

СТРЕЛЬЦОВСКИЙ ТИП УРАНОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

На основе многолетнего изучения геологии Стрельцовского, Дорнотского, Каменушинского и других однотипных рудных узлов, которое в 2008–2013 гг. было дополнено современными петролого-геохимическими и изотопно-геохронологическими исследованиями, сделан конкретный вывод о магматогенной природе месторождений стрельцовского типа.

Ключевые слова: *стрельцовский тип, уран, источники, риолиты, рифтогенез, Забайкалье, металлогения, критерии, прогноз.*

The concrete conclusion about the magmatogenic nature of Streltsovka type deposits based on long-term studies of geology of the Streltsovka, Dornot, Kamenushka and other similar ore clusters, which during 2008–2013 were complemented with modern petrological, geochemical and isotopic geochronological investigations.

Keywords: *Streltsovka type, uranium, sources, rhyolite, rifting, Transbaikalia, metallogeny, criteria, prognosis.*

Введение. Стрельцовское месторождение, открытое в 1963 г., послужило основой для создания уникального рудного узла (запасы 250 тыс. т урана, качество руд – более 0,2 % урана). В результате фундаментальных геологоразведочных работ, проведенных Сосновской экспедицией при участии геологической службы Приаргунского производственного горно-химического объединения (ППГХО), до 1983 г. было выявлено 19 промышленных месторождений (рис. 1, 2), из них пять крупных – Антей, Аргунское, Октябрьское, Стрельцовское, Тулукуевское и четыре средних – Мартовское, Новогоднее, Широндукуйское, Юбилейное [3]*.

Установлено, что стрельцовский тип урановых месторождений широко распространен в мире и служит главной ресурсной базой урана в России, Китае и Монголии. Примеры рудных узлов и крупных месторождений этого типа:

Стрельцовский рудный узел (Россия) – запасы 250 тыс. т, 19 месторождений, 5 крупных; эксплуатируется непрерывно с 1967 г., добыто более 100 тыс. т урана (Шукин, 2008). Поскольку в 90-е

годы XX в. разрабатывались в основном богатые рудные залежи, то сегодня Стрельцовский рудный узел нуждается в первую очередь в богатых рудах;

Сиань Шань (Китай) – запасы ≥ 40 тыс. т, более 10 месторождений, одно крупное; разрабатывается с середины 50-х годов, добыто более 20 тыс. т урана (рис. 3). Другие месторождения стрельцовского типа в Китае – Чжан-Мадин, Хун Шань (Северо-Китайская платформа), Интан, Баймеша и др. (платформа Янцзы);

Дорнотский рудный район (Монголия) – запасы 60 тыс. т, пять месторождений, из них два крупных (Гурванбулакское и Дорнотское). В конце 80-х годов эти месторождения были подготовлены к эксплуатации;

Каменушинский рудный узел (Россия) – запасы по месторождениям Ласточка и Каменушинское 6 и 15 тыс. т, первое разведано детально, второе не доразведано. Каменушинский рудный узел исследован недостаточно. Кроме того, к западу от него находится **Яуринская структура** (месторождение Туманное), а к востоку Белоянская (месторождение Скальное) [2];

Мерисвейл и др. (США, штат Юта), эксплуатировались в начале 50-х годов; добыто ≥ 10 тыс. т урана и молибдена [4];

Чаткало-Кураминский рудный район (Узбекистан) – девять молибден-урановых месторождений. Табошар (известно с 1927 г., разведано как самое крупное в 1947 г., отработано к концу 60-х годов) и Чаули (в Карабашской кальдере), по современным масштабам средние, остальные мелкие [6], эксплуатировались с начала 50-х до конца 80-х годов. Месторождения полностью отработаны, добыто около 30 тыс. т урана.

Все перечисленные ураноносные узлы и месторождения принадлежат к фтор-молибден-урановой рудной формации и локализируются в вулканических постройках депрессионного типа длительного развидия. Как правило, в месторождениях до 30–40 % руд богатые ($> 0,3$ %).

Доизучение Стрельцовского рудного узла и поиски новых рудных залежей (в том числе за преде-

* Впервые на перспективы на уран Урулюнгуйской зоны Забайкалья обратил внимание профессор Г. Л. Падалка (ВСЕГЕИ) в 1949 г., по его рекомендации здесь начали работать поисково-разведочные партии Сосновской экспедиции. Выявленные многочисленные урановые аномалии, преимущественно в гранитах, не привели к открытию промышленных месторождений. Здесь же постоянно работали геологические коллективы ВСЕГЕИ. Была создана Металлогеническая на уран карта Юго-Западного Приаргуныя (1956–1959 гг.). В ней развивалась гипотеза о связи уранового оруденения с вулканическими постройками, в качестве перспективной структуры для поисков урана был выделен Тулукуевский купол, сложенный риолитами. В 1962 г. Л. П. Ишукова после посещения вулканогенных урановых месторождений Южного Казахстана высказалась за продолжение работ в Приаргунье, ее поддержали руководители Сосновской экспедиции В. М. Степанов и О. Н. Шанюшкин. Весной 1963 г. начала работу 324-я партия. Первая скв. 175 на глубине 220–260 м выявила рудную залежь мощностью 40 м. Очень богатые руды были вскрыты скважинами 178, 182, 188 и др. Одновременно при участии ВСЕГЕИ была составлена Геологическая карта Тулукуевской ВТС масштаба 1 : 25 000.

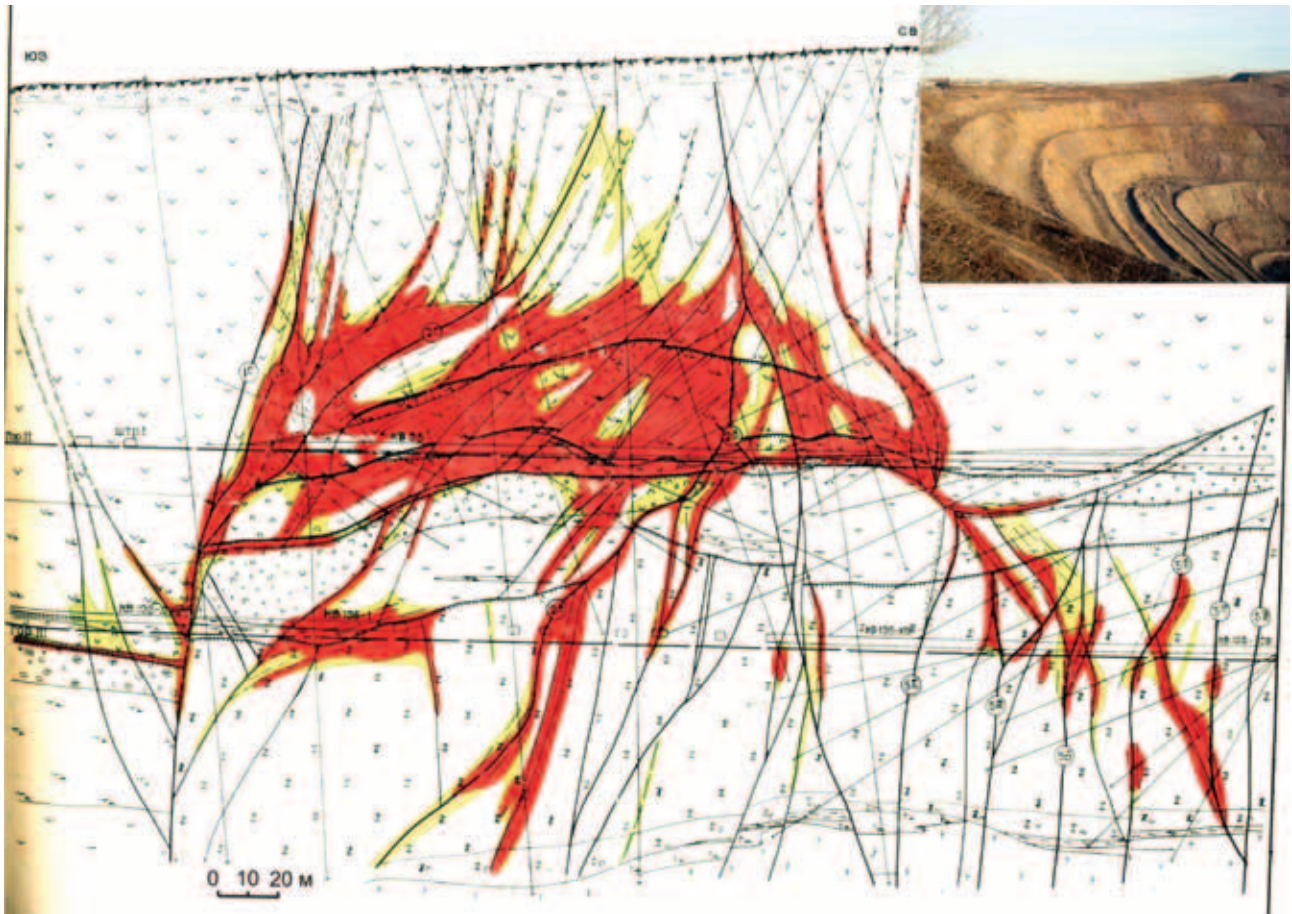


Рис. 1. Геологический разрез Тулкуевского месторождения и карьер на месте отработанного месторождения

лами рудного узла) проводились почти непрерывно в течение 20–25 лет, но не дали положительных результатов.

