

# Роль Светлинской гранитогнейсовой купольной структуры в образовании кварцево-жильных месторождений (Южный Урал)

Александр Юрьевич КИСИН<sup>1, 2</sup>,  
Виталий Николаевич ОГОРОДНИКОВ<sup>2</sup>,  
Юрий Алексеевич ПОЛЕНОВ<sup>2</sup>,  
Валерий Васильевич МУРЗИН<sup>1</sup>,  
Михаил Егорович ПРИТЧИН<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и геохимии им. акад. Заварицкого УрО РАН, Россия, Екатеринбург

<sup>2</sup>Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

**Актуальность работы.** Кочкарский зональный метаморфический комплекс сформировался в результате регионального сжатия земной коры во время коллизионных преобразований. В этих условиях по границам гнейсовых блоков развивались шовные зоны, в пределах которых породы претерпели метаморфическую трансформацию на уровне эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой фаций. Результаты исследований позволят усовершенствовать методику прогнозно-поисковых работ на месторождениях подобного типа.

**Цель работы:** установление парагенетических связей между месторождениями золота, горного хрусталя и миароловых редкометалльных пегматитов, расположенных на площади Кочкарского антиклинория, вблизи поселка Светлый на Южном Урале.

**Методология исследования.** Для решения поставленных задач использованы новые материалы, собранные при изучении бортов Светлинского золоторудного карьера, дешифрирования аэрофото- и космоснимков, а также переинтерпретации фактического материала за последние 50 лет.

**Результаты.** Объединяющим звеном для данных месторождений выступает слабо эродированный Светлинский купол, осложняющий кровлю крупного гранитогнейсового массива. В итоге исследования установлено, что к апикальной части купола приурочено Светлинское месторождение горного хрусталя, к межкупольной структуре – поле миароловых редкометалльных пегматитов, а к западной надвиго-взбросовой границе – Светлинское золоторудное месторождение.

**Выводы.** Светлинская купольная структура позднепалеозойского возраста, претерпевшая в раннюю и позднюю коллизии значительные тектонические деформации, контролирует месторождения пьезокварца и золота, а также частично поле редкометалльных миароловых пегматитов с драгоценными камнями.

**Ключевые слова:** геология месторождений, пегматиты, пьезокварц, геотектоника, Урал.

**В**ведение  
В 100 км к югу от г Челябинска и в 25 км к юго-западу от г Пласт находится пос. Светлый, вблизи которого расположены одноименные месторождения золота, горного хрусталя (пьезокварца) и поле редкометалльных пегматитов с хрусталеносными полостями. Месторождения были открыты и разведывались в разное время различными ведомствами бывшего СССР. Соответственно исследователями практиковались и различные подходы к генезису месторождений, выделению рудогенерирующих и рудо локализирующих структур. Те или иные вопросы геологии и генезиса данных месторождений обсуждались многими исследователями [1–7].

Кочкарский антиклинорий является типичным представителем гранитогнейсовых блоков на Урале и характеризуется ярко проявленным купольным тектоногенезом. Протяженность антиклинория свыше 120 км при ширине до 28 км. Границы тектонические, типа взбросов или надвигов, падающих под смежные структуры. Местами, в том числе на Светлинском месторождении золота, к ним приурочены небольшие тела серпентинитов и талькиитов, что свидетельствует о коровом масштабе надвигов. Купольные структуры имеют форму широких овалов и сложены преимущественно гнейсами, гнейсогранитами и анатектическими гранитами. Границы куполов тектонические, типа зон тектонических срывов, образующих веер, раскрытый кверху. Породы около- и межкупольного пространства представлены кварц-полевошпат-биотитовыми сланцами (местами с кианитом, силлиманитом и ставролитом), амфиболитами и мраморами. Метаморфизм высокоградиентный, зональный: в ядрах купольных структур достигал условий амфиболитовой фации, а в около- и межкупольном пространстве – эпидот-амфиболитовой и верхов зеленосланцевой фаций [1, 3]. Широко проявлены различные метасоматические процессы с образованием кварцевых жил с алюмосиликатами в оторочках [7]. Прогрессивный метаморфизм завершается становлением анатектических гранитов тоналит-гранодиоритовой формации и образованием дайкового комплекса, а также редкометалльных пегматитов.

