -1, которые определяют преобладание  $H_2O$  и  $CO_2$  во флюидной фазе. Наряду с этим в литосфере внутриконтинентальных областей или областей с уже завершенными процессами субдукции (например, Восточное Забайкалье в позднеюрское-раннемеловое время) присутствовали участки магмогенерирующей мантии с низкими значениями величины  $\Delta lgfO_2$  в пределах от -3 до -5 [Кадик, 2006]. Такие низкие значения фугитивности кислорода действительно

были зафиксированы в ксенолитах из мезозойско-кайнозойских базальтов Байкальского рифта, Витимского плоскогорья и Восточной Монголии, то есть из регионов, смежных с упоминаемыми выше урановорудными районами и не слишком разнящимися с ними по времени проявления магматизма. И, хотя определения окислительно-восстановительного состояния верхней мантии этих областей, проведенное разными методами [Кадик, 2006; Никитина и др., 2010], не вполне согласуются между собой, практически все они отвечают гораздо более низкой фугитивности кислорода, чем буфер QFM (рис. 12).

Следовательно, магматизм и связанные с ним процессы флюидогенерации и рудогенеза в основном могли протекать на общем восстанови-

тельном фоне. Вероятно, эти условия уже существовали в раннем мелу (на границе юры и мела), когда происходили основные процессы формирования оруденения в данном регионе, а субдукция литосферных плит Монголо-Охотского океана уже завершилась [Козловский и др., 2022].

Эти обстоятельства несомненно могут иметь определяющее значение как для всего металлогенического спектра, так и для конкретных проявлений окорудных средне-низкотемпературных метасоматитов, среди которых отсутствуют кислотные фации.

Что касается повышенной активности серы (“high sulfidation” в иностранной литературе) и связанного с ней интенсивного сернокислотного метасоматоза в современных островодужных и более древних субдукционных областях и развития сульфидного оруденения, то эти явления обусловлены рудогенерирующим влиянием андезитовидного и базальтоидного магматизма [Кривцов и др., 1987; Русинов, 2001]. Породы этих серий, согласно многочисленным геохимическим данным [Наумов, Коваленко, 1997], обладают и гораздо более высокими содержаниями серы (базальты содержат почти в 10 раз больше серы, чем гранитоидные породы и кислые вулканы континентальных областей). Гидротермальные месторождения или сколько-нибудь значимые проявления урана для этих областей не характерны.

Что касается медно-молибден-порфировых (иногда с золотом) месторождений во внутриплитных областях, то на примере Забайкалья и Восточной Монголии очевидно, что и они не относятся к высококислотному (high sulfidation) семейству. Для них характерно отсутствие зон интенсивного выщелачивания и вторичных кварцитов, типоморфной энаргит-люционитовой сульфидной ассоциации, а также и участков ангидритовой минерализации, обычных для месторождений этого типа. Многочисленные для внутриплитных областей Забайкалья и Монголии мезозойские месторождения полиметаллов с золотом и серебром также невозможно отнести к этой категории. Несмотря на то, что часть из них является высокосульфидной (содержание сульфидов относительно жильных минералов достигает 70%, например, Дарасун, Итакинское, Новоширокинское) [Спирidonov и др., 2006], никаких признаков высокой кислотности и активности серы, отраженной в составе минеральных ассоциаций, в них не наблюдается. Наряду с этим необходимо отметить, что крупное молибден-медно-порфировое месторождение Эрдэнэт-Обо в Северной Монголии относится скорее к кислотному типу с широким распространением процессов ангидритизации и образованием вторичных кварцитов. Однако энаргит-люционитовая сульфидная ассоциация,

маркирующая кислотный тип порфировых месторождений, в рудах Эрдэнэт-Обо не проявлена. Месторождение является гораздо более древним ( $P_3-T_1$ ), чем порфировые месторождения Забайкалья, и образовалось, вероятно, над зоной субдукции при закрытии Монголо-Охотского океанического бассейна [Козловский и др., 2022].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Вмещающие породы урановых месторождений в вулканогенных постройках Восточного Забайкалья, Южного Китая и Северо-запада США представляют собой метаалюминиевый или умеренно пералюминиевый высококалиевый тип вулканических пород, соответствующий гранитам А-типа (“анорогенные граниты”). Риолиты, риодациты, трахириолиты, а также экстрезивные сиениты, кварцевые сиениты, риолитовые дайки и купола, обогащенные калием, обнаруживают высокую степень фракционирования. Это выражается в распределении РЗЭ с отчетливой отрицательной Eu-аномалией, значительным обогащением несовместимыми и высокзарядными элементами, например, Li, Rb, Cs, Ta, U, Th при резком снижении содержаний Ba и Sr. По современным представлениям, эти породы образуются в условиях растяжения путем частичного плавления кристаллической земной коры, обогащенной перечисленными компонентами под влиянием подъема мантийных плюмов.