В этих работах ВСЕГЕИ непосредственно не участвовал, однако в рамках геологических заданий по «Атласу геологических карт Центральной Азии» (руководитель проектов С. П. Шокальский) в 2008–2010 гг. и в последующие годы получены новые данные по геологии и генезису Стрельцовского рудного узла [10].

Одна из причин низкой эффективности геологоразведочных работ, по мнению автора [14, 18], – недостаточная изученность геологического строения, истории развития и особенностей рудообразования Стрельцовского рудного узла. Весьма запутанны и противоречивы гипотезы, касающиеся источников рудного вещества и конкретных индикаторов процессов рудообразования. Автор полагает, что для достоверной оценки резервов Стрельцовского рудного узла на уран необходимо искать его не только в стандартных, хорошо изученных геологических обстановках, могут помочь и новейшие методы исследований, в том числе изотопно-геохронологические, геохимические, прецизионные аналитические, а также глубинные геофизические.

Приведем новые данные, полученные автором и соавторами в 2007–2014 гг. [13–18].

Геология и геохронология. Стрельцовский рудный узел находится в пределах Аргунского срединного массива (микроконтинента) Центрально-Азиатского подвижного пояса. Он локализован в Тулкуев-

ской вулканотектонической структуре (ВТС) площадью 220 км², состоящей из кальдеры обрушения (180 км²), центров кислого вулканизма, приуроченных к западной окраине кальдеры, и кольцевой дайки (рис. 5).

В структуре ВТС выделяются нижний и верхний ярусы и фундамент. Стратиграфическая последовательность вулканогенно-осадочных отложений и их взаимоотношения с субвулканическими образованиями установлены с большой достоверностью, но палеонтологические остатки здесь отсутствуют, а определения возраста пород К-Аг и Rb-Sr методами для конкретных горизонтов пород и даек характеризуются значительными вариациями. Прецизионные результаты получены только для урановых руд по ураниниту 135 ± 1 млн лет.

Выполнены U-Pb изотопные геохронологические датировки по цирконам из пород нижнего и верхнего ярусов Тулкуевской кальдеры локальным методом SIMS SHRIMP II. [14, 15, 17, 18]. Теми же методами изучены гранитоиды и другие магматические породы фундамента и обрамления кальдеры.

Нижний ярус ($J_{2,3}$), относимый к приаргунской свите, слагают три покрова андезибазальтов, разделенные двумя покровами лав и туфов трахидацитов. В основании разреза залегают горизонты осадочных пород. Общая мощность нижнего яруса 800 м. Возраст цирконов из нижнего покрова трахидацитов 162 ± 2 (пр. 191а/67) и из верхнего 156 ± 2 млн лет (пр. 1087/70).

В андезибазальтах второго покрова (пр. 135д/67) нижнего яруса присутствуют вулканические и ксе-

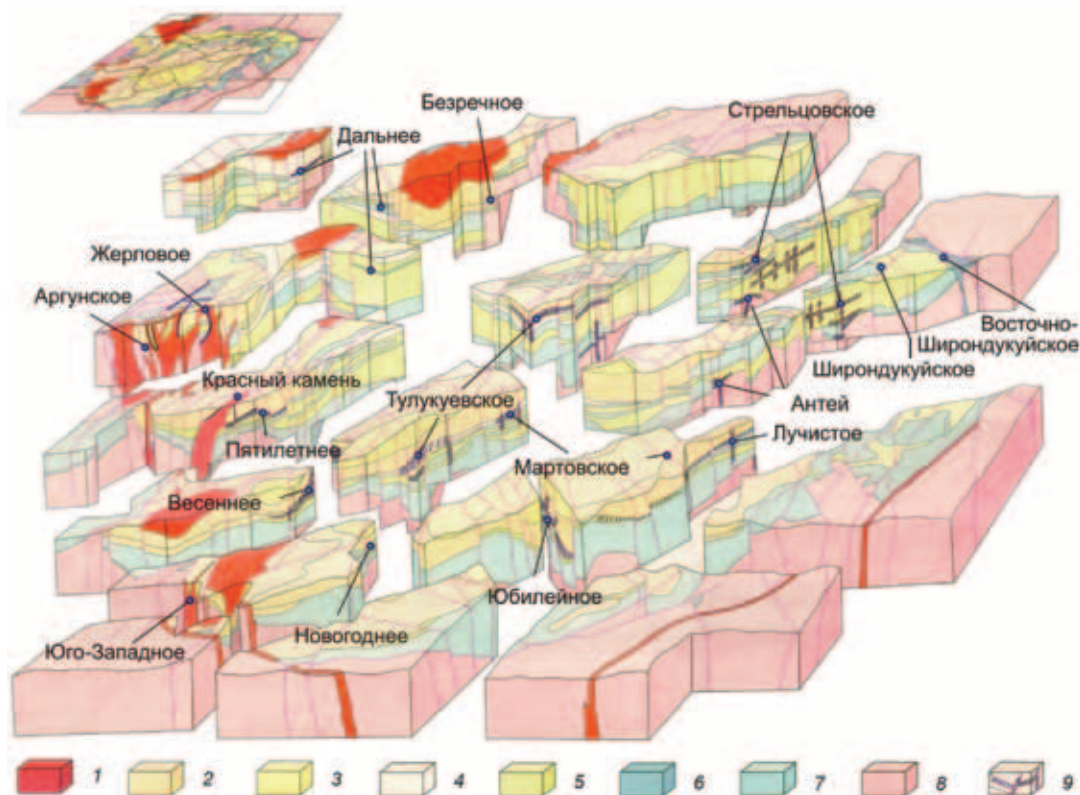


Рис. 2. Объемная модель размещения месторождений (главных рудных залежей) Стрельцовского рудного узла

1 – дайки и экструзии гранит-порфиров, риолитов (135–137 млн лет); 2, 3 – литоидные игнимбриты (2 – покров II, 3 – покров I), 140–143 млн лет; 4 – горизонты туфогенно-осадочных пород; 5 – покровы трахидацитов; 6 – щелочные оливиновые базальты; 7 – покровы субщелочных базальтов и андезибазальтов; 8 – гранитоидный фундамент кальдеры (лубинский комплекс, 250 млн лет, урулюнгуйский комплекс, 774–800 млн лет); 9 – рудные залежи

ногенные цирконы. Возраст вулканических цирконов 155 ± 1 млн лет. Все ксеногенные цирконы относятся к категории дискордантных, их возраст 777–405 млн лет. Возраст цирконов из нижнего покрова базальтов 165 ± 2 млн лет (пр. С-81). В базальных конгломератах и песчаниках нижнего яруса встречены цирконы с возрастом 170–176 млн лет и древнее. Таким образом, нижняя граница нижнего яруса находится в интервале 165–170 млн лет.

Верхний ярус (K_1) изучен более подробно, поскольку с его развитием связаны процессы рудообразования и локализации оруденения. Он залегает на эродированной поверхности нижнего яруса, иногда непосредственно на породах фундамента. В нижней части разреза на конгломератах залегает небольшой покров трахибазальтов, проявленный только в восточной части кальдеры.

Главный объем верхнего яруса и кальдеры в целом занимает мощная (до 500 м) толща микрофельзитовых риолитов с игнимбритовой текстурой. В основании и верхней части покрова четко проявлена пепловая структура. В нижней части разреза также находится горизонт перлитов мощностью 1–3 м с реликтовой пепловой структурой. В западной части ВТС имеется некк, который рассматривается как аппарат для извержения игнимбритов.

Экструзии и потоки лав морион-санидиновых риолитов прорывают и перекрывают толщу игнимбритов. Наиболее поздние образования верхнего яруса – Краснокаменский шток и кольцевая дайка, которые имеют секущие контакты с вмещающими породами, в том числе с фельзитами-игнимбри-

тами. На поверхности они сложены трахириолитами и санидин-морионовыми риолитами, но на глубинах 300–600 м и более они постепенно переходят в граносиенит-порфиры и в гранит-порфиры с микрогранитовой основной массой.

Длительная эволюция магматического очага риолитов Тулукуевской кальдеры охватывала период от 143 до 127 млн лет. Выделяются три фазы вулканической активности [14]:

- первая (143–141 млн лет) – извержение покрова игнимбритов. Вулканические аппараты этой фазы находятся в районе месторождения Красный Камень, расположенного на вершине и западном склоне горы Талан-Гозогор;

- вторая – 137–135 млн лет – образование куполов морион-санидиновых риолитов в северной и юго-западной частях кальдеры, внедрение гранит-порфиров и граносиенит-порфиров Краснокаменского штока и образование кольцевой дайки;

- третья (129–127 млн лет) проявлена локально в виде трубчатого тела цезиеносных перлитов в пределах Юго-Западного уранового месторождения в юго-западной части Тулукуевской кальдеры и ее обрамлении. Это тело прорывает морион-санидиновые риолиты и дайки граносиенит-порфиров второй фазы.