Взаимосвязь ведущих эндогенных процессов – регионального метаморфизма, ультраметаморфизма, магматизма – определяет в главных чертах общее состояние флюидных систем в шовных зонах и гнейсовых куполах, ответственных в конечном итоге за характер протекания и тенденции в направленности завершающих метасоматических процессов.

Флюиды играют большую роль в планетарных эндогенных геологических процессах. Наиболее широко они проявляют себя в процессах метаморфизма и ультраметаморфизма. Геодинамические процессы на границах литосферных плит и рифтогенных шовных зон, наряду с процессами высокотемпературного метаморфизма, сопровождаются интенсивным магматизмом, который в обязательном порядке сочетается с поступлением жидких и газообразных флюидов, масса которых не только не уступает объемам магматических расплавов, но и превосходит их. Внедрение магматических расплавов и подъем метаморфизирующих флюидов генетически и пространственно тесно связаны, но по проис-

хождению и поведению они достаточно независимы. Роль флюидов в рудообразовании не только значительная, но и определяющая, поскольку мобилизация металлов, их концентрация и отложение руд связаны только с флюидами [8].

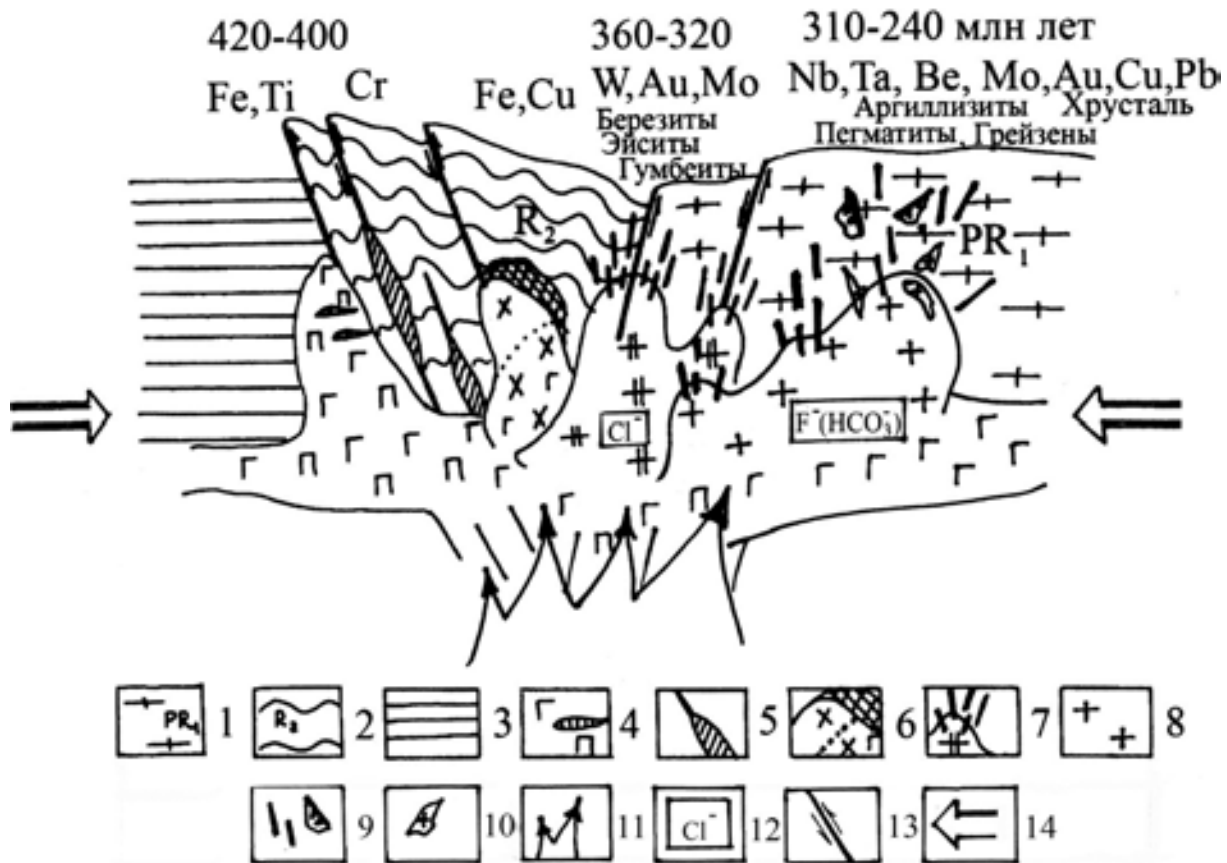
Коллизионный этап развития структур Урала проявлен с 380 до 240 млн лет и разбивается на две стадии: раннюю (380–320 млн лет) – метаморфической трансформации и позднюю (320–240 млн лет) – пластических деформаций [9, 10].