2. 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 иллитовых метасоматитов или умеренно-кислотным аргиллизитам при отсутствии вторичных кварцитов и аргиллизитов кислотного типа. 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.

3. Проявления урановой минерализации в мезозойских и кайнозойских кальдерах располагаются в основном в областях с мощной континентальной кристаллической корой, бедной серой, или присутствуют во внешней зоне Тихоокеанского кольца (Провинция Бассейнов и Хребтов, США). Согласно данным исследований окислительно-восстановительных свойств мантии в этих областях преобладают режимы пониженной фугитивности кислорода. Поэтому магматические выплавки мантии скорее всего не обладали окислительными свойствами и создавали общий восстановительный фон, связанный с мантийными

флюидными потоками, обедненными сернистыми соединениями относительно субдукционных областей. Не исключено, что свойства этих флюидно-магматических потоков имели определяющее значение как для металлогенического спектра внутриплитных территорий, так и для конкретных проявлений окolorудного средне-низкотемпературного метасоматоза, среди которых практически отсутствуют фации повышенной кислотности.

4. Примеры промышленных месторождений урана вулканогенного типа в Стрельцовой кальдере в Восточном Забайкалье, Сианшаньской вулканической структуре в Южном Китае и кальдере МакДермитт на западе США (штаты Орегон и Невада) показывают, что несмотря на разные временные интервалы их формирования, многие черты проявлений магматических, гидротермально-метасоматических и фильтрационно-транспортных процессов весьма близки, а условия миграции уранотранспортирующих флюидов задавались солидарным воздействием сейсмогеодинамических и термоконвективных процессов.

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи благодарят двух анонимных рецензентов за конструктивные замечания и предложения в процессе подготовки статьи.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГЕМ РАН.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андреева О.В., Головин В.А. Метасоматические процессы на месторождениях мезозойских областей внутриплитной магматической активизации (Восточная Монголия, Забайкалье) // Геология рудных месторождений. 2001. Т. 43. № 3. С. 227–242.
- Андреева О.В., Петров В.А., Полуэктов В.В. Мезозойские кислые магматиты Юго-Восточного Забайкалья: петрогеохимия, связь с метасоматизмом и рудообразованием // Геология рудных месторождений. 2020. Т. 62. № 1. С. 76–104.
- Андреева О.В., Петров В.А., Полуэктов В.В. Альбитовые метасоматиты и ториевая минерализация в урановых месторождениях вулканогенного типа (на примере Стрельцовского рудного поля, Восточное Забайкалье) // Доклады РАН. Науки о Земле. 2022. Т. 507. № 2. С. 179–186.
- Геохимия мезозойских латитов Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1984. 237 с.
- Злобина Т.М., Петров В.А., Прокофьев В.Ю., Абрамов С.С., Котов А.А., Вольфсон А.А., Лексин А.Б. Сейсмогенная природа флюидодинамических структурных парагенезов Урхского золоторудного поля (Северо-Восточное Забайкалье) // Геология рудных месторождений. 2020. Т. 62. № 4. С. 291–320.
- 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.
- Кадик А.А. Восстановленные флюиды мантии: связь с химической дифференциацией планетарного вещества // Геохимия. 2003. № 9. С. 928–940.
- Кадик А.А. Режим летучести кислорода в верхней мантии как выражение химической дифференциации планетарного вещества // Геохимия. 2006. № 1. С. 63–79.
- Коваленко Д.В., Петров В.А., Полуэктов В.В., Агеева О.А. Геодинамические условия формирования мезозойских вулканических пород Стрельцовой кальдеры // Доклады Академии наук. 2014. Т. 457. № 5. С. 564–567.
- Коваленко Д.В., Петров В.А., Полуэктов В.В., Агеева О.А. Геодинамическая позиция мезозойских мантийных пород Стрельцовой кальдеры (Восточное Забайкалье), мантийные домены Центральной Азии и Китая // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 4. Вып. № 28. С. 231–246.
- Козловский А.М., Ярмолюк В.В., Сальникова Е.Б., Саватенков В.М., Новикова А.С., Травин А.В. Раннемезозойский щелочно-салический магматизм Центральной Монголии как индикатор закрытия Монголо-Охотского океана // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Иркутск: ИЗК СО РАН, 2022. Вып. 20. С. 130–132.
- Кривцов А.И., Мигачев П.Ф., Попов В.С. Медно-порфировые месторождения мира. М.: Недра, 1987. 274 с.
- Лаверов Н.П., Чернышев И.В. Временная связь урановых месторождений с континентальным вулканизмом // Геохронология и проблемы рудообразования. М.: Наука, 1977. С. 5–18.
- Лаверов Н.П. Геологические условия формирования урановых месторождений в областях континентального вулканизма (на примере Срединного Тянь-Шаня) / Дис. ... доктора геол.-мин. наук. М.: ИГЕМ АН СССР, 1972. 372 с.
- Магматические горные породы. Т. 4. М.: Наука, 1987. 369 с.
- Метасоматиты и метасоматические породы. М.: Научный мир, 1998.
- Наумов В.Б., Коваленко В.И. Концентрация серы в магматических расплавах по данным изучения включений в минералах // Геохимия. 1997. Т. 1. С. 97–103.
- 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 В.Б., Дорофеева В.А., Миронова О.Ф. Физико-химические параметры формирования гидротермальных месторождений по данным исследования флюидных включений. III. Месторождения урана // Геохимия. 2015. № 2. С. 123–143.