К завершающему этапу эволюции риолитового очага Тулукуевской кальдеры, вероятно, следует отнести линзовидные тела цезиеносных перлитов, наиболее значительно проявленные в юго-западной части Тулукуевской кальдеры. В них наблюдаются цирконы двух типов: бесцветные гиацинтовые и коричневые с возрастными 128 ± 1 и 141–133 млн

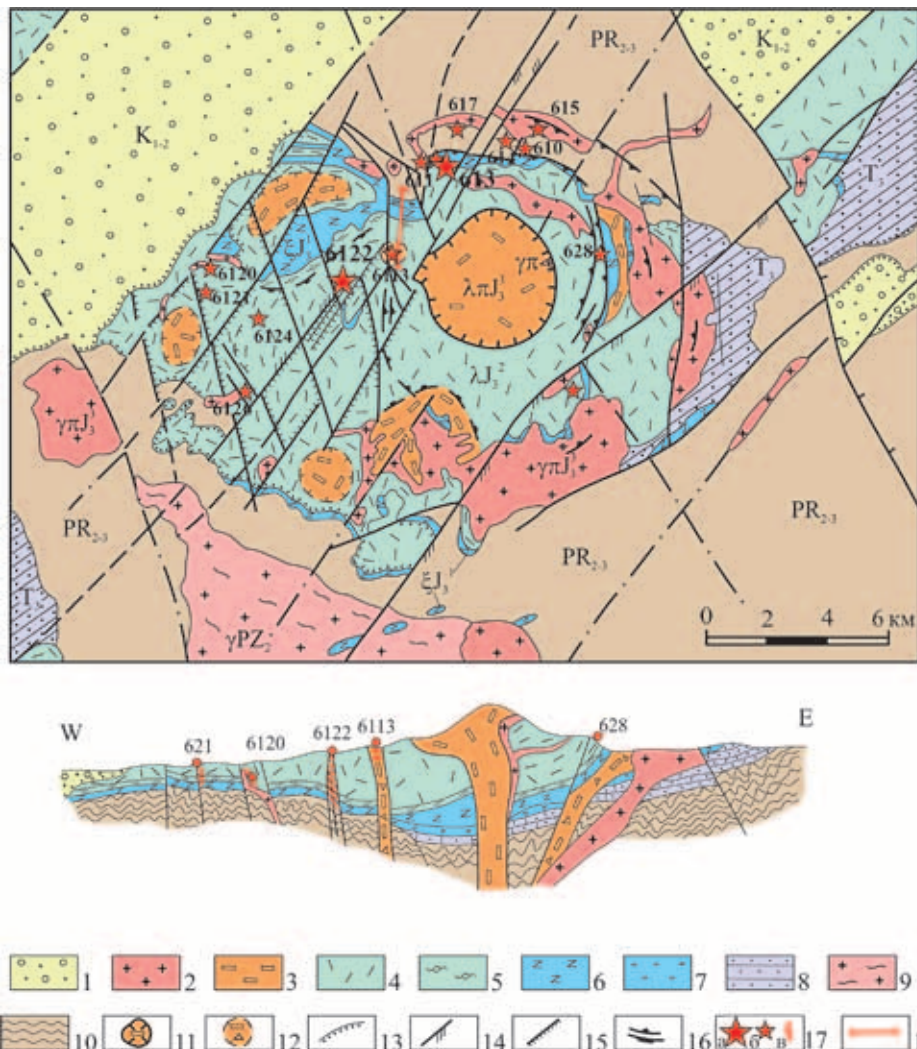


Рис. 3. Схема геологического строения кальдеры Сянь Шань по материалам Института № 270 Всекитайской ядерной корпорации (CNN) с дополнениями автора

1 – красноцветные песчаники, конгломераты; 2–5 – *верхний структурный ярус*: 2 – гранит-порфиры, плагиопорфиры (дайки, силлы), 3 – кристаллокластические риолиты: экструзии и трубки взрыва, 4 – покровы кристаллокластических риолитов, 5 – горизонт игнимбритов в основании толщ риолитов; 6–8 – *нижний структурный ярус*: 6 – риодациты (лавы, экструзии), 7 – базальный горизонт вулканогенной толщи (конгломераты, песчаники, туфопесчаники, игнимбриты риодацитов), 8 – песчаники и конгломераты; 9, 10 – *фундамент кальдеры*: 9 – граниты, гнейсо-граниты, 10 – кристаллические сланцы; 11 – границы центральной экструзии кальдеры; 12 – границы предполагаемых экструзий и трубок взрыва риолитов; 13 – сбросы; 14 – сбросо-сдвиги; 15 – надвиги; 16 – элементы вулканотектоники, в том числе предполагаемое залегание даек гранит-порфиров; 17 – месторождения урана и их номера (а – крупные, б – малые, в – положение оруденения в разрезе); 18 – радиальный геологический профиль

лет, которые соответствуют цирконам первой и второй фаз (рис. 6).

Фундамент и ближайшее обрамление Тулукуевской кальдеры слагают три группы пород:

1. Наиболее ранние образования – гнейсы, метаморфизованные кристаллические сланцы, кварцево-сланцевые слоистые песчаники и алевролиты, габбро-амфиболиты. Значительное место занимают мраморизованные карбонатные породы преимущественно доломитового состава. Они слагают крупные ксенолиты и реликты провесов кровли над гранитоидными массивами. Осадочные породы идентифицируются преимущественно с рифейскими отложениями надаровской, урулюнгуйской и дырбылкейской серий, широко распространенными в Урулюнгуйском блоке. Габбро-амфиболиты иногда выделяются в виде тулукуйского магматического комплекса с возрастом около 1 млрд лет

(Шергина, Павлова, 1996), они располагаются в западном и северо-западном секторах Тулукуевской кальдеры и в фундаменте Восточно-Урулюнгуйской депрессии. В них локализуется крупное Аргунское месторождение (рис. 7), а в субвулканических интрузивах Краснокаменского штока, прорывающих эти образования, серия мелких урановых месторождений (Красный Камень, Жерловое, Пятилетнее).

2. Гнейсовидные порфиробластические граниты урулюнгуйского комплекса занимают северную, центральную и юго-западную части Тулукуевской кальдеры, а также ее обрамление на севере и юго-западе. Гнейсовидные текстуры в этих гранитах имеют конформные контакты с терригенно-карбонатными образованиями рифейского возраста. Эти граниты специализированы на торий 30–50 и уран 6–11 ppm, для них характерно высокое Th/U отношение 7–9. Возраст (SHRIMP II) 774–800 млн

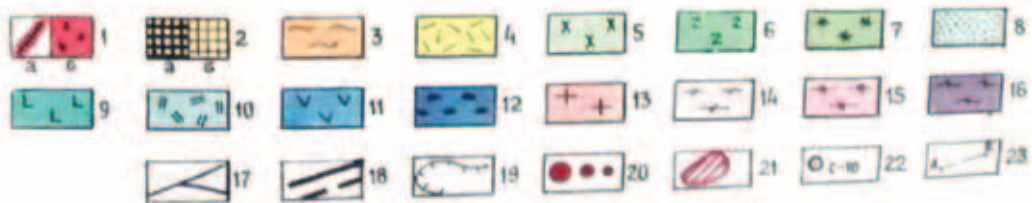
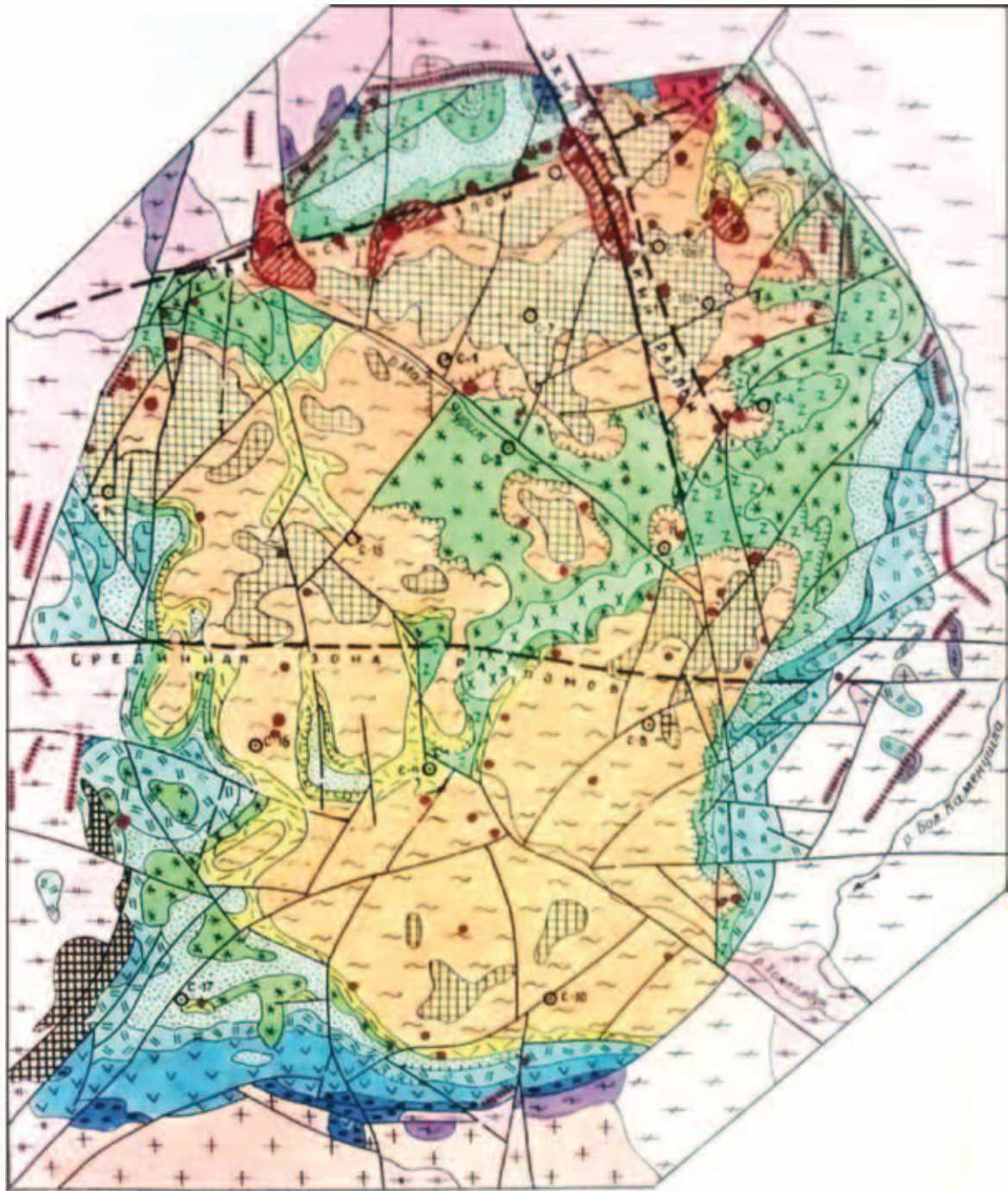