В шовных зонах смятия, ограничивающих древние докембрийские гнейсовые блоки, в раннем палеозое отмечаются кондуктивные теплотокеты, вызывающие в вулканогенно-осадочных толщах обрамления метаморфическую трансформацию на уровне эпидот-амфиболитовой фации. Магматизм в этих зонах начинается габброидами так называемой раннедевонской серии, имеющей возраст 420–380 млн лет. Наличие флюидного потока приводит к значительному замедлению процесса кристаллизации базитового расплава. Этот магматизм создавал и вещество протолита тоналитов, гранодиоритов и источник энергии для их плавления. Базиты наращивали снизу кору, обусловили ее повышенную мощность в блокоограничивающих шовных зонах и гнейсово-амфиболитовых мегаблоках [11, 12]. Производные от базитов анатектические гранитоиды имеют преимущественно тоналитовый или гранодиоритовый состав (рис. 1).

Возраст по цирконам для этих интрузивных пород определен в интервале 360–320 млн лет [12]. Таким образом, закладывается основа многофазных плутонов, причем количество фаз зависит от тектонической обстановки в зоне смятия. Становление их происходило в магматической камере путем пульсационной кристаллизации единого магматического расплава с последовательным раскислением последующих фаз. Пульсационная кристаллизация особенно характерна для верхних частей плутонов, и оптимальные глубины ее проявления определяются в 1–4 км [14].

Границы фаз разделяются во времени деформационным перерывом, когда происходили инъекции магматического расплава во вмещающие породы и в раскристаллизованные гранитоиды предыдущих фаз с образованием даек, штоков и куполов аплитов, аплитовидных гранитов и пегматитов на заключительном этапе.

Интервал 380–320 млн лет характеризует стадию раннего этапа метаморфогенно-гидротермального кварцево-жильного оруденения, который обусловлен проявлением процессов ранней коллизии в пределах нижнепротерозойского гнейсового блока. Вулканогенно-осадочные породы обрамления представляют собой тектоническую зону влияния

