

Машковцев Г.А., Леденева Н.В. (ФГБУ «ВИМС»)

РОЛЬ ГЛУБИННЫХ ФАКТОРОВ В ФОРМИРОВАНИИ ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

*В статье рассматриваются особенности геологического строения и генезиса ураноносных вулcano-тектонических структур (ВТС) РФ и сопредельных территорий. Предполагается связь формирования ВТС и промышленного уранового оруденения с очагами проявления глубинных флюидопотоков. Предлагается под единой рудообразующей гидротермальной урановой системой понимать всю совокупность подкоровых и коровых процессов формирования вулканических и тектонических структур ВТС, а главное, деятельность глубинных высоконагретых флюидов, их преобразование в продуктивные средне- и низкотемпературные растворы и собственно процесс рудоотложения. **Ключевые слова:** вулcano-тектонические структуры, глубинные флюиды, металлоносные растворы, бимодальный вулканизм, гидротермальное рудообразование.*

Mashkovtsev G.A., Ledeneva N.V. (VIMS)

THE ROLE OF DEEP FACTORS IN THE FORMATION OF HYDROTHERMAL URANIUM DEPOSITS

*The features of geological structure and genesis of the uranium-bearing volcano-tectonic structures (VTS) of the Russian Federation and adjacent territories are considered. It is assumed that the formation of VTS and of the commercial uranium mineralization are associated with the foci of the manifestation of the flow of deep fluids. It is proposed that the integrated ore-forming hydrothermal uranium system should be understood as the totality of sub-crustal and crustal processes of formation of volcanic and tectonic structures, and the most importantly, the activity of deep high-heated fluids, their transformation into productive medium — and low-temperature solutions, and the actual ore-forming process. **Keywords:** volcano-tectonic structures, deep fluids, metal-bearing solutions, bimodal volcanism, hydrothermal ore formation*

Геологическое строение и условия формирования ураноносных структур

В геологическом строении многих гидротермальных урановых месторождений, наряду с пестрым составом магматических и терригенных пород, обычно присутствуют базитовые вулканические образования, синхронные с проявлением рудообразующего процесса. Базитовый вулканизм, проявленный в виде даек, экструзивных тел и крупных покровов, с нашей точ-

ки зрения, свидетельствует о важной роли глубинных нижнекоровых и верхнемантийных процессов среди ведущих факторов рудообразования. На каждом из месторождений роль и место основных вулканических пород имеют свои особенности, связанные с конкретными историко-геологическими и геолого-структурными условиями проявления магматизма. Наиболее интенсивно они выражены в рудоносных, так называемых вулcano-тектонических структурах (ВТС) континентального вулканизма, к которым относятся: месторождения Стрельцовского рудного поля в Юго-Восточном Забайкалье, Дорнотское месторождение (Монголия), объекты Чаткало-Кураминского и Бетпакдалинского районов (Таджикистан и Казахстан соответственно), а также районов Буреинского (Дальний Восток, РФ), Чешского (Чехия) и Родопского (Румыния) массивов. Кроме того, проявления основного магматизма в этапы уранового рудообразования, связанные с нижнекоровыми горизонтами земной коры (ЗК), установлены также на крупных месторождениях Северного Казахстана и в других регионах бывшего Союза и зарубежных стран. Ниже рассматривается совокупность глубинных факторов образования месторождений в ВТС и рудообразующих систем в целом.

Подробная характеристика урановых месторождений в вулcano-тектонических структурах изложена в фундаментальной монографии, подготовленной ведущими исследователями отрасли в области гидротермального уранового рудообразования Л.П. Ищуковой, А.А. Ашихминым, А.К. Константиновым, И.С. Модниковым, М.В. Шумилиным и др. [4]. Поэтому в статье коснемся лишь отдельных элементов геологического строения и условий формирования месторождений, связанных в основном с проявлением магматизма и рудообразующих процессов.

Безусловным мировым лидером и эталоном среди гидротермальных урановых объектов в ВТС является *Стрельцовское рудное поле* (СРП), расположенное в пределах одноименной кальдеры проседания (рис. 1) [1, 2, 4, 5]. Кальдера сформировалась в эпоху мезозойской (J_3-K_1) тектоно-магматической активизации (ТМА). Позиция вулcano-тектонической структуры отвечает выступу глубинных горизонтов ЗК, выраженному аномальным уплотнением гравиметрического поля и, возможно, являющегося масштабным энергетическим источником тектоно-физических и флюидогеохимических процессов (рис. 2). Возможное участие «энергетических выступов» в образовании не только ураноносных, но и других крупных структур, подчеркивается их пространственной связью с золоторудными объектами.

В геологическом строении кальдеры участвуют вулканогенные основные и кислые образования, в том числе базальты, трахидациты, андезитобазальты,

фельзиты, липариты и их туфы, а также конгломераты и песчаники. Структура проседания образовалась в узле пересечения крупных продольных восток-северо-восточных и поперечных северо-западных и субмеридиональных разломов, и ограничена кольце-

вой тектонической зоной. Ее формирование связано с наложением локальных депрессионных процессов на плутоногенное купольное поднятие предшествующего этапа геологического развития района. В основании кальдеры залегают в основном рифей-палеозойские

гранитоиды различного формационного профиля и возраста (650–700 млн лет, 470–450 млн лет, 280–260 млн лет), а также протерозойские сланцы, гнейсы, доломиты и др. Становление гранитоидов завершилось интенсивным проявлением процессов калишпатизации, альбитизации и грейзенизации, с которыми связаны рассеянная вкрапленность и скопления акцессорной редкоземельно-торий-урановой минерализации. Вулканогенно-осадочная толща отчетливо делится на две пачки: нижнюю позднеюрского возраста, сложенную лавовыми породами и дайками преимущественно основного состава — базальтами, трахитами, андезитами, и верхнюю мелового возраста, образованную преимущественно риолитами, фельзитами и их туфами (рис. 3). В радиохимическом отношении повышенными концентрациями урана до 8–9 г/т обладают наиболее древние гнейсовидные граниты и до 20 г/т — продукты кремне-щелочного метасоматоза, а также покровы фельзитов.

Стрельцовское рудное поле включает 19 месторождений, суммарные запасы которых до начала разработки составляли около 250 тыс. т урана при среднем его содержании в рудах 0,26 %. Морфология руд жильно-штокверковая, за исключением месторождений Дальнее, Новогоднее, Юбилейное и др., где она имеет пластовый характер, субогласный с