Рис. 4. Схематизированная геологическая карта Каменушинской ВТС. Масштаб 1 : 200 000

1–4 – верхний комплекс: 1 – дайки фельзит-порфиров и гранит-порфиров (а), эруптивные брекчии риолитов (б); 2 – гранит-порфиры (а), крупнокрапленниковые риолиты 94 млн лет (б); 3 – фельзиты 98 и перлиты 95 млн лет, 4 – мелкокрупленниковые риолиты; 5–12 – нижний комплекс: 5 – трахидацит-порфиры, 6 – дациты, 7 – сферолитовые риолиты, 8 – песчаники, туфогравелиты, углистые алевролиты, 9 – андезит-базальты, 10 – кварц-полевошпатовые порфиры, 11 – андезиты, 12 – базальные конглобрекчии; 13–16 – фундамент ВТС: 13 – лейкократовые граниты, 14 – порфирировидные гнейсовидные гранодиориты, 15 – биотит-амфиболовые гнейсы, 16 – амфиболиты; 17 – крутопадающие разломы, 18 – крупные зоны разломов, 19 – пологопадающие разрывные нарушения, 20 – месторождения (а), рудопроявления и пункты минерализации (б), аномалии урана интенсивностью ≥ 100 мкР/ч (в), 21 – проекции рудных залежей на поверхность, 22 – опорные скважины, 23 – линии разрезов

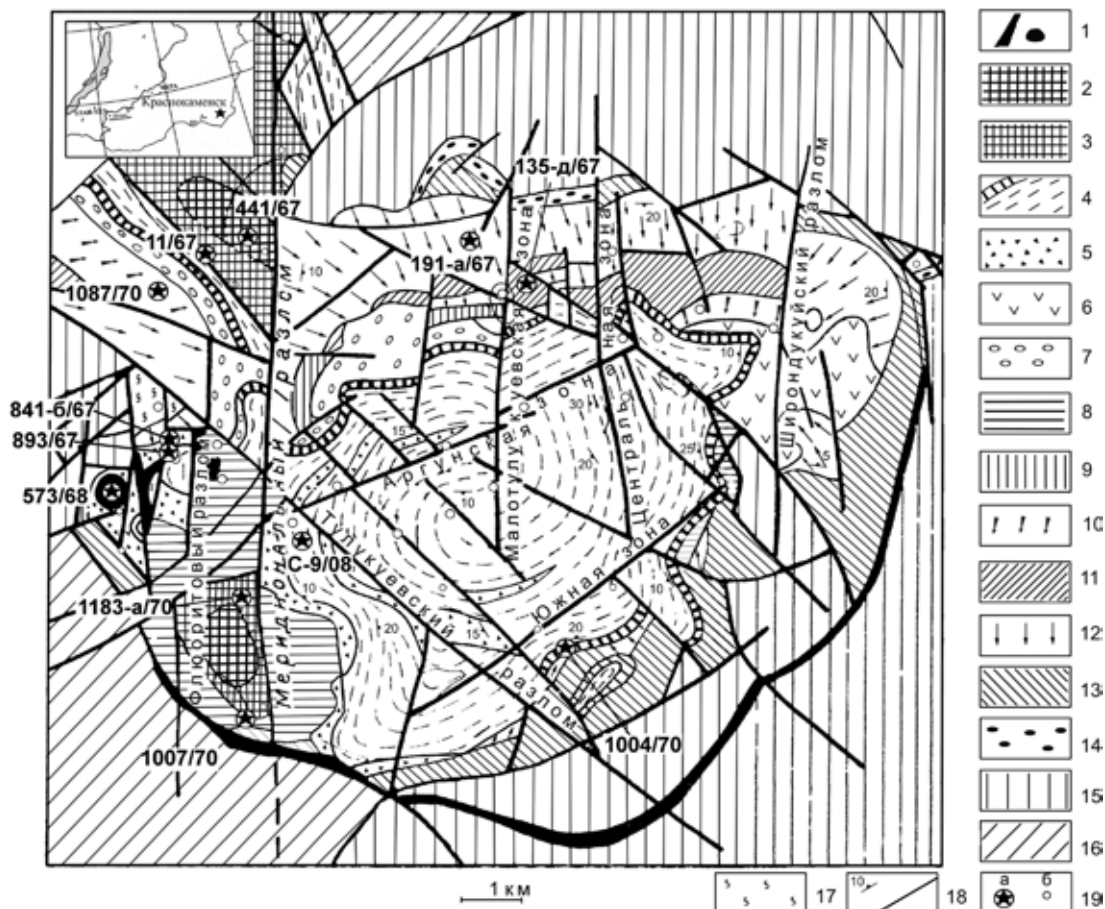


Рис. 5. Схематизированная геологическая карта Тулукуевской кальдеры. Сост. Г. А. Шатков по материалам Сосновской экспедиции, ВСЕГЕИ и ППГХО

1–7 – верхний ярус: 1 – граносиенит-порфиры и гранит-порфиры (дайки, субвулканические интрузии), 2, 3 – крупно- и мелкопорфировые санидин-морионовые риолиты (потоки, экструзии), 4 – микрофельзитовые риолиты с игнимбритовой текстурой и горизонтом перлитов в основании покрова, 5 – горизонты эруптивных брекчий в микрофельзитовых риолитах, 6 – трахитоидные андезибазальты, 7 – конгломераты, гравелиты, туфопесчаники; 8–14 – нижний ярус: 8 – сферолитовые риолиты, 9, 11, 13 – андезибазальты III, II и I покровов, 10, 12 – трахидацинты II и I покровов, 14 – базальные конгломераты, гравелиты, песчаники; 15–17 – фундамент и обрамление кальдеры: 15 – среднезернистые лейкократовые и биотитовые граниты лубийского и ундинского комплексов, 16 – гнейсовидные порфиробластические граниты урулюнгуйского комплекса, 17 – кристаллические сланцы, гнейсы и углеродистые известняки; 18 – элементы залегания и разломы, 19 – точки отбора проб на изотопно-геохронологические исследования (а), месторождения и рудопроявления (б). Проба 1007/70 – трубчатое тело цезиеносных перлитов (128 ± 1 млн лет). Конкретные цифры возраста геологических подразделений приведены на рис. 2

лет. Месторождения Тулукуевское, Юбилейное, Дальнее, Юго-Западное находятся над этими гранитами. Спайдер-диаграммы РЗЭ характеризуются глубоким Eu-минимумом и другими признаками, свойственными верхнекоровым гранитным батолитам. С этими гранитами связывается образование малоглубинного очага риолитов, с извержением которых – обрушение и образование Тулукуевской кальдеры.

3. Лейкократовые среднезернистые слабопорфировидные граниты лубийского комплекса развиты в восточном и юго-восточном секторах кальдеры. Это часть Идангинского массива, находящегося к востоку от Тулукуевской кальдеры. В этих гранитах локализовано месторождение Антей, они находятся под месторождениями Стрельцовское, Октябрьское, Лучистое, Шиرونдукуйское. Граниты Идангинского массива прорывают и интенсивно метаморфизуют рифейские терригенно-карбонатные образования, а также граниты урулюнгуйского комплекса. Возраст гранитов 250 ± 1 млн лет. Это типичные интрузивные массивы малых и умерен-

ных глубин становления. Они вызывают ороговение, скарнирование и слабую грейзенизацию вмещающих пород, отличаются невысокими содержаниями урана и тория и характеризуются неглубокой отрицательной Eu-аномалией.

Граниты лубийского комплекса принципиально отличаются от высокорadioактивных Кыр-Кириного (J_3-K_1) и Куйтунского ($J_{2,3}$) гранитных массивов, с которыми их ошибочно параллелизуют [1]. По комплексу признаков граниты Идангинского массива лубийского комплекса не могли быть заметными источниками рудного вещества для урановых месторождений Стрельцовского рудного узла.