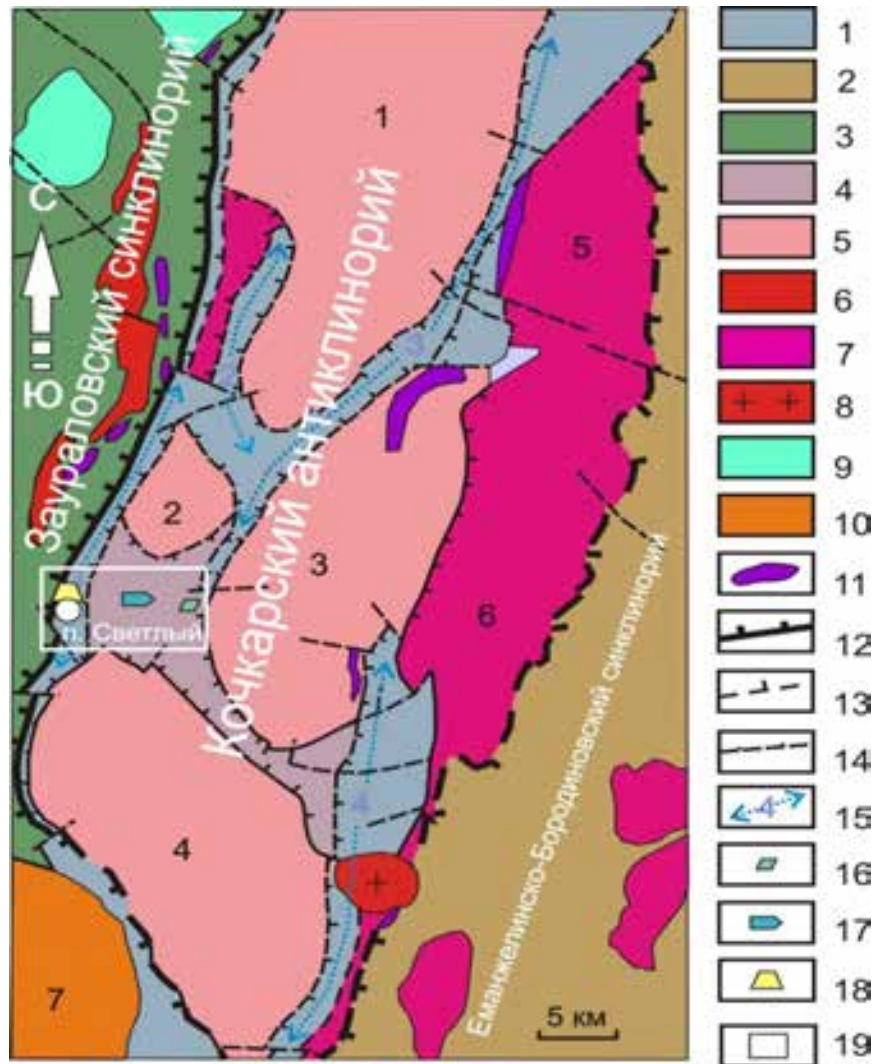


**Рисунок 1. Кинематическая модель формирования кварцево-жильных месторождений во время ранней и поздней коллизии. По [13]:** 1 – древняя континентальная кора; 2 – вулканогенно-осадочные отложения континентального рифта; 3 – толеитовые раннеокеанические образования; 4 – ультрабазит-габбровый комплекс с титаномагнетитовой минерализацией; 5 – ультрабазиты дунит-гарцбургитового хромитоносного комплекса; 6 – габбро-диорит-гранодиоритовая формация с Fe–Cu скарнами; 7 – гранитоиды тоналит-гранодиоритовой формации с W, Mo и Au кварцевыми жилами; 8 – нормальные микроклиновые граниты; 9 – рудные кварцевые жилы и хрусталеносные гнезда; 10 – пегматиты; 11 – мантийный теплофлюидопоток в шовных зонах; 12 – хлоро- и фторотипная специализация гранитоидов; 13 – блокоограничивающие шовные зоны; 14 – направление тангенциального сжатия во время коллизии.

**Figure 1. Kinematic model of the formation of quartz-vein deposits during early and late collisions.** According to [13]: 1 - ancient continental crust; 2 - volcanic-sedimentary deposits of the continental rift; 3 - tholeiitic early oceanic formations; 4 - ultrabasic-gabbro complex with titanomagnetite mineralization; 5 - ultrabasites of the dunite-harzburgite chromite-bearing complex; 6 - gabbro-diorite-granodiorite formation with Fe-Cu skarns; 7 - granitoids of tonalite-granodiorite formation with W, Mo and Au quartz veins; 8 - normal microcline granites; 9 - ore quartz veins and crystal bunches; 10 - pegmatites; 11 - mantle heat-fluid flow in suture zones; 12 - chloro- and fluorotypic specialization of granitoids; 13 - block-limiting suture zones; 14 - direction of tangential contraction during collision.

Кумляжской и Светлинской шовных зон [3]. Так как эта зона более напряженная по сравнению с восточной – Борисовской и Чернореченской, то и формирование крупных тел гранитоидов тоналит-гранодиоритовой формации, аналогичных Пластовскому, здесь затруднено. В пределах кварцево-жильного поля имеются небольшие удлиненные массивы, большей своей частью не вскрытые эрозией, а подсеченные колонковыми скважинами.

Во время поздней коллизии (320–240 млн лет) в шовных зонах, обрамляющих «микроконтиненты», проявились дислокационный метаморфизм, рассланцевание, будинаж. Для метаморфитов характерно развитие стресс-минералов: кианита, ставролита, фенгита, хлоритоида и др. В это время в центральных частях гнейсовых блоков (рис. 1) в связи с