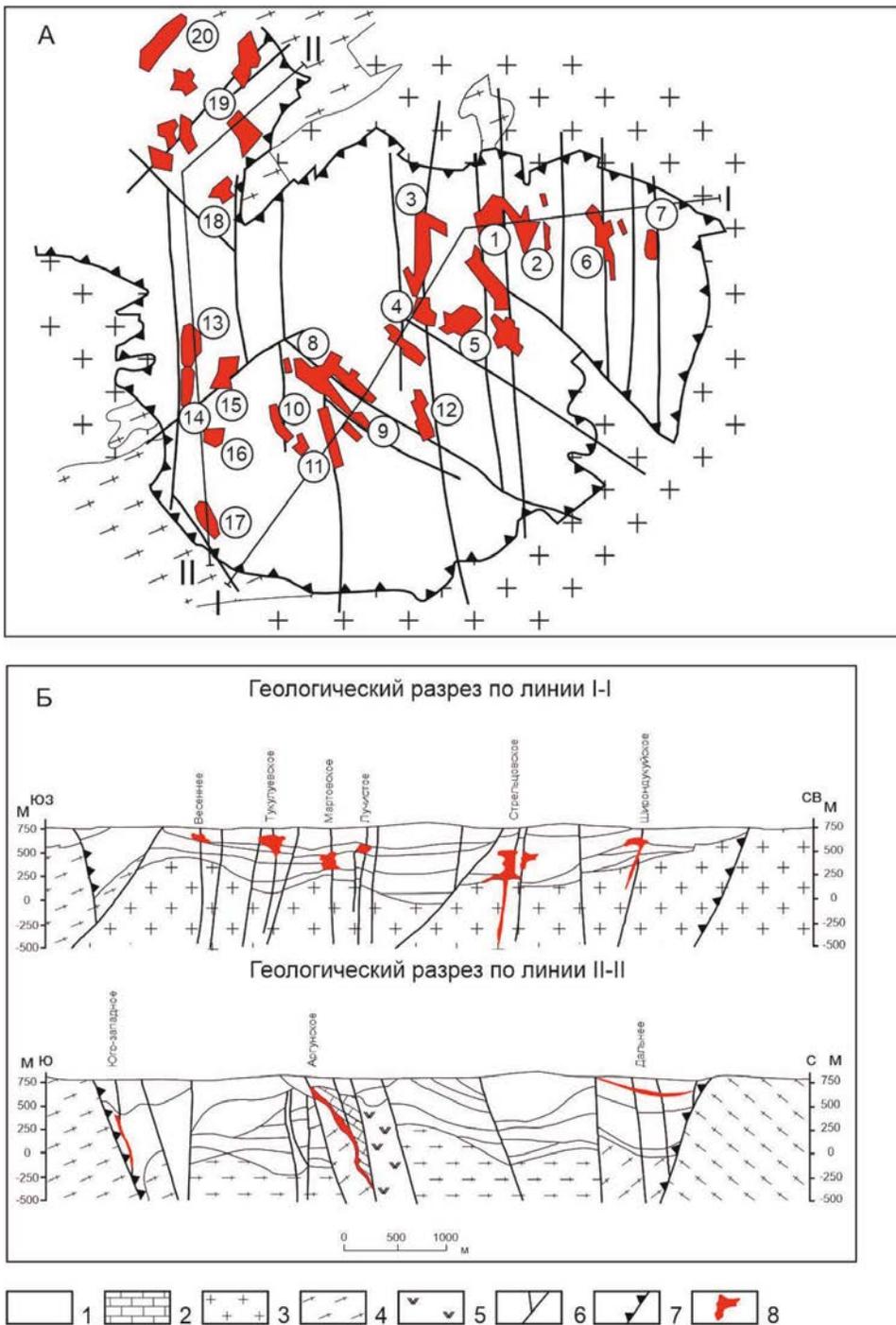


Рис. 1. Геолого-структурная схема Стрельцовской ВТС (А) и разрезы по линиям I-I и II-II (Б). (По Л.П. Ищукковой и др., 2005 [4] и данным Сосновского ПГО [10]): 1 — вулканогенные разновидности мезозойского магматизма; 2 — известняки; 3 — граниты; 4 — гранито-гнейсы; 5 — амфиболиты; 6 — крутопадающие тектонические нарушения; 7 — кольцевые разломы; 8 — месторождения урана. Цифры в кружках — месторождения: 1 — Стрельцовское; 2 — Антей; 3 — Октябрьское; 4 — Лучистое; 5 — Мартовское; 6 — Широндукуйское; 7 — Восточно-Широндукуйское; 8 — Тулукуевское; 9 — Юбилейное; 10 — Новогоднее; 11 — Весеннее; 12 — Мало-Тулукуевское; 13 — Аргунское; 14 — Жерловое; 15 — Красный Камень; 16 — Пятилетнее; 17 — Юго-Западное; 18 — Безречное; 19 — Дальнее; 20 — Полевое

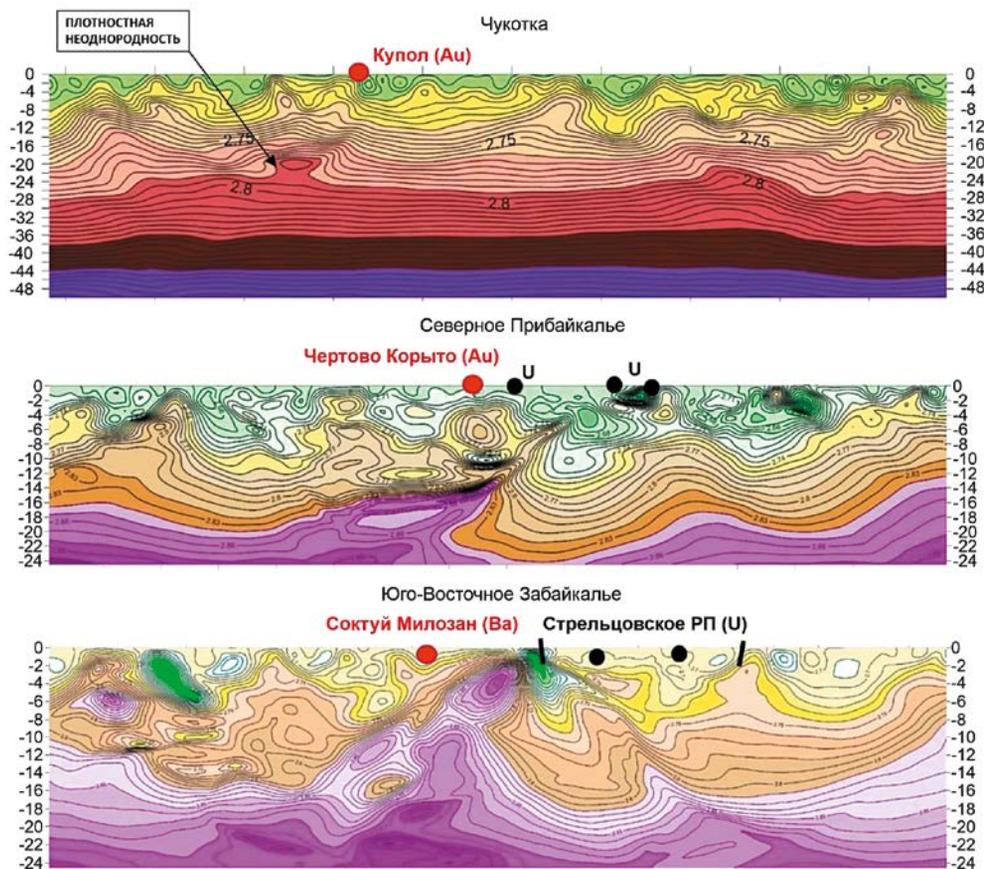


Рис. 2. Геоплотностные разрезы в районах крупных урановых и золоторудных объектов Сибири (По А.И. Корвяко и др., ВИМС)

вулканогенно-осадочной толщей. Подавляющая часть запасов рудного поля локализована в вулканитах, кроме крупнейших месторождений Антей, жильные руды которого размещаются в гранитоидах, и Аргунское с жильно-штокверковым и брекчиевым оруденением в доломитизированных известняках основания (рис. 3).

В Стрельцовской кальдере вмещающие породы подверглись различным гидротермально-метасоматическим изменениям. После становления гранитов проявился интенсивный кремне-калиевый метасоматоз (калишпатизация), скарнирование, незначительно грейзенизация, в мезозойский этап — низкотемпературные тонкослюдисто-глинистые изменения — березитизация, аргиллизация. Ореолы низкотемпературного метасоматоза являются околорудными для многостадийного коффинит-настуранового оруденения, сопровождаемого сульфидами Mo, Fe, Cu, Zn и флюоритом. U-Pb изотопный возраст рудообразующего настурана составляет 135 ± 3 млн лет [28].

При изучении глубоких скважин И.С. Модниковым, И.В. Сычевым (ВИМС) и другими исследователями в измененных гранитоидах основания СРП был установлен значительный дефицит урана, что позволило им рассматривать породы фундамента как важнейший объемный источник металла при гидротермальном рудообразовании [14]. Рудоотложение, по-видимому, происходило циклично на всем протяжении периода формирования кальдеры. Наиболее

позднее урановое оруденение накладывалось на покровы кислых лав, венчающие осадочно-вулканогенную толщу. В связи с этим рудообразующую систему СРП следует рассматривать как совокупность породообразующих и собственно рудоформирующих процессов.

В Южном Приаргунье в 50 км к северу от СРП располагается полиметаллический Кличкинский район (месторождения Кличкинское и Ноен-Тологойское), также приуроченный к депрессионной структуре мезозойской ТМА, сложенной вулканитами основного и среднего состава с прослоями терригенных пород. Однако фундаментом депрессии служат кристаллические сланцы, амфиболиты и другие метаморфические породы, что вероятно определяет, в отличие от СРП, и основной формацион-

ный профиль мезозойского магматизма и, главное, полиметаллический состав промышленного оруденения, локализованного в ореолах березитов.

Дорнотская ВТС (ДВТС), расположенная в восточной части МНР и также связанная с мезозойской ТМА, имеет полигональный характер. Она включает два месторождения — Дорнотское, Гурванбулакское и большую группу рудопроявлений урана, а также полиметаллическое Уланское и флюоритовое Холойское месторождения [13]. Нижняя часть разреза осадочно-вулканогенной толщи сложена главным образом лавовыми покровами андезитобазальтов, дацитов и их туфов, чередующимися с горизонтами конгломератов, гравелитов и песчаников. В верхней части толщи преимущественное развитие имеют фельзиты, фельзит-порфиры, кварцевые порфиры и их туфы. Завершают разрез маломощные покровы трахиандезитов, андезитобазальтов, переслоенных грубообломочными отложениями. Возраст вулканогенно-осадочного комплекса соответствует юрско-меловой ТМА — 140–170 млн лет. Его грубообломочные базальные отложения залегают на размытой поверхности палеозойского фундамента, сложенного гранодиоритами, лейкократовыми гранитами, диоритами и докембрийскими метаморфическими образованиями. В пределах ДВТС установлено большое количество глубоко проникающих в ЗК разломов восток-северо-восточной, северо-западной и субмеридиональной ориентировки.