Об источниках урана в месторождениях стрельцовского типа. Впервые в печати в 1970 г. [12] было обосновано явление выноса урана из кристаллизовавшегося на поверхности покрова игнимбритов и дана оценка масштабов этого явления. Нейтронно-трековым методом показано, что из пепловых частиц игнимбритов происходит вынос

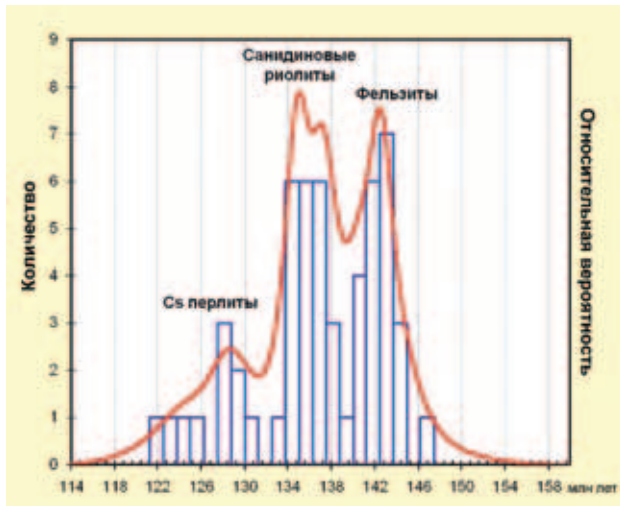


Рис. 6. Сводная кривая изотопных возрастов риолитов верхнего яруса Тулукуевской кальдеры

урана, и в микрофельзитах сохраняется в 2–3 раза меньше урана по сравнению с первичным расплавом, реликтом которого являются вулканические стекла. Не изменяется первичное содержание тория. Вместе с ураном выносятся фтор, молибден, сурьма и некоторые другие элементы [12]. Почти одновременно подобные выводы опубликованы в [19].

Главный вывод — основным источником урана на всех месторождениях стрельцовского типа является специализированный очаг риолитов с первичным содержанием U 15–20 и Th 45–60 г/т в вулканическом стекле. Установлено, что в нем уран находится в равномерно рассеянном состоянии и тесно связан с силикатным каркасом стекла [11].

При кристаллизации изотропного вещества пепловых частиц игнимбритов и ультракислых расплавов риолитов, по-видимому, весь уран находился в шестивалентной форме в виде уранила (UO_2^{2+}) в среде, насыщенной кислородом. Это связано с тем, что микрокристаллизация (фельзитизация) расплава происходила на поверхности и сопровождалась выносом уранила в межзерновое силикатное пространство.

Не менее интенсивно уран накапливается в риолитовом очаге в связи с кристаллизационной дифференциацией во вторую и, вероятно, в третью фазы в обстановке интенсивного выноса щелочей из остаточного расплава [11].

Для оптимальной мобилизации урана из расплавов, вероятно, необходима кристаллизационная дифференциация расплава, насыщенность его минерализаторами (вода, фтор) и свободным кислородом. Уран должен находиться в шестивалентной форме и перемещаться в виде уранил-фторидов, уранил-молибдатов и уранил-гидрокарбонатов. Оптимальное условие для накопления урана в расплавах или растворах — его нахождение в виде «своеобразного монокатиона уранила UO_2^{2+} » и возможность его миграции в составе гидротермальных растворов в очень широком диапазоне от 400 °C [7].

Общая модель рудообразования в Тулукуевской кальдере представлена на рис. 8. Магматический очаг риолитов находился в приповерхностной об-

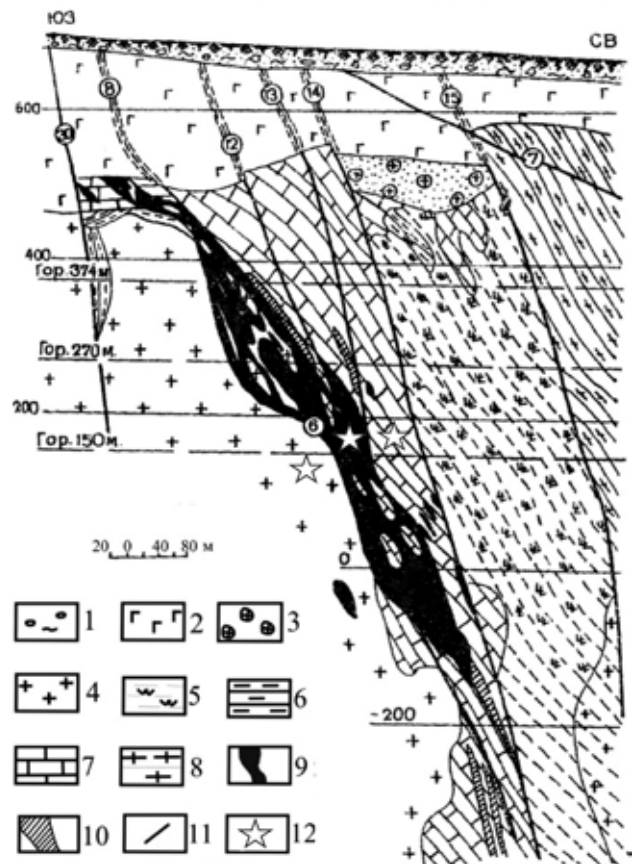


Рис. 7. Геологический разрез рудной залежи № 1 Аргунского месторождения [3] с редакционными изменениями автора

1 — наносы; 2 — базальты нижнего покрова; 3 — базальные конгломераты; 4 — гнейсовидные граниты; 5 — амфиболиты; 6 — кварцевослюдистые сланцы; 7 — доломитизированные известняки; 8 — гнейсо-граниты мелкозернистые; 9 — урановые залежи с флюоритом; 10 — молибденовые залежи; 11 — крутопадающие зоны трещиноватости; 12 — принципиальная позиция исследованных образцов

становке. Верхняя кромка магматического очага, с которой связано извержение игнимбритов и обрушение кальдеры, вероятно, была на глубине около 4–5 км. Сюда могли проникать термальные воды гипергенного происхождения, насыщенные кислородом и гидрокарбонатами.

Объем высокорadioактивных игнимбритов первой фазы магматизма (мощность до 500 м, ареал распространения не менее 150 км², проседание кальдеры 300–400 м) оценивается в 50–100 км³ [12]. Исключительно стабильное содержание тория 60 г/т на всю мощность разреза и высокий градиент выноса урана в связи с фельзитизацией (10–12 г/т) дают основание предполагать, что в мобильное состояние для гидротермальных и гипергенных растворов могло быть переведено 26,6 тыс. т урана из 1 млн м³ игнимбритов.

Принято считать, что возраст главной стадии рудообразования 135 ± 1 млн лет (Чернышов, Голубев, 1996). Это время четко соответствует второй фазе магматизма риолитового очага. Составы перлитов из первой и второй фаз вулканизма практически идентичны. Магматическая дифференциация сопровождалась переходом в кристаллическую фазу громадных объемов риолитов на разных уровнях глубинности. Интрузивные тела гранит-порфиров (Краснокаменский шток и др.)

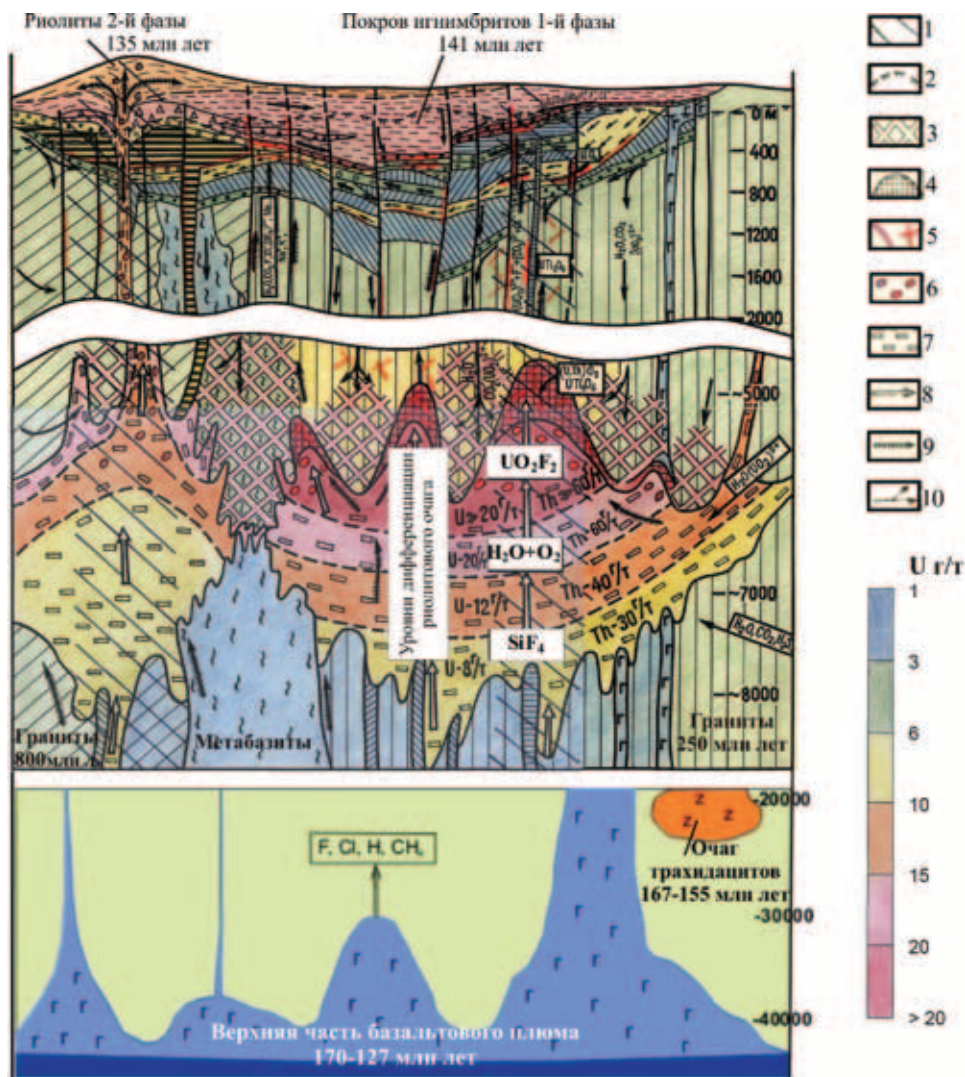


Рис. 8. Геолого-геохимическая модель образования Стрельцовского рудного узла

1 – проекция зон интенсивного разуплотнения пород фундамента [2]; 2 – современная эрозионная поверхность; 3 – предполагаемые участки обрушения кровли магматического очага после извержения игнимбритов; 4 – контактово-метасоматические образования в апикальных частях очага риолитов; 5 – предполагаемые локальные концентрации; 6 – газоводяные обособления уранилфторидов; 7 – проявления интрателлурической кристаллизации в магматическом очаге; 8–10 – гипотетические пути движения флюидов и растворов (8 – эндогенных, 9 – смешанных, 10 – экзогенных)