**Рисунок 2. Схематическая геологическая карта домезозойских образований Кочкарского метаморфического комплекса (Государственная геологическая карта СССР домезозойских образований, Среднеуральская серия, масштаб 1 : 200 000, 1981 г., под ред. Н. Г. Берлянд; с упрощениями и дополнениями). 1 – мраморы, мраморизованные известняки (С, v<sub>3</sub>); 2 – порфириды базальтовые и андезит-базальтовые; туффы, туфопесчаники; сланцы биотит-амфибол-полевошпатовые (S<sub>2</sub>-D<sub>1</sub>); 3 – туфы, порфиры липарит-дацитовые; алевролиты, гравелиты, туфы базальтового состава; сланцы углисто-кремнистые (O<sub>3</sub>-S<sub>13</sub>); 4 – кристаллические сланцы, иногда с кианитом, силлиманитом, ставролитом (C<sub>1</sub>-P<sub>2</sub>?); 5 – гнейсы, гранитогнейсы, амфиболиты, граниты двуслюдяные (C<sub>2</sub>-P<sub>1</sub>); 6 – граниты биотитовые, лейкократовые γ<sub>1</sub>C<sub>2</sub>-P<sub>1</sub>); 7 – плагиограниты (γ<sub>2</sub>δD<sub>3</sub>-C<sub>1</sub>); гранодиориты (γ<sub>1</sub>δD<sub>3</sub>-C<sub>1</sub>); 8 – граниты (γ<sub>3</sub>C<sub>1</sub>); 9 – габбро (vS<sub>1</sub>); 10 – сиениты, граносиениты, щелочные граниты (γεC<sub>1-2</sub>); 11 – ультрабазиты серпентинизированные (ψS<sub>1</sub>?); 12 – тектонические границы антиклинория с надвиговой кинематикой; 13 – границы куполовидных структур, сложенных гранитогнейсами с кристаллическими сланцами обрамления (Pz<sub>3</sub>); 14 – тектонические нарушения; 15 – оси грабен-синклиналей (1 – Светлинско-Котликовская, 2 – Демаринско-Михайловская, 3 – Чукинско-Кучинская, 4 – Кочкарско-Чернореченская); 16–18 – рудопроявления и месторождения (16 – редкометалльные пегматиты с драгоценными камнями; 17 – горного хрусталя; 18 – золота); 19 – описываемая площадь. Цифры (массивы): 1 – Варламовский; 2 – Еремкинский; 3 – Борисовский; 4 – Санарский; 5 – Коелгинский; 6 – Пластовский; 7 – Степнинский.**