Примечательно, что Дорнотское урановое месторождение размещается в южной части ДВТС, где в составе пород кристаллического основания доминируют, по данным Ю.Б. Миронова, Н.С. Соловьева (ВСЕГЕИ), гранит-гранодиоритовые образования, а в ее северной части с полиметаллическим Уланским месторождением — допалеозойский нерасчлененный карбонатно-вулканогенно-терригенный комплекс.

Урановое оруденение на Дорнотском месторождении в основном размещается в базальтовом покрове и в разнообломочных терригенных отложениях. В базальтах руды представляют собой плоский штокверк, с которым связано около половины запасов месторождения, в осадочном комплексе они образуют крупное пластообразное тело, локализованное в песчано-алевролитовых осадках, содержащих значительное количество углистого детрита. Лишь незначительная часть руд локализована в кислых вулканитах в виде маломощных жил и прожилков. Ведущими минералами руд являются настуран, коффинит, браннерит, при подчиненном значении молибденита и флюорита. Оруденение является гидротермальным и сопровождается соответствующими преобразованиями вмещающих пород: широко развитой дорудной аргиллизацией, рудной уранотитанатовой и оксидноурановой минерализацией и пострудными каолиновыми, кварц-каолиновыми и кварц-флюоритовыми изменениями. В то же время для пластовой залежи, локализованной в разнообломочных осадках нижней части рудовмещающей толщи, установлено сингенетичное с алевролитами происхождение урановой минерализации, непосредственно сопровождающей, как установлено электронной микроскопией, fossilized микрофауну. По этим и другим факторам рудоконтроля оруденение определено как гидротермально-осадочное, сформированное в условиях разгрузки ураноносных растворов в водоемы мезозойского продуктивного этапа [11]. Таким образом, в пределах Дорнотского рудного узла, как и в Юго-Восточном Забайкалье, урановое рудообразование сопровождало формирование осадочно-вулканогенной толщи в эпоху мезозойской ТМА, образуя как наложенное собственно гидротермальное, так и гидротермально-осадочное оруденение.

В геологическом строении полиметаллического Уланского месторождения участвуют вулканогенно-осадочные мезозойские образования — базальты, андезиты, липариты, песчаники и конгломераты, и древние метаморфические породы кристаллического фундамента. Установленная приуроченность уранового и полиметаллического объектов к блокам с различным составом пород кристаллического основания позволило Г.А. Шаткову (ВСЕГЕИ) связывать «флюидно-эксплозивную систему» (ФЭС), формировавшую Уланское месторождение, с ее проявлени-

ем в пределах древнего метаморфического комплекса, а ФЭС уранового профиля — с гранитоидным фундаментом. Этот вывод в целом согласуется с геолого-генетическими условиями формирования выше рассмотренных полиметаллической Кличкинской и урановой Стрельцовской ВТС в Юго-Восточном Забайкалье.

Типичную морфологию рудоносной кальдеры проседания с кольцевым тектоническим ограничением имеет *Каменушинская депрессионная структура*, вмещающая мелкие месторождения Ласточка и Светлое. Кальдера образована в эпоху мезозойской ТМА, наложена на позднепалеозойские граниты и гранодиориты Буреинского массива (Дальний Восток) и ограниче-

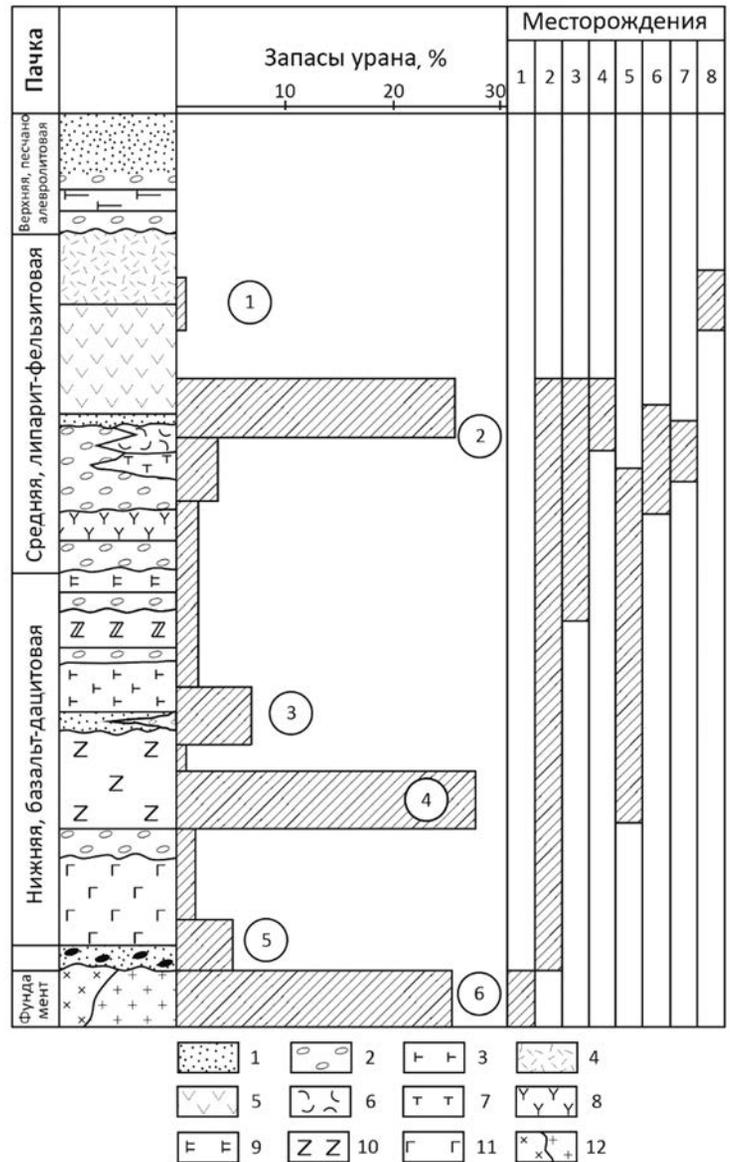


Рис. 3. Схема рудоносных уровней в Стрельцовской кальдере (По Л.П. Ищуковой и др. [4]): 1 — песчаники; 2 — конгломераты; 3 — андезито-базальты; 4 — липариты; 5 — фельзиты; 6 — туфы трахидацитов; 7 — трахибазальты; 8 — андезиты; 9 — базальты менделекаменные; 10 — трахидациты; 11 — базальты; 12 — гранит-порфиры, граниты. Цифры в кружках — № уровня. Месторождения: 1 — Антей, Аргунское; 2 — Стрельцовское; 3 — Тулкуевское; 4 — Красный Камень; 5 — Октябрьское, Лучистое, Широндукуевское; 6 — Новогоднее, Юбилейное; 7 — Дальнее; 8 — Безречное

на кольцевой тектонической зоной, контролирующей дайки риолитов, фельзитов, дацитов (рис. 4). В низах разреза располагается мощный лавовый комплекс вулканитов андезитового и андезитобазальтового состава и их туфов, знаменующий начало вулканической деятельности в условиях рифтогенного режима ТМА. В верхней части кальдеры развиты фельзиты и липариты в виде лавовых горизонтов, даек и экструзивных тел. Непосредственно на месторождении Ласточка установлены также дайки гранит-порфиоров. Положение Каменушинской кальдеры контролируется узлом пересечения крупных разломов восток-северо-восточной и северо-западных ориентировок.

Руды месторождения Ласточка локализируются в фельзитах, липаритах и дацитах, подчиняясь в своем размещении разломной тектонике северо-восточного и субмеридионального направления. Настурановые жилы и жильобразные тела имеют мощность 2–3 м, протяженность 200–300 м, среднее содержание урана в них составляет около 0,15 %, на отдельных участках достигая 0,5 %. Отдельные залежи имеют выход на современную поверхность [10]. Оруденение сформировано в несколько стадий: дорудную с прожилковой кварц-сульфидной минерализацией, рудную с настуран-флюоритовым парагенезисом и пострудную, для которой характерны кварц, карбонат, диккит. Ореолы окolorудных изменений представлены березитами и аргиллизитами. Месторождения Ласточка, Светлое и ряд урановых рудопроявлений являются близкими аналогами объектов стрелцовского типа, но с весьма малыми масштабами оруденения. Однако, по нашему мнению, эти объекты являются лишь незначительной частью крупного уранового потенциала Каменушинской кальдеры, сосредоточенного, вполне вероятно, в месторождениях скрытого типа.

Рассмотренные урановорудные объекты сформированы в эпоху мезозойской ТМА. Примечательно, что принципиально сходные условия локализации и образования присущи и палеозойским месторождениям того же геолого-промышленного типа.