и дайки граносиенитов резко обеднены радиоактивными элементами. Однако в гранит-порфирах Краснокаменского штока, кроме неизменных цирконов с возрастом 137–135 млн лет, обнаружены цирконы с максимально высоким содержанием урана. В ядрах и каймах этих цирконов обнаружен уранинит. Возраст этих цирконов определить достоверно невозможно технически. Возраст урановых руд 135 ± 1 млн лет определен на месторождениях Антей и Стрельцовское.

Необходимым условием перехода урана в остаточный раствор-расплав является перевод его в шестивалентное состояние. Предполагается, что магматический очаг находился в сфере воздействия эндогенных фтороносных флюидов, что неизбежно стимулировало насыщение расплавов риолитов мобильным кислородом и фтором и перевод урана в уранил (UO_2^{2+}) и уранил-фторид.

Фторид уранила обладает специфическими химическими свойствами: он хорошо растворим в воде, существует в растворе в виде недиссоциированных молекул и образует в нем двух- или

трехчленные димеры. Плотность UO_2F_2 $6,37 \text{ г/см}^3$, благодаря чему это соединение способно концентрировать значительные объемы урана. Можно утверждать, что уранил-фториды – наиболее эффективные концентраторы урана в остаточном флюиде.

Отмеченная выше эволюция очага риолитов показывает, что вывод [5] о том, что фтор в расплавах тесно связан с щелочами и не может играть роли модификатора в силикатном расплаве, в данном случае не подтверждается. Равновесие $2Na_2O + SiF_4 \leftrightarrow 4NaF + SiO_2$ обычно сильно сдвинуто вправо. Чтобы сдвинуть его влево, необходим был интенсивный привнос мобильного фтора, кремнезема и воды, что и происходило в данной обстановке, т. е. в гипотетическом остаточном расплаве риолитов под Тулукуевской кальдерой (рис. 8). Такая обстановка, вероятно, способствовала миграции урана в виде уранил-фторидов [16].

С третьей фазой связаны аномальные концентрации цезия (0,2 %) в перлитах. Проблема цезиеносности перлитов до конца не изучена, но ано-

мальные концентрации цезия в стеклах имеются во всех ураноносных структурах стрельцовского типа (некоторые из них размером с небольшие месторождения).

В отличие от существующих представлений об одном крупном этапе рудообразования во всем Стрельцовском рудном узле [1] можно предполагать, что рудообразование было не только длительным, но и многоэтапным или полициклическим и развивалось в соответствии с глубинной эволюцией риолитового очага. Поэтому возраст уранового оруденения в разных частях рудного узла может быть различным. Источником урана на месторождениях Дальнее и, возможно, на Тулукуевском был вынос урана в связи с фельзитизацией игнимбригов (140 млн лет). Оруденение месторождений Красный Камень и Аргунское, вероятно, связано со второй фазой вулканизма (135 млн лет). На Юго-Западном месторождении цезий и, возможно, уран – самые молодые (127 млн лет). Целесообразно изучить особенности размещения и состава рудного вещества для каждого этапа рудообразования.

Структурный контроль уранового оруденения заметно различается в восточной (антей-стрельцовской) и западной (краснокаменско-аргунской) частях Стрельцовского рудного узла. Возможно, также недостаточно оценена роль магматических тел (даек, штоков, трубок взрыва) в локализации промышленного оруденения.

Именно такой представляется эволюция высокорadioактивного Тулукуевского риолитового очага, завершившаяся образованием крупных и богатых урановых месторождений. Чтобы искать новые месторождения, нужно находить новые продуктивные очаги, подобные Тулукуевскому.

Условия и предпосылки образования очага риолитов для формирования уникального Стрельцовского рудного узла. Первое – высокорadioактивный докембрийский гранитоидный фундамент. Радиогеохимическое изучение гранитоидов Забайкалья показало, что наиболее высокорadioактивны гранитоиды урулюнгуйского комплекса. Они широко представлены в фундаменте и в окрестностях Стрельцовского рудного узла. Дополнительное геохимическое изучение этих гранитов и риолитов показало, что по распределению редких земель они вполне сопоставимы. Практически все исследователи полагают, что высокорadioактивный риолитовый очаг сформировался за счет гранитов урулюнгуйского комплекса с возрастом 800 млн лет [13] и, возможно, древнее.

Второе – источником тепла для локального плавления предполагается горячая точка в мантии и ее продукт – позднемезозойский базальтовый плюм. В разрезе Тулукуевской кальдеры установлено не менее пяти крупных горизонтов базальтов и андезитбазальтов. Три горизонта находятся в нижнем ярусе, четвертый в основании верхнего яруса, пятый перекрывает морион-санидиновые риолиты верхнего яруса (в низовьях пади Мал. Тулукуй). Покровы базальтов в нижнем ярусе разделяются потоками трахидацитов. Покровы базальтов изливались в интервале от 170 до 120 млн лет. Снизу вверх, от раннего к позднему, меняется химический состав, в том числе растет и содержание фтора, урана и тория [15]. Весьма характерно распределение редкоземельных элементов. По кон-

фигурации спайдер-диаграмм можно судить о положении в разрезе конкретных покровов.

На разных этапах эволюции плюма расплавы базальтов, возможно, служили источниками тепла и мобильного фтора, который участвовал в геохимической специализации гидротермальных растворов для образования как флюоритовых месторождений, так и уран-фтор-молибденовых месторождений стрельцовского типа. Эти последние, вероятно, были способны создавать богатые рудные залежи на Аргунском месторождении [17].

О роли тория. Повышенные и аномальные концентрации тория могут иметь значение для обоснования площадей на стадии региональных поисков очагов, специализированных на уран и торий. На этой стадии важнейшее значение должны иметь аэро-спектрометрия и наземное радиогеохимическое картографирование. Радиогеохимическая модель Стрельцовского рудного узла отличается высоким содержанием Th 40–60 ppm и высоким Th/U отношением 8–10. Это следствие интенсивного выноса урана при фельзитизации покрова игнимбригов. Высокорадиоактивные массивы с «нормальным» Th/U отношением (3–4) – признак того, что уран в этих массивах связан с высокорadioактивными акцессорными минералами (монацит, циркон и др.).

В некоторых случаях локальные аномалии тория могут служить прямым признаком выноса подвижного урана с поверхности, указывая на возможность уранового оруденения на глубине. Например, в Китае так было открыто месторождение урана Чжан-Маин стрельцовского типа в вулканитах Большехинганского вулканического пояса.

О роли флюорита и фтора. Установлено, что урансодержащие флюориты могут быть прямым геохимическим признаком для поисков уранового оруденения стрельцовского типа [15, 17, 18]. Они содержат аномальные концентрации спутников уранового оруденения (молибден, сурьма и др.) и отличаются особенностями распределения РЗЭ. Электронным микронзондированием установлено [18], что флюориты, которые формировались одновременно с урановыми рудами, содержат те же урановые минералы (уранинит, коффинит), что и промышленные руды.

Результаты свидетельствуют о том, что молибдаты уранила во флюоритах Аргунского месторождения принимали непосредственное участие в гидротермальном рудообразовании. В этом случае наличие рудосопровождающих флюоритов – прямой признак богатых урановых руд.

Связь уранового рудообразования с флюоритом весьма разнообразна, наблюдаются как новообразованные, так и реликтовые формы уранинита во флюорите.

О происхождении богатых руд Стрельцовского и Аргунского месторождений. Решающее значение придается структурному фактору, и образование богатых руд связывается с гидротермальными уранил-карбонатными комплексами [9]. Предполагается [16], что формирование богатых настуран-флюорит-кварцевых руд Аргунского месторождения можно интерпретировать как результат метасоматического взаимодействия уранил-фторида (UO_2F_2), содержащего эндогенный флюид, с карбонатным веществом.

В эпоху рифтогенеза (135–127 млн лет) в эволюции Тулукуевской кальдеры создавались глубокие сквозные разломы и трубки взрыва. В связи

с разуплотнением геологической среды происходило резкое вскипание водосодержащих флюидов, перегретый ураноносный флюид мог энергично поступать в приповерхностные зоны рудообразования (рис. 7). В пределах Аргунского уранового и Гозгорского флюоритового месторождений рудные залежи связываются с эксплозивными структурами.

Резервы Стрельцовского рудного узла. В настоящее время актуальна проблема выявления богатых рудных залежей в пределах Стрельцовского рудного узла и его окрестностях.