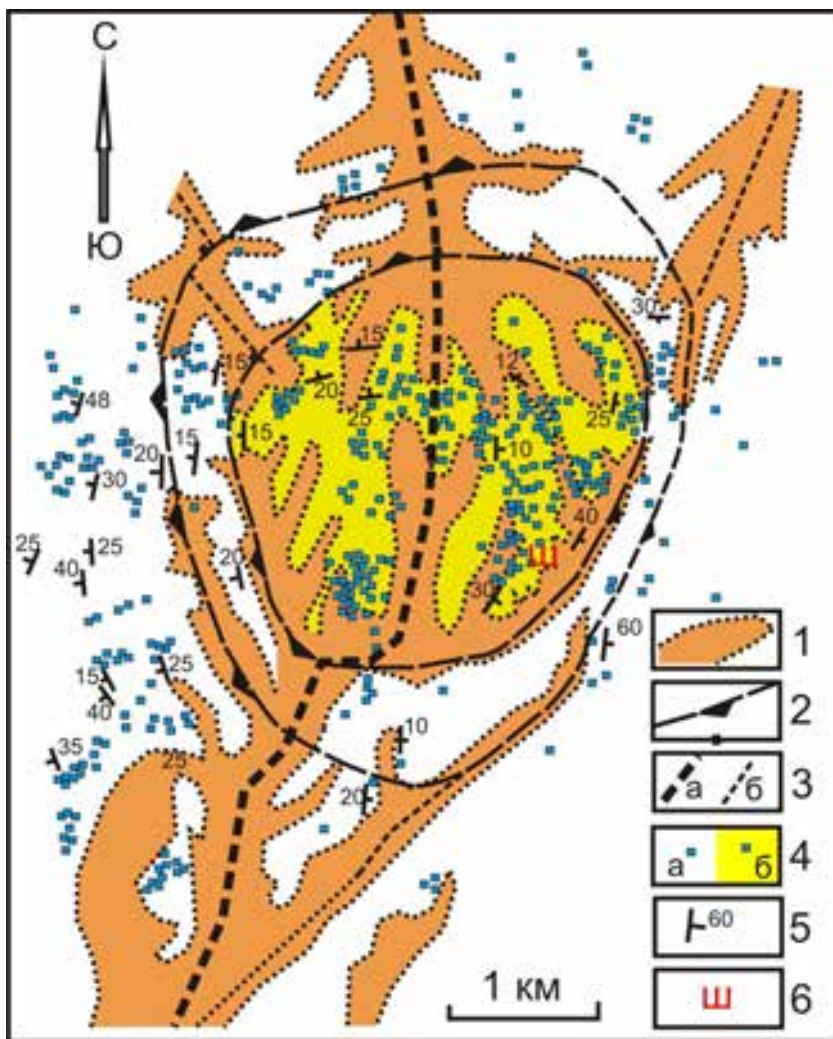
**Figure 2. Schematic geologic map of pre-Mesozoic formations of the Kochkarsky metamorphic complex (State geological map of the USSR of pre-Mesozoic formations, Middle Urals series, scale 1 : 200 000, 1981, ed. by N.G. Berlyand; in simplistic terms with additions). 1-marbles, marbled limestones (C, v<sub>3</sub>); 2-porphyrates basalt and andesite-basalt; tuffites, tufopeschaniki; shales biotite-amphibole-feldspar (S<sub>2</sub>-D<sub>1</sub>); 3-tuffs, porphyry Liparite-dacite; siltstones, gravelites, tuffs of basalt composition; shales carbonaceous-siliceous (O<sub>3</sub>-S<sub>13</sub>); 4 - crystalline shales, sometimes with kyanite, sillimanite, staurolite (C,P2?); 5-gneisses, granitogneisses, amphibolites, granites dioecious (C2-P<sub>1</sub>); 6 - biotite granites, leucocratic γ, C2 Insert tag (Alt + 1) -P<sub>1</sub>); 7 - plagiogranites (γ<sub>2</sub>δD<sub>3</sub>-C<sub>1</sub>); granodiorites (γ, δD<sub>3</sub>-C<sub>1</sub>); 8 - granites (γ<sub>3</sub>C<sub>1</sub>); 9 - gabbro (vS<sub>1</sub>); 10 - syenites, granosyenites, alkaline granites (γεC<sub>1-2</sub>); 11 - serpentized ultrabasic rocks (fS<sub>1</sub>?); 12 - tectonic boundaries of anticlinorium with thrust kinematics; 13 - boundaries of dome-shaped structures composed of granite gneisses with crystal framing schists (Pz<sub>3</sub>); 14 - tectonic disturbances; 15 - axis of the graben-synclines (1 - Svetlinsko-Kotlikovskaya, 2 - Demarinsko-Mikhailovskaya, 3 - Chuksinsko-Kuchinskaya, 4 - Kochkarsko-Chernorechenskaya); 16-18 - ore occurrences and deposits (16 - rare-metal pegmatites with precious stones; 17 - rock crystal; 18 - gold); 19 is the described area. Numbers (massifs): 1 - Varlamovskiy; 2 - Yeremkinskiy; 3 - Borisovskiy; 4 - Sanarskiy; 5 - Koelginskiy; 6 - Plastovskiy; 7 - Stepninskiy.**

постмагматической деятельностью позднеколлизионных микроклиновых гранитов, имеющих за счет переплавления корового субстрата фторотипную специализацию растворов, формируются магматогенно-гидротермальные месторождения – керамические, редкометалльные и хрусталеносные пегматиты, грейзены. Такая пространственная локализация этих месторождений обусловлена тем, что при отделении газовой фазы на поздней стадии кристаллизации магматических очагов фтор, в отличие от хлора, преимущественно остается в силикатном расплаве и фиксируется кристаллизующимися минералами, а не уходит в водный флюид. Это подтверждается и экспериментальными данными [15, 16]. В результате проведенных сопоставлений экспериментальных данных с составами фторсодержащих минералов и термодинамических расчетов достаточно определенно выявляется, что содержание фтористых соединений в водном флюиде, равновесном с гранитом, характеризующимся кларковыми количествами галогенов, на 2–3 порядка ниже концентрации хлоридов в этой же фазе [17].

Мысль о том, что Светлинское месторождение горного хрусталя контролируется небольшой купольной структурой, ядро которой сложено гнейсогранитами и анатектическими гранитоидами тоналит-гранодиоритовой формации позднего палеозоя, получила свое развитие в ряде статей [5, 6].

Как видно на рис. 2, Светлинское месторождение пьезокварца и одноименное пегматитовое поле расположены между тремя купольными структурами: Ерёмкинской, Борисовской и Санарской (на севере, востоке и юге соответственно).