Чаткало-Кураминский район, расположенный на стыке территорий Узбекистана и Таджикистана, включает группу мелких месторождений — Чаули, Алатаньга, Табошар, Майликатан и другие, с которых началась добыча урана в 1940-х годах. В послевоенные годы геологическое строение района и месторождений в течение длительного периода детально изучалось крупными геологами-уранщиками: Н.П. Лаверовым, Б.П. Власовым, Б.Л. Рыбаловым, И.С. Модниковым, И.В. Сычевым и др. На основе этих исследований были сделаны первые выводы об условиях локализации и формирования месторождений в областях континентального вулканизма. Ниже приводятся основные черты геологического строения наиболее зна-

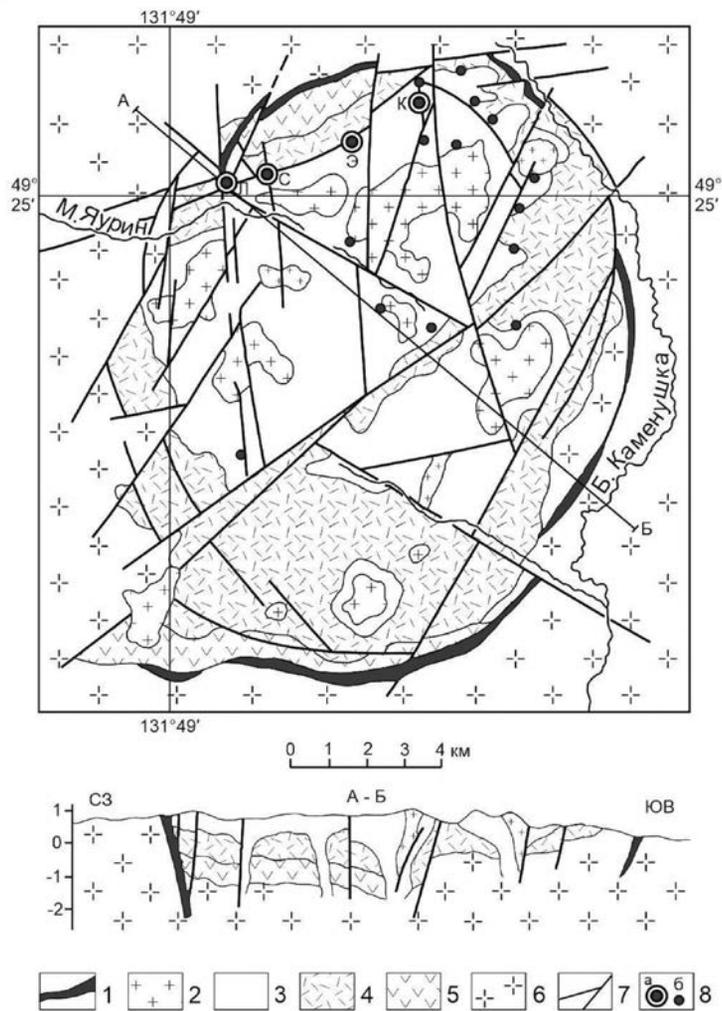


Рис. 4. Геологическая карта Каменушинской ВТС и разрез по линии А-Б (По материалам Таежной экспедиции) [10]. 1–3 — обманйский комплекс (K_2): 1 — дайки гранит-порфиоров, риолитов, фельзитов; 2 — субвулканические интрузии гранит-порфиоров; 3 — экструзии фельзитов; 4 — солонечный комплекс (K_1) — кварцевые порфиры; 5 — станолірський комплекс (K_1) — андезит-базальты, их туфы и туфогенно-осадочные породы каменушинской свиты; 6 — гранитоиды фундамента (PZ_3); 7 — разломы; 8 — урановые месторождения (а): Л-Ласточка, С-Светлое, Э-Эхилканское, К-Каменушенское и рудопроявления (б)

чимого объекта Чаули, локализованного в пределах Карабашской ВТС пермского возраста.

Рудовмещающий вулканогенно-осадочный комплекс начинается с андезитов и дацитов, залегающих на размытой поверхности гранитоидов каменноугольного возраста или на базальных конгломератах. Другими словами, формирование ВТС, как и других структур подобного типа, изначально связано с проявлением базитового магматизма, т.е. с активизацией глубинных нижнекорковых процессов. В дальнейшем ведущая роль в вулканогенно-осадочном процессе принадлежит туфам кварцевых порфиоров, риолитов, игнимбрикам кварцевых порфиоров при подчиненном значении маломощных несортированных терригенных отложений и единичных горизонтов лав основного состава. Мощность осадочно-вулканогенной толщи составляет первые сотни метров. Основные тектонические нарушения, в том числе блокообразующие, ориентированы в

северо-восточном направлении, поперечные — в субмеридиональном и северо-западном. Запасы урана составляют 4,5 тыс. т при содержании металла $n \cdot 0,1\%$. Залежи имеют сложную гнездовую и груболинзовидную морфологию, локализуются в трещинных зонах среди риолитовых игнимбритов и других кислых разностях вулканитов. Настурановые руды сопровождаются хлоритизацией, каолинитизацией и сульфидизацией вмещающих пород [14, 15, 16]. На месторождении Алатаңга, запасы урановых руд которого близки запасам Чаули, настурановое оруденение имеет еще более сложную морфологию, подчиняясь сложной системе субвертикальных разрывных нарушений. Локализуются руды в субвулканических гранит-порфирах, кварцевых порфирах и частично в андезитах. Возрастной диапазон рудообразования составляет 260–270 млн лет, т.е. связан с проявлением пермского вулканизма в пределах кальдер и других депрессионных структур.

Значительным урановорудным потенциалом, связанным с гидротермальными месторождениями в ВТС, обладает *Чулийский район* в Южном Казахстане. Район включает крупные, в том числе уже отработанные месторождения Кызылсайской, Ботабурумской и ряда других ВТС.

Наиболее сходной с рассмотренными рудоносными ВТС является Кызылсайская концентрично построенная депрессионная структура, вмещающая одноименный рудный узел, в пределах которого было выявлено 12 месторождений уран-молибденовой формации. Депрессия сложена девонской толщей вулканитов мощностью порядка 2500 м, в нижней части которой залегают туфоконгломераты с горизонтами лав основного и среднего состава, в верхней — игнимбриты риолитов и риолит-дацитов. В самой верхней части разреза залегают микрогранит-порфиры и кварцевые порфиры (более 200 м), содержащие мелкие ксенолиты нижежележащих основных и средних по составу магматических пород. На горизонтально слоистую вулканогенно-осадочную толщу наложены дайки и экструзивные тела основного и кислого состава. Основание вулканогенно-осадочного комплекса ВТС представлено девонскими гранитоидами. Примечательно, что практически все вулканические экструзивные и интрузивные образования рудного поля имеют повышенные концентрации урана (порядка 1,5–2 кларка), что свидетельствует о геохимической специализации всего комплекса процессов формирования рудоносной структуры. Оруденение имеет жильную и штокверковую морфологию, и содержит 0,1–0,2 % урана. Основным минералом руд является колломорфный оксид урана, реже встречается коффинит. Настуран отлагался на стенках трещин и обломков брекчий. Рудосопровождающая жильная минерализация представлена хлоритом, каолинитом, монтмориллонитом, кальцитом и рудными — галенитом и молибденитом. Околорудные изменения во вмещающих породах выражались в развитии серицита, кварца, кальцита, что способствовало их осветлению и покраснению (гематитизация) в околопрожилковом пространстве. Рудообразование, по данным декрипи-

тации, протекало при температурах 240–180° с понижением к верхним горизонтам.

К крупной *Чернореченской кальдере*, расположенной на западном склоне Восточно-Саянского поднятия, приурочено мелкое (5,2 тыс. т урана, $C_{cp} = 0,16\%$) месторождение Рябиновое, включающее участки Рябиновский, Магнитный, Чагинский. В основании кальдеры залегают биотитовые и лейкократовые граниты, претерпевшие постмагматический кремне-калиевый метасоматоз с образованием рассеянной уранинитовой минерализации. Осадочно-вулканогенная толща кальдеры раннего-среднего девона сложена преимущественно покровами основного и среднего состава (базальты, андезитобазальты и др.) при подчиненном значении риолитов. Вулканиты перемежаются горизонтами несортированных разнообломочных осадков. На участке месторождения Рябиновое, приуроченном к локальному выступу гранитного фундамента, в нижней части разреза вулканогенно-осадочных пород залегают базальные конгломераты и песчаники, которые выше сменяются андезитобазальтами, знаменующими начало вулканической деятельности. Верхняя часть разреза представлена трахиандезитами с маломощными прослоями песчаников, а венчают толщу вновь продукты основного вулканизма — базальты.