В 70–80-е и частично в 90-е годы 324-й экспедицией и другими производственными организациями была предпринята попытка существенно расширить контуры Стрельцовского рудного узла в основном за счет западных и юго-западных флангов Тулукуевской ВТС. Обнаружено значительное количество проявлений и оценены масштабы Цаган-Торомского месторождения, которое отнесено к категории мелких с бедными урановыми рудами.

Некоторый интерес представляет район месторождения Безречное. Его оруденение тяготеет к зонам дробления, находящимся в кровле покровов игнимбритов. Роль экранирующей поверхности играют лавы морион-санидиновых риолитов с небольшими трещинными зонами. Рудная залежь прижата к глубинному Меридиональному разлому – это крупный взброс, проходящий по контакту гнейсовидных гранитов с практически полным разрезом вулканитов Тулукуевской кальдеры. Промышленное оруденение представляет собой лентообразные штокверки в верхней части покрова фельзитов. На некоторых разрезах отмечаются дайки граносиенит-порфиоров. Вероятно, район рассматриваемого месторождения изучен недостаточно.

Важнейшим резервом Стрельцовского рудного узла могут оказаться урановые концентрации, возникшие и сохранившиеся в апикальных частях остаточного риолитового очага. Палеовулканологические реконструкции Тулукуевской кальдеры, в частности соотношение ее диаметра (12 км) и амплитуды проседания довулканогенного фундамента (400–500 м) и мощность покровов игнимбритов, позволяют предполагать, что апикальная часть риолитового очага, из которого происходило извержение игнимбритов (фельзитов), находилась на глубине 3–4 км. В связи с интрузивными процессами второй и третьей фаз вулканизма апикальных частей эта глубина могла сократиться и ещё более приблизиться к современной поверхности (рис. 8). Глубинное сейсмозондирование в сочетании с другими методами глубинной геофизики (по профилю СБ-1), возможно, даст дополнительную информацию о геологической структуре и состоянии вещества под Тулукуевской кальдерой.

Резервы оруденения стрельцовского типа за пределами одноименного рудного узла. В Забайкалье, на Дальнем Востоке, юге Сибири целесообразно провести ревизию всех непромышленных месторождений, рудопроявлений и частично аномалий урана, которые обладают некоторыми признаками оруденения стрельцовского типа. В их числе Каменушинская, Скальная, Яуринская, Мотогорская, Бадинская, Куйдусунская, Солонечная площади. Выделение этих площадей также соответствует следующим региональным критериям прогнози-

рования месторождений стрельцовского типа [6, 13, 17]:

- блоки древней континентальной литосферы, подвергшиеся процессам позднемезозойского рифтогенеза с признаками региональной специализации на уран, торий, фтор, молибден, редкие земли и др.;

- внутрикратонные постколлизийные вулканические пояса;

- долгоживущие базальт-риолитовые вулканотектонические депрессии;

- интенсивная геохимическая специализация риолитов на уран, торий, фтор;

- покровы базальтов с тенденцией нарастающей специализации на фтор, уран, торий, редкие земли, цирконий, рубидий и др.

Для предварительной или оперативной оценки перспектив вулканотектонических структур на стрельцовский тип предлагается ввести понятие **геохимический код (или индикатор) месторождений стрельцовского типа** – сочетание уникальной геохимической специализации (уран 15–20, торий 45–60 г/т) магматического очага риолитов с интенсивным **выносом урана**. Содержание тория в породе не изменяется. Градиент содержания урана между перлитом (**стекловатой фазой**) и **фельзитом (микрорекристаллической фазой)** – весьма характерный **показатель (индикатор) выноса урана** термальными растворами из покровов игнимбритов и лав риолитов (рис. 9). Вулканотектонические структуры с низким содержанием урана в стеклах 3–4, тория 15–20 и с очень низким градиентом выноса урана 1–3 г/т малоперспективны на выявление урановых месторождений.

Стрельцовский тип – это магматогенный тип урановых месторождений, связанный с высокорadioактивными риолитовыми расплавами и фтороносными базальтами. Он характеризуется богатыми урановыми рудами и нередко уникальными запасами. Месторождения стрельцовского типа – явление относительно редкое, зависящее от сочетания качества, интенсивности и последовательности.

Заключение. Главные источники урана на месторождениях стрельцовского типа – уникальный специализированный на уран очаг риолитов и интенсивный вынос урана при его микрокристаллизации на поверхности.

Установлено, что длительная эволюция магматического очага риолитов (143–128 млн лет) была связана с самостоятельными вулканическими аппаратами. Обоснованы три фазы формирования риолитового очага.

В отличие от господствующей концепции о принадлежности всех урановых месторождений к одному циклу рудообразования автор предполагает, что рудообразование развивалось в соответствии с фазами эволюции очага риолитов.

Возраст уранового оруденения в разных частях структуры может быть существенно различным, и это необходимо исследовать.

Закономерности локализации уранового оруденения существенно различны в восточной антейстрельцовской и западной краснокаменско-аргунской частях Стрельцовского рудного узла.

В западной части Стрельцовского рудного узла важную рудолокализирующую роль могут играть локальные магматические структуры – дайки, штоки, трубки взрыва. Возможно выявление «слепого»

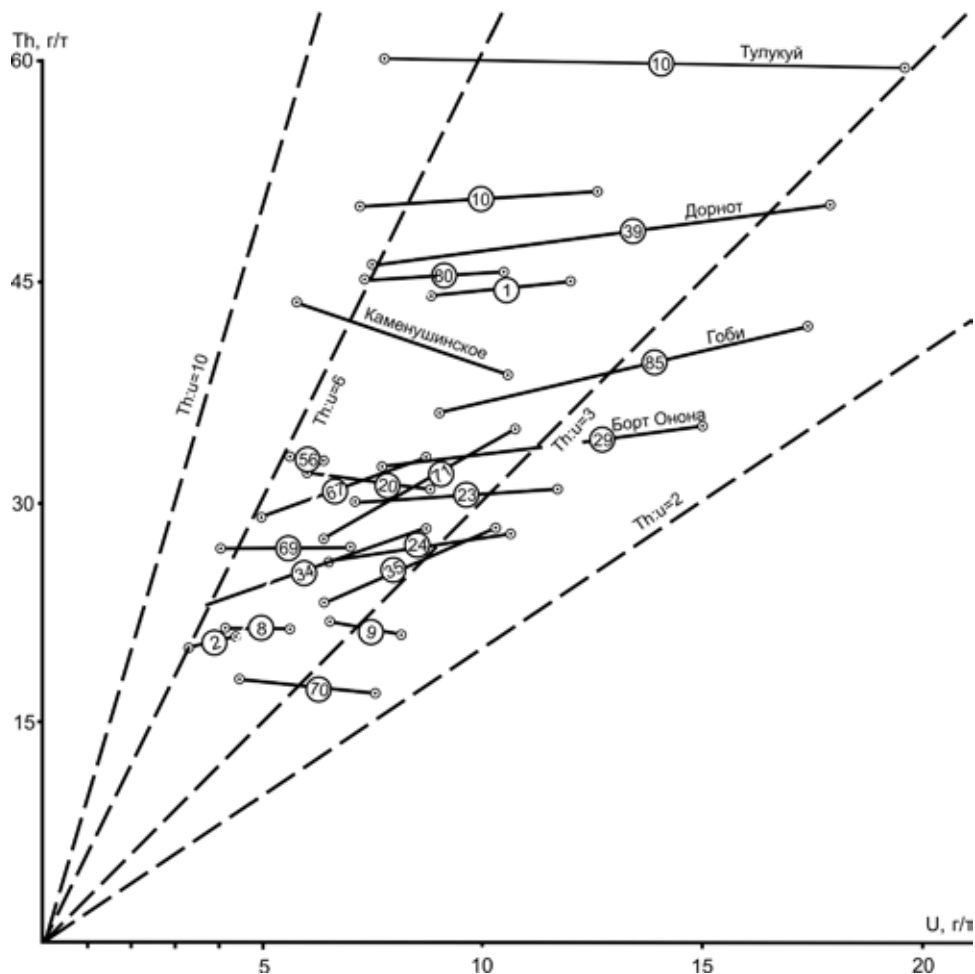


Рис. 9. Критерии металлогенической специализации вулканотектонических структур по градиентам выноса урана при фельзитизации вулканических стекол (перлитов) в сочетании с уровнем первичной специализации на уран и торий [11, 12]. Цифры в кружках соответствуют номерам наиболее изученных палеовулканов Монголо-Приаргунского пояса

уранового оруденения в глубоких частях Краснокаменского и других штоков и даек гранит-порфиров и граносиенит-порфиров.

Для эффективной и оптимально достоверной оценки перспектив на промышленное оруденение этих и других участков целесообразно существенно детализировать стратиграфию Тулукуевской кальдеры, геологию фундамента и обрамления на основе использования современных высокоточных и хорошо воспроизводимых изотопно-геохронологических исследований методом SIMS SHRIMP по цирконам.

Исследованы главные источники урана для выявленных и прогнозируемых месторождений (вынос урана при фельзитизации гигантского покрова игнимбритов и накопление урана в риолитовом очаге в связи с кристаллизационной дифференциацией и выносом щелочей из остаточного расплава [16, 17]).

Обоснована выдающаяся роль глубинного базальтового плюма как источника фтороносных флюидов.