- Наумов Г.Б. Миграция урана в гидротермальных растворах // Геология рудных месторождений. 1998. Т. 40. № 4. С. 307–325.
- Никитина Л.П., Гончаров А.Г., Салтыкова А.К., Бабушкина М.С. Окислительно-восстановительное состояние континентальной литосферной мантии Байкало-Монгольской области // Геохимия. 2010. № 1. С. 17–44.
- Петров В.А., Леспинас М., Хаммер Й. Тектонодинамика флюидопроводящих структур и миграция радионуклидов в массивах кристаллических пород // Геология рудных месторождений. 2008. Т. 50. № 2. С. 99–126.
- Петров В.А. Тектонофизические и структурно-петрофизические индикаторы процессов миграции флюидов в разломных зонах и методы их изучения // Современная тектонофизика: Методы и результаты. М.: ИФЗ РАН, 2011. С. 94–108.
- Петров В.А. Сейсмогеодинамика и тектонофизика гидротермального рудообразования // Разведка и охрана недр. 2017. № 11. С. 37–42.
- 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 рудных 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 рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 445–469.
- Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В., Коваленко Д.В. Ураноносные вулканогенные структуры (Стрельцовская, Россия, Сианшань, Китай и МакДермитт, США): сравнительный анализ петрологии кислых вулканитов и состава рудосопровождающих метасоматитов // Геология рудных месторождений. 2022. Т. 64. № 1. С. 7–36.
- Пэк А.А., Мальковский В.И., Петров В.А. Тепловая конвекция флюидов как возможный механизм формирования уникальных урановых месторождений Стрельцовское и Антей (Восточное Забайкалье) // Геология рудных месторождений. 2018. Т. 60. № 6. С. 558–574.
- Пэк А.А., Мальковский В.И., Петров В.А. Минеральная система урановых месторождений Стрельцовской кальдеры (Восточное Забайкалье) // Геология рудных 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 рудных месторождений. 1967. Т. 9. № 2. С. 44–57.
- 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 рудных 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.
- Рябчиков И.Д. Глобальные потоки рудных металлов в глубинных процессах // Геология рудных месторождений. 1997. Т. 38. № 5. С. 403–409.
- Спиридонов А.М., Зорина Л.Д., Китаев Н.А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. Новосибирск: Изд-во “Гео”, 2006. 287 с.
- Шмариович Е.М., Агапова Г.Ф., Рехарская В.М. и др. Экспериментальное изучение выщелачивания урана из различных пород термальными сульфидно-карбонатными растворами // Геология рудных месторождений. 1984. № 3. С. 87–98.
- Arculus R.J., Delano J.W. Oxidation state of upper mantle: present conditions, evolution, and controls. In: Mantle Xenoliths Chichester / Ed. P.H. Nixon. Wiley and Sons, 1987. P. 119–124.
- Ballhaus C. Redox states of lithospheric and asthenospheric upper mantle // Contrib. Mineral. Petrol. 1993. V. 114. № 3. P. 331–348.
- Bonnetti C., Liu X., Cuney M., Mercadier J., Riegler T., Chida Y. Evolution of the uranium mineralisation in the Zoujishan deposit, Xiangshan ore field: Implications for the genesis of volcanic-related hydrothermal U deposits in South China // Ore Geology Reviews. 2020. V. 122. Article 103514.
- Chabiron A., Alyoshin A.P., Cuney M., Deloule E., Golubev V.N., Velichkin V.I., Poty B. Geochemistry of the rhyolitic magmas from the Streltsovka caldera (Transbaikalia, Russia): a melt inclusion study // Chemical Geology. 2001. V. 175. P. 273–290.
- Chabiron A., Cuney M., Poty B. Possible uranium sources for the largest uranium district associated with volcanism: the Streltsovka caldera (Transbaikalia, Russia) // Mineralium Deposita. 2003. V. 38. P. 127–140.
- Chi G., Ashton K., Deng T., Xu D., Li Z., Song H., Liang R., Kennicott J. Comparison of granite-related uranium deposits in the Beaverlodge district (Canada) and South China – a common control of mineralization by coupled shallow and deep-seated geologic processes in an extensional setting // Ore Geol. Rev. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev>
- Chi G., Xu D., Xue C., Li Z., Ledru P., Deng T., Wang Y., Song H. Hydrodynamic links between shallow and deep mineralization systems and implications for deep mineral exploration // Acta Geologica Sinica (English Edition). 2022. V. 96(1). P. 1–25.
- Cox S.F. Coupling between deformation, fluid pressures, and fluid flow in ore-producing hydrothermal systems at depth in the crust // Econ. Geol. 2005. V. 100. P. 39–75.
- Cox S.F. Injection-driven swarm seismicity and permeability enhancement: implication for the dynamics of hydrothermal ore systems in high fluid-flux, overpressured faulting regimes // Econ. Geol. 2016. V. 111. № 3. P. 559–587.
- Cuney M. Felsic magmatism and uranium deposits // Bull. Soc. Geol. France. 2014. V. 185. № 2. P. 75–92.
- Cunningham C. G., Rasmussen J.D., Steven T.A., Rye R.O., Rowley P.D., Romberger S.B., Selverstone J. Hydrothermal uranium deposits containing molybdenum and fluorite in the Marysvale volcanic field, west-central Utah // Mineralium Deposita. 1998. V. 33. P. 477–494.
- Descriptive Uranium Deposit and Mineral System Models. IAEA, Vienna, 2020. 328 p.
- 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.