Настурановое оруденение носит многоярусный характер, локализуется практически во всех разновидностях пород и по времени формирования, вероятно, соответствует наиболее молодым магматическим образованиям — дайкам монцодиабазов, пересекающих кристаллический фундамент, вулканогенно-осадочную толщу и прослеженных до современной эрозионной поверхности. Оруденение локализовано на нескольких литолого-стратиграфических уровнях, размещаясь в породах фундамента и во всех разностях вулканитов и их туфов. Основная морфология руд — пластообразные тела, при подчиненной роли прожилковых форм, связанных с субвертикальной трещиноватостью. Таким образом, месторождение Рябиновое, как и вышерассмотренные, формировалось в условиях развития депрессионной структуры, зарождение которой происходило в обстановке тектонического растяжения и масштабного проявления основного вулканизма видимо нижнекорового происхождения. В последующем основной магматизм сменяется проявлениями лав среднего состава при подчиненной роли кислых разностей (риолиты). Рудообразование относится к заключительной стадии формирования структуры. Пластообразная морфология залежей может свидетельствовать о благоприятных при рифтогенезе условиях разгрузки продуктивных растворов в обстановке тектонического растяжения.

Рассмотрение геологического строения основных ураноносных структур территорий России, Монголии и Казахстана позволяет сделать некоторые выводы об особенностях их формирования.

Практически все рассмотренные ураноносные ВТС, связанные или с мезозойской, или с палеозойской эпохами, представляют собой активизационные

депрессивные структуры, образованные на гранитизированном основании. Их формирование начиналось с масштабного проявления основного магматизма в виде лав, даек и малых интрузивных тел, сменяющегося кислым вулканизмом с образованием вулканогенно-осадочной толщи. Урановое рудообразование сопровождается практически весь период формирования ВТС, однако наиболее продуктивными являются поздние процессы, наложенные на продукты кислого магматизма и сопряженные с проявлением в незначительных объемах субвулканического магматизма основного состава.

Региональный рифтогенез рудообразующей эпохи сопровождался активизацией глубинных горизонтов литосферы с формированием выступов нижней коры и верхней мантии и интенсивной деятельностью флюидопотоков, активно воздействующих на консолидированную кору. С деятельностью этих процессов связано проявление основного магматизма, а в последующем, за счет воздействия глубинных флюидопотоков на гранитоидный слой, и кислого вулканизма. Наиболее интенсивно бимодальный магматизм проявился в локальных тектонически ослабленных узлах пересечения глубинных разломов различной ориентировки, осложненных кальдерами проседания или иными полигональными депрессионными структурами.

Гидротермальные урановые рудообразующие системы

Выше было показано, что практически на всех рассмотренных месторождениях в ВТС рудообразование сопровождалось вулканогенно-осадочными процессами, что позволяет их отнести к закономерной составляющей рудоформирующих систем. Однако главными факторами, определяющими тип и условия проявления гидротермальных продуктивных систем, являются рудоконтролирующая метасоматическая зональность, типы и природа рудообразующих растворов и источник урана с сопутствующими элементами. Для рассматриваемых месторождений известно несколько типов гидротермально-метасоматических окolorудных изменений, относящихся к двум геохимическим группам — щелочной и кислотной; к первой относится низкотемпературная альбитизация эйситового типа, ко второй — березитизация, гидрослюдизация и аргиллизация. Гидротермальный продуктивный процесс, как правило, образует минерально-геохимическую зональность, в максимально тектонизированном ядре (тыловой части) которой располагается жильное или штокверковое коффинит-настурановое оруденение. Рудоконтролирующая зональность является важнейшим элементом рудообразующих систем, а окolorудные ореолы — надежными поисковыми критериями и признаками.

Приведенные в общем виде сведения хорошо известны широкому кругу отечественных и зарубежных специалистов, а особенности урановых объектов нашли отражение в многочисленных публикациях. В то же время происхождение продуктивных растворов, источник рудного вещества, роль глубинных факторов в рудообразовании до сих пор являются дискуссионными.

В фундаментальных обобщающих монографиях и статьях Л.П. Ищуковой и других [4, 5, 6] рассматриваются, как варианты, три источника урана: специализированные на металл вмещающие породы, преимущественно лейкократовые граниты, магматические очаги кислого формационного профиля и астеносфера. Утвердившись в теснейшей взаимосвязи оруденения и рудоконтролирующей гидротермально-метасоматической зональности, становится очевидным, что нельзя рассматривать проблему источника металла в отрыве от природы минерализующих растворов и условий их деятельности на различных глубинных уровнях ЗК.

Авторами монографии [4] предпочтение отдается первому варианту. Действительно, на площади СРП и сопредельных участках установлены разновеликие очаги дефицита урана в гранитоидах, ареал распространения которых приблизительно соответствует области развития комплекса гидротермально-метасоматических изменений. При этом промышленное жильное и штокверковое уран-молибденовое оруденение локализовано в ядерной части зональности. Не стоит забывать, что эндогенная гидротермальная, как и экзогенная инфильтрационная системы являются в первую очередь гидрогеологическими процессами и могут продуктивно действовать лишь при наличии трех важнейших элементов: высоконапорного очага растворов на глубине; дренирующей открытой системы тектонических нарушений; вышерасположенной низконапорной области разгрузки растворопотока, где происходит минералоотложение [21]. В рамках рассматриваемой, в целом правомочной модели, породным источником металла являются специализированные, в том числе гранитоидные комплексы на глубине, которые прорабатываются глубинными же растворами. Однако природа, т.е. источник этих высоконапорных растворов, пока до сих пор не ясен. Ниже вновь вернемся к этой модели как наиболее продуктивной, дополнив ее некоторыми глубинными факторами.

Во втором варианте в качестве источника металла предполагаются магматические очаги крупных батолитов гранитоидного ряда. Эта концепция предложена крупнейшими геологами-рудниками прошлого (А.Г. Бетехтин, В.И. Смирнов, Ф.И. Вольфсон и др.) и поддерживается их последователями (В.И. Величин, Б.Л. Рыбалов, Б.И. Омеляненко, А.П. Алёшин и др.). Последняя редакция этой модели изложена в статье Алёшина А.П. с соавторами, где на основании радиогеохимических, минералогических исследований и результатов изучения физико-химических условий формирования оруденения по флюидным включениям показано, что уран и фтор в рудах Стрельцовой ВТС парагенны и их источником являлась эволюционировавшая кислая Li-F-содержащая магма [1]. Однако рудообразующему периоду (~135 млн лет) в пределах СРП близки лишь риолиты и другие вулканические образования и туфы тургинской свиты (150–140 млн лет). Лейкократовые Li-F-граниты кукульбейского интрузивного комплекса установлены лишь далеко за пределами кальдеры [2]. Предполагаемое авторами [1]

наличие в пределах Стрельцовской ВТС глубинного (5–6 км) магматического очага «кукульбейского» петрологического профиля не подтверждается существенными геохимическими различиями гранитоидов этого типа и вулканитов тургинской свиты, которые следовало бы считать их производными. Так, риолиты и другие вулканиты кальдеры существенно отличаются от кукульбейских гранитов высокими концентрациями Zr, Nb, Ce, Eu, REE. По мнению О.В. Андреевой и других [2], кислые вулканиты кальдеры по содержанию радиоактивных и других элементов значительно уступают древним гранито-гнейсовым образованиям кристаллического основания.

Роль магматических очагов гранит-гранодиоритового профиля является основной при формировании эндогенных месторождений молибдена, вольфрама, комплексных медно-порфировых и др. Крупными отечественными и зарубежными исследователями (В.Т. Покалов, Р.Н. Sillitoy и др.) разработаны геолого-генетические модели, предусматривающие, что в ходе остывания массива, формирования гранитной кристаллической корки и постепенной минерализации расплава, в камере накапливаются остаточные растворы с существенной водной составляющей и некогерентными редкими компонентами. В последующем, в ходе локального рифтогенеза и тектонического растяжения, в апикальной и краевой частях вмещающего комплекса в открытых трещинах формировались дайки пестрого состава и само промышленное оруденение. Для модели гидротермального уранового рудообразования подобная схема вряд ли приемлема, поскольку становление гранитных массивов в рассмотренных рудных объектах ВТС завершилось на десятки и сотни миллионов лет раньше начала рудообразующего этапа. В частности, в эталонном Стрельцовском районе самый поздний этап гранитизации завершился в пермском периоде (около 250 млн лет), в результате аккреционно-коллизийных процессов, сопровождавших сдвигание Сибирского и Северо-Китайского кратонов, сформировавших фундамент восточной части Монголо-Охотского пояса. Рудообразующий этап имеет возраст порядка 135 млн лет (ранний мел) и проявился в ходе мезозойской рифтогенной тектоно-магматической активизации в вулканотектонических структурах Забайкалья, Монголии и Дальнего Востока, т.е. значительно позднее становления гранитоидного основания.