Подтверждена гипотеза относительно участия кислородных термальных вод в магматической дифференциации в очаге риолитов.

Работа выполнена в отделе сводного и обзорного картографирования ВСЕГЕИ (руководитель

С.П. Шокальский) в рамках международного проекта «Атлас геологических карт Северной, Центральной и Восточной Азии» (2010, 2013 гг.).

В создании работы принимали участие и оказывали содействие сотрудники ВСЕГЕИ П. М. Бутков, В. А. Гущина, Н. Г. Бережная, Г. А. Олейникова, Е. Н. Лепехина, С. А. Сергеев, А. В. Антонов, С. В. Кашин, Л. Н. Шаткова. Автор выражает всем им искреннюю благодарность.

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

2. Горошко М.В., Малышев Ю.Ф., Кириллов В.Е. Металлогения урана Дальнего Востока России. – М.: Наука, 2006. – 372 с.

3. Ищуклова Л.П., Модников И.С., Сычев И.В. и др. Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. – Иркутск: типография «Глазковская», 2007. – 260 с.

4. Kerr P.Ф. Урановые месторождения района Мерисвейл, штат Юта // Рудные месторождения США. Т. II / Пер. с англ. – М.: Мир, 1973. – С. 529–546.

5. Когарко Л.Н., Кригман Л.Д. Фтор в силикатных расплавах и магмах. – М.: Наука, 1981. – 128 с.

6. Лаверов Н.П. Урановые и молибден-урановые месторождения в областях развития континентально-внутрикорового магматизма: геология, геодинамические и физико-химические условия формирования / Н.П. Лаверов, В.И. Величкин, Б.П. Власов, А.П. Алешин, В.А. Петров. — М.: ИФЗ РАН, ИГЕМ РАН, 2012. — 320 с.
7. Литлина И.И. Уранил и его соединения. — М.: Изд-во АН СССР, 1959. — 316 с.
8. Машковцев Г.А. Уран российских недр / Г.А. Машковцев, А.К. Константинов, А.К. Мигута, М.В. Шумилин, В.Н. Щеточкин. — М.: ВИМС, 2010. — 850 с.
9. Наумов Г.Б. Миграция урана в гидротермальных растворах // Геология рудных месторождений. 1998. № 4. — С. 307–325.
10. Региональная металлогения Центральной Азии / гл. ред. О.В. Петров, Дун Шувен. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. — 248 с. (Труды ВСЕГЕИ. Новая серия. Т. 353).
11. Шаткова Л.Н., Шатков Г.А. О возможном источнике рудного вещества урано-флюоритовых месторождений / Геология рудных месторождений. 1973. № 4. — С. 36–44.
12. Шатков Г.А., Шаткова Л.Н., Гуцин Е.Н. О распределении урана, тория, фтора, хлора, молибдена и ниобия в липаритах и кислых вулканических стеклах // Записки ВМО. 1970. Ч. 99. Вып. 2. — С. 165–177.
13. Шатков Г.А. О природе высокорadioактивных гранитов и риолитов Керулено-Аргунского микроконтинента Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). — Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2009. — Т. 2. С. 141–142.
14. Шатков Г.А. U-Pb (SIMS SHRIMP II) возраст вулканических образований Тулукуевской кальдеры (Стрельцовский урановорудный узел, Восточное Забайкалье) / Г.А. Шатков, Н.Г. Бережная, Е.Н. Лепехина, Н.В. Родионов, И.П. Падерин, С.А. Сергеев // Докл. РАН. 2010. Т. 432. № 3. — С. 360–364.
15. Шатков Г.А., Бутаков П.М. Редкие земли как индикаторы генезиса флюоритовых и флюоритсодержащих месторождений Забайкалья // Регион. геология и металлогения. 2011. № 46. — С. 67–84.
16. Шатков Г.А., Бутаков П.М. Признаки участия уранилфторидов в формировании богатых урановых руд месторождений стрельцовского типа, Восточное Забайкалье // Докл. РАН. 2013. Т. 449. № 6. — С. 445–459.
17. Шатков Г.А., Бутаков П.М. Геолого-геохимические критерии прогнозирования месторождений стрельцовского типа // Уран: геология, ресурсы, производство. — М.: ВИМС, 2013. — С. 360–371.
18. Шатков Г.А. Урановые минералы во флюоритах Стрельцовского и Аргунского месторождений (Восточное Забайкалье) / Г.А. Шатков, А.В. Антонов, П.М. Бутаков, С.В. Кашин, С.А. Сергеев // Регион. геология и металлогения. 2014. № 60. — С. 87–97.
19. Rosholt J.N., Prijana, Noble D.C. Mobility of uranium and thorium in glassy and crystallized silicic volcanic rocks // Econ. Geol. 1971. Vol. 66. — P. 1061–1069.
20. Laverov N.P., Velichkin V.I., Krylova T.L. Genesis and formation conditions of deposits of the unique molybdenum-uranium Streltsovsky ore field: New mineralogical-geochemical and physicochemical data. *Geology of Ore Deposits*. 2007. Vol. 49. N 5. P. 446–470.
21. Goroshko M.V., Malyshev Yu.F., Kirillov V.E. *Uranium Metallogeny of the Russian Far East*. M.: Nauka, 2006. 372 p.
22. Ischukova L.P., Modnikov I.S., Sychev I.V. et al. *Uranium deposits of the Streltsovsky ore field in Transbaikalia*. Irkutsk: Glazkovskaya Printing Office, 2007. 260 p.
23. Kerr P.F. Ore Deposits of the USA. V. II. Trans. from English. M.: Mir, 1973. P. 529–546.
24. Kogarko L.N., Krigman L.D. *Fluorine in silicate melts and magmas*. M.: Nauka, 1981. 128 p.
25. Laverov N.P., Velichkin V.I., Vlasov B.P., Aleshin A.P., Petrov V.A. *Uranium and molybdenum-uranium deposits in areas of continental intracrustal magmatism: geology, geodynamic and physico-chemical conditions of formation*. M.: IPE RAS, IGEM RAS, 2012. 320 p.
26. Lipilina I.I. *Uranium and its compounds*. M.: Publishing House of the USSR Academy of Sciences, 1959. 316 p.
27. Mashkovtsev G.A., Konstantinov A.K., Miguta A.K., Shumilin M.V., Schetochkin V.N. *Uranium of Russia*. M.: VIMS, 2010. 850 p.
28. Naumov G.B. Migration of uranium in hydrothermal solutions. *Geology of Ore Deposits*. 1998. N 4. P. 307–325.
29. Regional *Metallogeny of Central Asia*. Editors-in-chief: O.V. Petrov, Dong Shuwen. SPb.: VSEGEI Press, 2012. 248 p. (VSEGEI Proceedings. New series. Vol. 353).
30. Shatkova L.N., Shatkov G.A. About possible source of ore material of uranium-fluorite deposits. *Geology of Ore Deposits*. 1973. N 4. P. 36–44.
31. Shatkov G.A., Shatkova L.N., Gushchin E.N. Distribution of uranium, thorium, fluorine, chlorine, molybdenum and niobium in liparite and acidic volcanic glass. *Proceeding of the All-Union Min. Society*. 1970. Part 99. Issue 2. P. 165–177.
32. Shatkov G.A. About the nature of highly radioactive granite and rhyolite of the Kerulen-Argun microcontinent of the Central Asian fold belt. *Geodynamic Evolution of the Lithosphere of the Central Asian Mobile Belt (from Ocean to Continent)*. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust. 2009. Vol. 2. P. 141–142.
33. Shatkov G.A., Berezhnaya N.G., Lepekhina E.N., Rodionov N.V., Paderin I.P., Sergeev S.A. U-Pb (SIMS SHRIMP II) age of volcanic formations of the Tulukuevsky caldera (Streltsovsky uranium ore node, Eastern Transbaikalia). *Reports of Russian Academy of Sciences*. 2010. Vol. 432. N 3. P. 360–364.
34. Shatkov G.A., Butakov P.M. Rare earths as indicators of the genesis of fluorite and fluorite-bearing deposits in Transbaikalia. *Regional Geology and Metallogeny*. 2011. N 46. P. 67–84.
35. Shatkov G.A., Butakov P.M. Indicators of uranyl fluoride participation in the formation of rich uranium ore of Streltsovsky-type deposits, Eastern Transbaikalia. *Reports of Russian Academy of Sciences*. 2013. Vol. 449. N 6. P. 445–59.
36. Shatkov G.A., Butakov P.M. Geological and geochemical criteria of forecasting Streltsovsky type deposits. *Uranium: Geology, Resources, Production*. M.: VIMS, 2013. P. 360–371.
37. Shatkov G.A., Antonov A.V., Butakov P.M., Kashin S.V., Sergeev S.A. Uranium minerals in the fluorite of the Streltsovsky and Argun deposits (Eastern Transbaikalia). *Regional Geology and Metallogeny*. 2014. N 60. P. 87–97.
38. Rosholt J.N., Prijana, Noble D.C. Mobility of uranium and thorium in glassy and crystallized silicic volcanic rocks // Econ. Geol. 1971. Vol. 66. — P. 1061–1069.

Шатков Георгий Афанасьевич — доктор геол.-минер. наук, гл. науч. сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия. <Georgy_Shatkov@vsegei.ru>

Shatkov Georgy Afanasyevich — Doctor Geological and Mineralogical Sciences, Chief Researcher, A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74, Sredny prospect, St. Petersburg, 199106, Russia. <Georgy_Shatkov@vsegei.ru>