- Geological Classification of Uranium Deposits and Description of Selected Examples. IAEA TECDOC-1842. IAEA, Vienna, 2018. 417 p.
- Gou J., Sun D.-Y., Qin Z. Late Jurassic–Early Cretaceous tectonic evolution of the Great Xing'an Range: geochronological and geochemical evidence from granitoids and volcanic rocks in the Erguna Block, NE China // *International Geology Review*. 2019. V. 61. № 15. P. 1842–1863.
- Gray T.R., Hanley J.J., Dostal J., Guillong M. Magmatic enrichment of uranium, thorium, and rare earth elements in late Paleozoic rhyolites of southern New Brunswick, Canada: evidence from silicate melt inclusions // *Econ. Geol.* 2011. V. 106. № 5. P. 145–158.
- 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 Geology Reviews*. 2020. V. 122. 103517.
- 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 Geology Reviews*. 2020. V. 122. 103517.
- Hagemann S.G., Lisitsin V., Huston D.L. Mineral system analysis: quo vadis // *Ore Geology Reviews*. 2016. V. 76. P. 504–522.
- Hedenquist J.W., Taran Y.A. Modeling the formation of advanced argillic lithocaps: volcanic vapor condensation above porphyry intrusions // *Econ. Geol.* 2013. V. 108. № 7. P. 1523–1540.
- Henry C.D., Castor S.B., Starker W.F., Ellis B.S., Wolff J.A., Laravie J.A., McIntosh W.C., Heizler M.T. Geology and evolution of the McDermitt caldera, northern Nevada and southeastern Oregon, western USA // *Geosphere*. 2017. V. 13(4). 47 p.
- Husen S., Smith R.B., Waite G.P. Evidence for gas and magmatic sources beneath the Yellowstone volcanic field from seismic tomographic imaging // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2004. V. 131. P. 397–410.
- Husen S., Smith R.B. Probabilistic earthquake relocation in three-dimensional velocity models for the Yellowstone National Park Region Wyoming // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2004. V. 94(3). P. 880–896.
- Huston D.L., Mernagh T.R., Hagemann S.G., Doublier M.P., Fiorentini M., Champion D.C., Jaques A.L., Czarnota K., Cayley R., Skirrow R., Bastrakov E. Tectono-metallogenic systems – The place of mineral systems within tectonic evolution, with an emphasis on Australian examples // *Ore Geology Reviews*. 2016. V. 76. P. 168–210.
- Inoue A., Meunier A., Beaufort D. Illite-smectite mixed-layer minerals in felsic volcanoclastic rocks from drill cores, Kakkonda, Japan // *Clays Clay Miner.* 2004. V. 52. № 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 // *Journal of Petrology*. 2005. V. 46. № 6. P. 1121–1154.
- Langmuir D. Uranium solution-mineral equilibria at low temperatures with applications to sedimentary ore deposits // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1978. V. 42. P. 547–569.
- Li Z., Chi G., Bethune K.M., Eldursi K., Quirt D., Ledru P., Thomas D. Interplay between thermal convection and compressional fault reactivation in the formation of unconformity-related uranium deposits // *Mineralium Deposita*. 2021. V. 56. P. 1389–1404.
- Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids // *Bull. Geol. Soc. Amer.* 1989. V. 101. P. 635–643.
- Migdisov A.A., Boukhalfa H., Timofeev A., Runde W., Ro-back R., Williams-Jones A.E. A spectroscopic study of uranyl speciation in chloridebearing solutions at temperatures up to 250°C // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2018. V. 222. P. 130–145.
- Nguyen P.T., Cox S.F., Harris L.B., Powell C.McA. Fault-valve behaviour in optimally oriented shear zones: an example at the Revenge gold mine, Kambalda, Western Australia // *J. Structural Geology*. 1998. V. 20. № 12. P. 1625–1640.
- Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from Kastamonu Area, Northern Turkey // *Contrib. Miner. Petrol.* 1976. V. 58. № 1. P. 63–83.
- Peiffert C., Nguen-Trung C., Cuney M. Uranium in granitic magmas. Part II // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1996. V. 60. P. 1515–1529.
- Petrov V.A., Poluektov V.V., Hammer J., Schukin S.I. Fault-related barriers for uranium transport // *Uranium Mining and Hydrogeology* / Eds B.J. Merkel, A. Hasche-Berger. Springer-Verlag, 2008. P. 779–789.
- Petrov V.A., Pek A.A., Malkovsky V.I. Uranium Sources and Fluid Transport in Volcanic Mineralized Systems: an Example of Streltsovka Caldera, Russia with Reflection on Dornot, Mongolia // *Journal of Volcanology and Seismology*. 2022. V. 16. № 6. P. 472–497.
- Pierce K.L., Morgan L.A. Is the track of the Yellowstone hotspot driven by a deep mantle plume? – Review of volcanism, faulting, and uplift in light of new data // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2009. № 188. P. 1–25.
- Pirajno F. Hydrothermal Processes and Mineral Systems. 2009. 1250 p.
- Pirajno F. A classification of mineral systems, overviews of plate tectonic margins and examples of ore deposits associated with convergent margins // *Gondwana Research*. 2016. V. 33. P. 44–62.
- Sibson R.H. Seismogenic framework for ore deposition // *Rev. Econ. Geol.* 2001. V. 14. P. 25–50.
- Sibson R.H. Controls on maximum fluid overpressure dating conditions for mesozonal mineralisation // *Journal of Structural Geology*. 2004. V. 26. № 6–7. P. 1127–1136.
- Sibson R.H. Arterial faults and their role in mineralizing systems // *Geoscience Frontiers*. 2019. V. 10. P. 2093–2100.
- Sillitoe R. Porphyry copper systems // *Econ. Geol.* 2010. V. 105. № 1. P. 3–41.
- Sillitoe R.H., Hedenquist J.W. Linkages between volcano-tectonic settings, ore-fluid composition, and epithermal precious metal deposits // *Econ. Geol. Special Publication*. 2003. V. 10. P. 315–343.
- Skirrow R.G., Jaireth S., Huston D.L., Bastrakov E.N., Schofield A., van der Wielen S.E., Barnicoat A.C. Uranium mineral systems: Processes, exploration criteria and a new deposit framework // *Geoscience Australia Record*. 2009/20. 2009. 44 p.
- Smith R.B., Jordan M., Steinberger B., Puskas C.M., Farrell J., Waite G.P., Husen S., Chang W.-L., O'Connell R. Geodynamics of the Yellowstone hotspot and mantle plume: Seismic and GPS imaging, kinematics, and mantle flow //

Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2009. V. 188. P. 26–56.

Steiner A. Hydrothermal rock alteration of Wairakei, New Zealand // Bull. N.Z. Geol. Surv. 1977. № 90. 135 p.

Timofeev A.I., 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.

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.

Xu W.L., Pei F.P., Wang F., Meng E., Ji W.Q., Yang D.B., Wang W. Spatial–temporal relationships of Mesozoic volcanic rocks in NE China: constraints on tectonic overprinting and

transformations between multiple tectonic regimes // J. Asian Earth Sci. 2013. V. 74. P. 167–193.

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.

Waite G.P., Smith R.B. Seismic evidence for fluid migration accompanying subsidence of the Yellowstone caldera // Journal Geophysical Research. 2002. V. 107. № B9, 2177. P. 1–18.

Wyborn L.A.I., Heinrich C.A., Jaques A.L. Australian Proterozoic mineral systems: essential ingredients and map-pable criteria // AusIMM Publication Series 4/94. 1994. P. 109–115.

## Properties of Magmatism, Hydrothermal-Metasomatic and Filtration-Transport Processes in Uranium-Bearing Volcanogenic Structures

V. A. Petrov<sup>1, \*</sup>, O. V. Andreeva<sup>1</sup>, and V. V. Poluektov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Staromonetny lane, 35, Moscow, 119017 Russia*

*\*e-mail: vlad243@igem.ru*

Creation of a refined conceptual model for the formation of volcanogenic uranium deposits includes researches of the nature of magmatic, hydrothermal-metasomatic and filtration-transport processes, as well as physico-chemical conditions for the transfer and deposition of uranium. We considered these issues using the examples of the Streltsovskaya caldera and the ore field of the same name in Eastern Transbaikalia, the Xiangshan volcanic structure in South China, and the McDermitt caldera in the western United States (Oregon and Nevada states). According to the IAEA classification [Geological Classification ..., 2018], these ore fields and deposits belong to the volcanogenic (volcanic-related) type. In the Streltsovsky and Xiangshan ore fields, a combination of volcanogenic in the cover and granitic (granite-related) in the basement types of deposits is observed. The main part of uranium industrial deposits of volcanic type in these regions was formed during the Mesozoic and Cenozoic epochs (although more ancient, Paleozoic, objects are known in the world). Despite different time intervals of the ore-bearing volcanogenic structures formation, many features of magmatic, hydrothermal, and filtration-transport processes in them are very similar. It is assumed that these features are due to the general influence of intraplate tectonic regimes or the evolution of the outer parts of the ocean-continent zones where magmatic activity produced volcanism of the bimodal series in the predominant sequence mafic – felsic volcanics – mafic, and the migration of uranium-transporting fluids was set by the joint action of seismogeodynamic and thermoconvective processes.

**Keywords:** Volcanogenic uranium deposits, intraplate geodynamic regimes, filtration-transport processes, seismogeodynamic and thermoconvective processes, wall-rock metasomatic alterations, low-intermediate sulfidation, advanced argillization