Кроме того, при формировании гранитоидов и вулканитов кислого состава, уран, торий, редкоземельные элементы входили в состав рассеянной акцессорной минерализации, которая являлась закономерным, естественным компонентом минерального состава пород. Лишь на завершающих стадиях гранитообразования в процессе высокотемпературного кремне-щелочного метасоматоза возникали локальные скопления акцессорных минералов с аномальными концентрациями урана, не создающими сколько-нибудь промышленно значимых скоплений. Исключение составляет крупное месторождение Россинг с неконтрастным

урановым оруденением и средним содержанием металла не более 0,05 %. Итак, ни магматические очаги кислого профиля, ни образования глобальных эпох гранитизации и ультраметаморфизма нигде на планете не проявили себя в роли масштабного магматического источника для образования рудных скоплений в ходе породообразующей дифференциации и кристаллизации в недрах. В связи с этим, формации интрузивных и вулканических пород кислого ряда с рассеянными концентрациями сингенетичного урана, выдающийся исследователь геологии и генезиса урановорудных эндогенных месторождений А.И. Тугаринов образно называл его «могилой». В настоящее время породы кислого состава, нередко характеризующиеся заметными надкларковыми содержаниями урана, рассматриваются как «законсервированный» источник урана для последующего гидротермального или гидрогенного рудообразования, образовавшийся в процессе рудоподготовительного этапа.

Также вряд ли целесообразно связывать образование гидротермальных урановых месторождений, по существу локальных богатых скоплений, с астеносферой как объемным источником металла. В результате длительной необратимой дифференциации и расслоения протопланетного вещества Земли за счет глубинных геосфер происходило формирование гранито-гнейсового слоя ЗК, в котором приняли участие литофильные и геохимически совместимые с ними редкие, радиоактивные и другие рудные элементы. В соответствии с этим и на основании существующих фактических данных большинством зарубежных и отечественных исследователей астеносфера считается истощенной по вышеназванным элементам. Осредненное содержание урана в астеносфере оценивается на уровне 0,04 г/т, что почти на два порядка ниже, чем в гранито-гнейсовых формациях, где он распределен в рассеянном состоянии в виде сингенетичных и метаморфогенных минеральных концентраций.

Таким образом, наиболее вероятным объемным источником урана и сопутствующих элементов при гидротермальном рудообразовании безусловно следует рассматривать гранитоидный субстрат ураноносных районов, из которого извлечение и мобилизация урана осуществлялись специализированными термальными растворами. На основании этого, еще в 1980-е годы ведущими специалистами ВИМСа И.С. Модниковым, И.В. Сычевым и другими разработана соответствующая геолого-генетическая модель, которая нашла отражение в крупной обобщающей монографии [4], статьях [6, 14] и совершенствуется их последователями применительно к конкретным геологическим обстановкам. В составе модели выделены три этапа: рудоподготовительный, собственно рудный и пострудный; в упрощенном изложении она имеет следующий вид. Первый этап связан со становлением и деятельностью в качестве породных источников урана гранито-гнейсовых куполов, характеризующихся образованием на заключительных стадиях своего развития специализированных на уран преимущественно лейкократовых

фаций гранитов. Второй, рудный этап реализовался в процессе ТМА масштабным проявлением гидротермальной деятельности, наложенной на гранитоиды с формированием восходящих ураноносных растворов и отложением из них в обстановках резкого падения скорости, давления и температуры промышленных скоплений урана. Третий, пострудный этап, определил современное положение сформированных рудных объектов в разрезе земной коры за счет отрицательных и положительных тектонических перемещений продуктивных блоков и эрозионной деятельности.

Эта модель уранового гидротермального рудообразования давно используется в поисковой практике. В статье предусматривается рассмотреть возможные условия глубинного зарождения гидротермальных растворов и их продуктивного воздействия на специализированные породы гранитного субстрата.

Модель урановой рудообразующей системы, включающей глубинные факторы, процессы формирования рудоносных структур, источники и деятельность гидротермальных, в том числе продуктивных растворов, целесообразно рассмотреть в основном на примере эталонного Стрельцовского рудного поля с привлечением данных по другим районам, связанным как и СРП, с проявлением мезозойской тектоно-магматической активизации. ТМА наложилась на крупные, преимущественно гранитизированные и плутоногенные структуры Монголо-Охотского пояса, сформированной в позднем палеозое-раннем мезозое на месте былой океанической области за счет сдвигания крупнейших кратонов Азиатского континента — Сибирского и Северо-Китайского и сопровождавших его коллизионно-аккреционных процессов.

Тектоно-магматическая активизация развивалась в рифтогенном режиме, вызванном воздействием на сформировавшуюся к позднему палеозою ЗК гигантского мантийного плюма [29]. По всей вероятности, в этом масштабном процессе активно участвовали глубинные флюиды, представлявшие собой газожидкие растворы с надкритическими давлением и температурой, существенно отличавших их от коровых гидротермальных растворов. В частности, О.М. Розен предусматривает интенсивную флюидизацию плюмов, являющихся источником кимберлитовых магм [25]. Основным генератором флюидопотоков являлись астеносфера и более глубокие горизонты, где с максимальной активностью проявлялась дегазация глубинных недр [8, 19]. За счет участия в составе флюидов газовой фазы, их плотность существенно ниже плотности вещества астеносферы, что определяет восходящую миграцию флюидопотоков.

По представлениям многих исследователей газобразные флюиды первоначально накапливались в астеносфере под более плотными нижними горизонтами литосферы. Однако сейсмическими глубинными исследованиями последнего времени в верхней мантии, в нижней части литосферы, установлены протяженные (до нескольких км) зоны пониженных скоростей, которые могут быть отождествлены с горизон-

тами «реликтовой флюидизации» [8, 22]. Состав газов глубинных флюидов определяется по немногочисленным результатам изучения газожидких включений (ГЖВ) в алмазах и гранатах кимберлитов. В последнее время широкое развитие приобрели методы высокотемпературной газовой хроматографии минералов и горных пород, которые в потоке гелия в диапазоне температур до 1000 °С позволяют наиболее достоверно определять состав и концентрации заключенных в них летучих компонентов [9]. Совместный анализ результатов изучения ГЖВ, газовых компонентов минералов и пород с помощью хроматографии с привлечением данных минералогической термометрии, позволяет получить более надежные сведения о составе флюидов в мантии и нижней коре. При изучении алмазов и гранатов из кимберлитов установлены существенно более высокие величины отношения H_2/H_2O и CO/CO_2 для мантийных флюидов в наиболее глубоко залегающих минералах в сравнении с подкоровыми, что является важным свидетельством повышения роли кислорода с уменьшением глубины залегания горизонтов Земли [19]. В составе флюидов доминируют (80 %) CO_2 и H_2O при подчиненной роли CO , CH_4 , H_2 , H_2S , F , S , Cl и др. [8, 20]. Определенный, но, видимо, существенно меньший вклад во флюидизацию ЗК вносят флюиды, высвобождающиеся при высокобарическом метаморфизме формационных комплексов верхней мантии и нижней коры. Их состав по данным Л.Л. Перчука [20] в целом близок указанным выше флюидам.

По масштабам и другим особенностям проявления выделяют два типа флюидных систем — глобальную и автономную [8]. К первым отнесены глубинные флюидопотоки, сопровождающиеся масштабным проявлением магматизма в нижнем и среднем горизонтах ЗК, ко вторым — относительно локальные проявления флюидизации с образованием гранитных массивов и вулканотектонических структур. В формировании последних значительную роль играли узлы пересечения глубинных разломов и связанные с ними интенсивно тектонизированные участки недр, которые обеспечивали наиболее благоприятные условия для фильтрации флюидов, вызванных ими магматических процессов бимодального (основного и кислого) профиля и деятельности рудообразующих растворов. Наиболее интенсивно локальная (очаговая) флюидизация ЗК проявилась на востоке Евразии в мезозойскую тектоно-магматическую активизацию.

Заложение ВТС и ее геологическое развитие во многом связаны с мощным воздействием на ЗК глубинного энергетического очага, которому отвечает установленная специалистами ВИМСа (А.И. Корвяко и др.) крупная геофизическая аномалия уплотнения в районе СРП (рис. 2). Подобные «энергетические выступы» выявлены также при интерпретации региональных полей Δg в районах крупных золоторудных объектов. Возникшие, вероятно, в ходе тектоно-магматической активизации, они, по-видимому, отвечают масштабным очагам переработки вещества нижней коры и верхней мантии, законсервированные до на-

стоящего времени. Весьма вероятно, что основными агентами «энергетического» воздействия являлись высоконагретые и высоконапорные флюидопотоки астеносферы и более глубоких горизонтов Земли.

Первые фазы очаговой флюидизации вызывали плавление вещества перидотит-эклогитового слоя верхней мантии и гранулит-базитового слоя нижней коры, сопровождавшееся магматизмом и лавовыми излияниями основного состава, которые вскрываются в низах вулканогенно-осадочного комплекса практически на всех без исключения ВТС рассматриваемого региона. В дальнейшем агрессивному воздействию высоконагретых флюидопотоков подвергались гранитоиды вышележащих горизонтов ЗК, вызывавшие проявление магматизма кислого профиля и образование покровов фельзитов, липаритов и других вулканитов, слагающих верхнюю часть геологического разреза депрессионных рудомещающих структур. В завершение магматических процессов бимодального вулканизма в ураноносных ВТС вновь проявляется основной магматизм с формированием маломощных покровов и даек, что, вероятно, свидетельствует об активизации глубинных геосфер в период наиболее активного проявления рудообразования.

В последующем, на заключительных стадиях формирования ВТС, происходили собственно рудообразующие процессы, связанные с воздействием высоконагретых флюидопотоков на специализированные по урану и ряду других компонентов породы гранитоидового комплекса. Флюиды, первоначально содержавшие преимущественно в газовой фазе H_2O , CO_2 , а также Cl , F , H_2 , CH_4 , S и другие летучие, обеспечивающие восстановительные свойства флюидопотока, при восходящем движении обогащались водной составляющей и последовательно преобразовывались в высокотемпературные растворы.

В отличие от газообразных агентов, поднимающихся с нижних уровней ЗК по межзерновым интерстициям и микротрещиноватости, растворы при своей миграции использовали поровое пространство пород и системы мелких, в том числе открытых трещин, сопряженных с крупными разломами и узлами их пересечения.

Взаимодействуя с гранитоидами и другими породами кислого состава, высоконагретые (500–600 °С) восстановительные растворы активно обогащались ураном, торием, танталом, ниобием, редкоземельными и другими элементами. Уран в этих условиях мигрировал, вероятнее всего, в четырехвалентной форме [3] в виде хлоридов, фторидов и в других миграционно-способных соединениях. Этот процесс сопровождался микроклиннизацией, грейзенизацией, турмалинизацией и апатитизацией пород. При продвижении к низконапорной близповерхностной области происходило существенное снижение температуры растворов до 200–250 °С, и в этих условиях соединения 4-валентного урана, в связи с их гидролизацией, распадались, а металл становился одним из подвижных компонентов низко-среднетемпературных растворов, формирующихся за

счет охлаждения и разбавления восходящих высоконагретых флюидов. Их объемное воздействие на высококордиоактивные гранитоиды в обстановке открытой тектонической трещиноватости, свойственной глубинам 1–1,5 км [7], вызывало пропицитизацию, серицитизацию и аргиллизацию пород. Метасоматические процессы сопровождались масштабной мобилизацией из пород урана с сопутствующими компонентами, приводящей к формированию собственно гидротермальных ураноносных продуктивных растворов. Растворенный уран в этих условиях (< 250 °С) мигрировал в 6-валентной форме в составе уранил-карбонатного комплекса, который в приповерхностной обстановке при резком падении температуры, давления и, главное, дегазации углекислоты разрушался с образованием оксидноуранового оруденения.

Механизм формирования низко-среднетемпературных ураноносных растворов и собственно гидротермального рудообразования детально изучен крупными специалистами в области геологии и генезиса урановых месторождений (И.С. Модников, И.В. Сычев, А.И. Тугаринов, Р.П. Рафальский, Г.Б. Наумов и др.) [14, 15, 17, 18, 23, 24], поэтому в данной работе они не рассматриваются. Однако следует отметить, что в вакуолях рудосопровождающей жильной минерализации наряду с доминирующей концентрацией CO_2 установлены H_2 , F , Cl , CH_4 . Эти компоненты могут являться свидетельством глубинного, астеносферного «дыхания» недр, а с другой стороны водород и углеводород вероятно играли немаловажную роль восстановителя шестивалентного урана в приповерхностной области рудообразования при распаде уранил-карбонатного комплекса.

Геолого-генетическая модель гидротермальных урановых месторождений, рассмотренная в основном применительно к наиболее крупному Стрельцовскому урановорудному району Юго-Восточного Забайкалья, отвечает и условиям формирования монгольских объектов Дорнотского рудного поля и Каменушинской ВТС на Дальнем Востоке, сформированным в обстановке интенсивного проявления мезозойской ТМА. Те же геолого-генетические факторы установлены для рудных районов континентального вулканизма Южного Казахстана и Средней Азии.

Важное значение рассмотренные глубинные факторы имеют, вероятно, и для образования урановых гидротермальных месторождений, не связанных с депрессионными вулкано-тектоническими структурами, в том числе с объектами *Грачевского рудного поля* (Республика Казахстан). Рудное поле располагается на северо-западном склоне Кокчетавского докембрийского срединного массива и сформировано в палеозойскую эпоху плутоногенной ТМА. Оно включает крупные месторождения Грачевское, Косачинное, а также Февральское, принадлежащие к одному геолого-промышленному жильно-штокверковому типу с браннерит-коффинит-настурановым оруденением, с суммарными запасами урана порядка 115 тыс. т при его среднем содержании 0,12–0,15 % [26, 27]. Месторождения размещаются в пределах раннепалеозой-

ского прогиба, сложенного венд-раннепалеозойскими вулканогенно-терригенными породами — углеродисто-карбонатными и песчано-глинистыми сланцами. Осадочно-метаморфогенная толща прорвана крупными массивами гранитоидов ордовико-девонского возраста, завершившими формирование геологической структуры района, в связи с чем ее следует называть плутоногенно-тектонической структурой (ПТС). Наиболее крупное месторождение Косачинное (запасы урана 96 тыс. т при $C_{ср.}$ 0,114 %) включает десяток разрозненных объектов, размещающихся в осадочно-вулканогенных образованиях венда и нижнего палеозоя, и в кембрийских диабазах и порфиритах.

Девонская ТМА проявилась формированием разнориентированной разрывной тектоники, в том числе субвертикальных рудоконтролирующих нарушений. В них развиты лавобрекчии основного состава и урановое оруденение, представляющее собой систему маломощных трубообразных в сечении образований. Эти данные свидетельствуют о локальном проявлении в условиях орогенеза структур растяжения, являющихся проводниками глубинного основного магматизма и рудоносных растворов, сформировавших исключительно жильное оруденение. Таким образом, рудообразующий этап в Грачевском рудном поле и в других рудных районах Кокчетавского блока не сопровождался масштабным рифтогенезом с образованием депрессионных структур и проявлением лавового бимодального магматизма, как это происходило в районах развития вулкано-тектонических структур. В то же время локальные структуры растяжения обеспечили связь рудообразующих обстановок с глубинными нижнекоровыми горизонтами ЗК, что имеет важнейшее значение для зарождения и развития комплекса рудогенных процессов. Особенности проявления уранового рудообразования в орогенных структурах и участия глубинных факторов заслуживают отдельного специального рассмотрения.

Заключение

1. Рудообразующая гидротермальная урановая система, по нашему мнению, должна включать всю совокупность глубинных и коровых процессов, взаимодействие которых и обеспечивает продуктивность крупных рудных объектов. К числу таких взаимосвязанных процессов относятся: формирование в условиях ТМА вулкано-тектонических структур под воздействием глубинной флюидизации, образование в их составе бимодального магматического комплекса пород, проявление высоко- и низкотемпературной продуктивной гидротермально-метасоматической деятельности, сопровождающейся минералого-геохимическим преобразованием пород, и, наконец, процесс рудоотложения во внутренних, максимально тектонизированных участках метасоматических ореолов.

2. Формирование ВТС происходило в узлах интенсивной тектонической нарушенности, в участках выступов глубинных горизонтов высокоплотных пород, сопряженных с региональной рифтогенной деструкцией ЗК, в обстановке активного развития ТМА.

3. Одним из ведущих факторов рудообразующих систем являются высоконагретые глубинные флюиды, формирующиеся в астеносфере и на более глубоких горизонтах за счет дегазации земных недр. В первоначальном составе флюидов доминирующее (около 80 %) значение имеют H_2O и CO_2 , сугубо подчиненную роль играют CO , CH_4 , H_2 , H_2S , F , Cl и другие летучие. Именно восходящие флюиды являются основными энергоносителями, участвующими в преобразовании ЗК. Различают глобальное и автономное (очаговое) проявление флюидопотоков и флюидизации. Их очаговое проявление по тектонически ослабленным зонам ВТС вызывает переработку и плавление формаций верхней мантии, «базальтового» и «гранитного» горизонтов ЗК с формированием бимодальных вулканических комплексов структур проседания.

4. Глубинные флюиды являются также исходными для зарождения и деятельности гидротермальных, в том числе рудоносных коровых растворов. Высоконагретые флюидопотоки при восходящей миграции последовательно насыщаются водной составляющей, и взаимодействуя с породами гранит-метаморфических горизонтов ЗК преобразуются в металлоносные растворы, содержащие уран, торий, цирконий, редкие, редкоземельные и другие элементы. В условиях высоких температур (более 500 °С) и давлений (более 5 килобар), на этих глубинах и в сугубо восстановительной обстановке уран находился в 4-валентной форме в составе хлоридов, фторидов и других миграционно-способных соединений. При дальнейшем восходящем продвижении на глубины 1,5–1 км температура растворов снижалась до 250–200 °С, что вызывало их преобразование в средне-низкотемпературные, гидролизацию и распад урансодержащих соединений. Средне-низкотемпературные растворы активно воздействовали на гранитоиды основания ВТС с проявлением в них пропилитизации, эйситизации, березитизации, гидрослюдизации, аргиллизации, приводящих к активной мобилизации урана и сопутствующих компонентов, что и являлось основным источником формирования оруденения. Основной формой нахождения урана, устойчивой в этих условиях, являлся уранил-карбонатный комплекс с U^{6+} . По данным изучения вакуолей в жильных минералах состав растворов определен как карбонат-сернистый. В ГЖВ наряду с основным компонентом CO_2 установлены S , H_2 , Cl , F и другие летучие.

Рудоотложение происходило на глубинах 1,0–0,5 км, $T \sim 150–200$ °С, в «барьерных» условиях с резким снижением температуры, давления, скорости движения ураноносных растворов, а, главное, дегазации углекислоты, вызывавших распад уранил-карбонатного комплекса и образование оксидно-уранового оруденения. При этом восстановителем U^{6+} до 4-валентного состояния, вероятно, являлись водород и углеводороды ураноносных растворов.

5. Успешно используемая в последние десятилетия методика прогноза и поисков гидротермальных урановых месторождений базируется на геолого-гене-

тических моделях, разработанных еще в 1980-е годы И.С. Модниковым, И.В. Сычевым, А.К. Мигутой, Л.П. Ищуковой и другими исследователями, охватывающими процессы мобилизации урана из гранитов, условия его миграции к палеоповерхности и собственно рудонакопление. С учетом рассмотренных в статье данных прогнозно-поисковый комплекс может быть дополнен геофизическими, геотектоническими и формационными критериями, отражающими продуктивную роль глубинных факторов образования гидротермальных урановых месторождений не только в ВТС, но и в других геолого-структурных обстановках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алешин, А.П. Генезис и условия формирования уникального молибден-уранового Стрельцовского рудного поля: новые минералого-геохимические и физико-химические данные / А.П. Алешин, В.Н. Величкин, Т.Л. Крылова // Геология рудных месторождений. — 2007. — Т. 49. — № 5. — С. 446–470.
2. Андреева, О.В. Мезозойские кислые магматиты юго-восточного Забайкалья: петрогеохимия, связь с метасоматизмом и рудообразованием / О.В. Андреева, В.А. Петров, В.В. Полуэктов // Геология рудных месторождений. — 2020. — Т. 62. — № 1. — С. 76–104.
3. Вольфсон, Ф.И. Условия формирования урановых месторождений / Ф.И. Вольфсон, К.В. Королев. — М.: Недра, 1990.
4. Ищукова, Л.П. Урановые месторождения в вулканотектонических структурах / Л.П. Ищукова и др. — М.: Минеральное сырье, ВИМС, 2005.
5. Ищукова, Л.П. Геология Урулюнгуевского рудного района и молибден-урановых месторождений Стрельцовского рудного поля / Л.П. Ищукова. — М.: Геоинформмарк, 1998.
6. Ищукова, Л.П. Урановые рудообразующие системы областей континентального вулканизма / Л.П. Ищукова и др. // Геология рудных месторождений. — 1991. — № 3. — С. 16–25.
7. Кушнарев, И.П. Глубины образования эндогенных рудных месторождений / И.П. Кушнарев. — М.: Недра, 1969.
8. Летников, Ф.А. Сверхглубинные флюидные системы Земли и проблемы рудогенеза / Ф.А. Летников // Геология рудных месторождений. — 2003. — Т. 43. — № 4.
9. Летников, Ф.А. Глубинные флюиды континентальной литосферы / Ф.А. Летников // Вступление к сб. совещания «Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы». — Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2015.
10. Машковцев, Г.А. Уран российских недр / Г.А. Машковцев, А.К. Константинов, А.К. Мигута, М.В. Шумилин, В.Н. Щеточкин. — М.: ВИМС, 2010.
11. Машковцев, Г.А. О гидротермально-осадочном урановом образовании стратиформных урановых месторождений в фанерозойских депрессионных структурах / Г.А. Машковцев, А.В. Коченов, А.Е. Халдей. Редкометальное урановое рудообразование в осадочных породах / Под ред. В.Н. Холодова, Г.А. Машковцева. — М.: Наука, 1995.
12. Миронов, Ю.Б. Урановые месторождения Монголии / Ю.Б. Миронов и др. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009.
13. Миронов, Ю.Б. Уран Монголии / Ю.Б. Миронов. — СПб.: Изд-во «Анатолия», 2003.
14. Модников, И.С. Условия формирования уранового оруденения в фундаменте / И.С. Модников, И.В. Сычев // Советская геология. — 1984. — № 1.
15. Модников, И.С. Условия формирования уранового оруденения в вулканических депрессиях проседания / И.С. Модников, И.В. Сычев // Геология рудных месторождений. — 1984. — № 2.
16. Модников, И.С. Типы палеовулканических центров позднеорогенных структур Казахстана и Средней Азии / И.С. Модников, А.А. Лебедев-Зиновьев, Л.В. Чесноков / Эволюция вулканизма в истории Земли. — М.: Тр. Первого Всесоюз. палеовулканол. симпозиума, АН СССР. — 30 янв.-2 февр., 1973.
17. Наумов, Г.Б. Основы физико-химической модели уранового рудообразования / Г.Б. Наумов. — М.: Атомиздат, 1978.
18. Наумов, Г.Б. Миграция урана в гидротермальных растворах / Г.Б. Наумов // Геология рудных месторождений. — 1998. — № 4.
19. Перчук, Л.Л. Флюиды — соки Земли / Л.Л. Перчук // Соровский образовательный журнал.

20. Перчук, Л.Л. Глубинные флюидные потоки и рождение гранита / Л.Л. Перчук // Соровский образовательный журнал. — 1997. — № 6. — С. 56–64.
21. Поспелов, Г.Л. Парадоксы, геолого-геофизическая сущность и механизмы метасоматоза / Г.Л. Поспелов. — Новосибирск: Наука, 1973.
22. Пузырев, Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований / Н.Н. Пузырев. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1997.
23. Рафальский, Р.П. Взаимодействие раствор-порода в гидротермальных условиях / Р.П. Рафальский. — М.: Наука, 1993.
24. Рафальский, Р.П. Экспериментальные исследования условий переноса и отложений урана гидротермальными растворами / Р.П. Рафальский // Ядерное горючее и реакторные металлы: Тр. Второй Международной конференции по мирному использованию атомной энергии. — Женева: Атомиздат, 1959. — С. 33–53.
25. Розен, О.М. Флюидизация поднимающегося потока как источник кимберлитовой магмы / О.М. Розен // Флюидный режим эндогенных процессов континентальной литосферы: Сб. материалов совещания. — Иркутск: Изд-во ИЗК СО РАН, 2015.
26. Тарханов, А.В. Крупнейшие урановые месторождения мира / А.В. Тарханов, Е.П. Бугреева // М.: Минеральное сырье, ВИМС, 2012.
27. Урановые месторождения Казахстана (эндогенные). — Алматы: «Фылым», 2000.
28. Чернышев, И.В. Изотопная геохронология процессов формирования месторождения Стрельцовское, Восточное Забайкалье — крупнейшего уранового месторождения России / И.В. Чернышев, В.Н. Голубев // Геохимия. — 1996. — № 10. — С. 924–937.
29. Ярмолук, В.В. Позднемезозойская магматическая провинция Востока Азии: строение, магматизм и условия формирования / В.В. Ярмолук, А.В. Никифоров, А.М. Козловский, Е.А. Кудряшова // Геотектоника. — 2019. — № 4. — С. 60–77.

© Машковцев Г.А., Леденева Н.В., 2021

Машковцев Григорий Анатольевич // gregor1944@mail.ru
Леденева Надежда Викторовна // ledeneva@vims-geo.ru

УДК 551.24 (552.11)

**Кременецкий А.А., Спиридонов И.Г., Граменицкая П.Н.
(ФГБУ «ИМГРЭ»)**

ОФИОЛИТЫ ВОСТОЧНОЙ АРКТИКИ: ГЕОТЕКТОНИЧЕСКИЕ ПАРАДИГМЫ И ГЕОХИМИЧЕСКАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК

Обсуждается проблема распознавания континентальной и океанической природы офиолитовых ассоциаций. Выполнена геохимическая дискриминация известных типовых офиолитовых комплексов: океанических, островодужных, переходных зон океан-континент и материковых складчатых поясов. Островодужные офиолитовые пояса подразделены на континентальные (PZ-MZ складчатые области и сутурные швы) и океанические (рифтогенные зоны MZ-KZ активизации). Геохимическое распознавание геодинамических обстановок формирования офиолитов Южно-Аннуйской сутуры и других поясов Восточной Арктики выявило соответствие их островодужным системам континентального типа и предлагается в качестве дополнительного аргумента при обосновании внешней границы континентального шельфа России. Ключевые слова: офиолиты, геодинамические парадигмы, континентальные островодужные системы, геохимическая реконструкция офиолитовых поясов, Восточная Арктика.