Стиль деформаций пород в смежных блоках разный: в Заураловском синклинии получила развитие линейная складчатость, а в Кочкарском антиклинории развиты куполовидные (брахиоформные) структуры. Линейная складчатость в синклинической зоне и возникновение надвига на границе с антиклинорием объясняются условиями горизонтального субширотного (в современных координатах) сжатия. Образование куполовидных структур рассмотрим



**Рисунок 3. Кольцевая структура на Светлинском месторождении горного хрусталя, фиксирующая апикальную часть купольной структуры (составлена по материалам Ларинской ГРЭ и результатам дешифрирования космоснимков). 1 – неоген-четвертичные лога с горным хрусталем; 2 – предполагаемые зоны тектонического срыва и направление их падения; 3 – зоны горизонтального растяжения (а – осевого; б – вспомогательных направлений); 4 – кварцевые жилы, иногда с горным хрусталем (а – бесцветным, б – цветным); 5 – элементы залегания сланцеватости пород; 6 – благородная шпинель и корунд. Пояснения в тексте**

**Figure 3. Ring structure at the Svetlinskoye rock crystal deposit, which fixes the apical part of the dome structure (compiled from the materials of the Larinskaya geological survey expedition and the results of interpretation of satellite images).**

1 - Neogene-Quaternary logs with rock crystal; 2 - prospective zones of tectonic failure and the direction of their fall; 3 - zones of horizontal extension (a - axial; b - auxiliary directions); 4 - quartz veins, sometimes with rock crystal (a - colorless, b - color); 5 - elements of occurrence of shale rocks; 6 - noble spinel and corundum. Explanations are in the text.

подробнее. Оказалось, что все эти три месторождения хорошо увязываются с предполагаемой Светлинской купольной структурой. Отметим некоторые особенности геологии данных месторождений, подтверждающие их связь с купольной структурой. Г. А. Кейльман и др. [18] выделяют несколько этапов деформаций в Кочкарском антиклинории. Ранний этап включает возникновение взбросо-надвигов и плавных открытых складок продольного изгиба преимущественно субмеридионального простирания. В наших построениях это отвечает опусканию блока под весом надвигаемых смежных блоков и возникновению в нем положительного продольного изгиба коры. На втором этапе крупные положительные структуры усложняются поднятиями более высоких порядков при общем блоковом воздымании и площадном метаморфизме. Появляются участки повышенных тепловых потоков с тенденцией смены линейной складчатости – купольной. Купольный тектоногенез напрямую связывается ими с участками повышенных тепловых потоков и развитием в них «раннекинематических гранитов».

Площадь Светлинского месторождения пьезокварца достаточно изометричная, около  $3 \cdot 3$  км, слегка возвышенная, с абсолютным превышением 30–40 м. К настоящему времени месторождение полностью отработано. Оно хорошо изучено с использованием геологических, геофизических и геохимических методов, горно-буровых работ и широко освещено в многочисленных публикациях (сводку см. в [3, 4]). По геофизическим данным «Башнефтегеофизики» (материалы Ларинской ГРЭ), под Светлинским месторождением горного хрусталя на глубине около 400 м располагается кровля «гранитного» массива.

Апикальная часть купольной структуры отчетливо просматривается в системе неоген-четвертичных логов, детально откартированных в связи с приуроченностью к ним продуктивных россыпей горного хрусталя, а также дешифрированием космоснимков. На площади широко развиты линейные коры выветривания Mz–Kz возраста. Логами отрисовывается система кольцевых разломов, фиксирующих, по нашему мнению, апикальную часть купольной структуры (рис. 3). Система логов на Светлинском месторождении хрусталя рисует отчетливую кольцевую структуру. На месторождении распространены хлорит-биотитовые сланцы, обычно с кварцем и плагиоклазом, реже амфиболовые сланцы и амфиболиты. Из метаморфических минералов распространение имеют ставролит и силлиманит (фибролит), локально – андалузит. Отмечены находки серовато-синего корунда и розовой шпинели в ассоциации с форстеритом, серпентином, тальком, графитом и магнетитом [6].

Сланцеватость пород также отрисовывает асимметричную куполовидную структуру, слегка вытянутую в меридиональном направлении. В центральной части структуры углы падения сланцеватости весьма пологие, около  $10^\circ$ . К востоку они быстро возрастают до  $60^\circ$ , а к западу медленно и плавно увеличиваются вплоть до  $45^\circ$  (вблизи контакта с мраморами) (рис. 4). Подавляющая часть кварцевых жил попадает на апикальную часть структуры и ее пологое западное крыло.

Кварцево-жильное оруденение, в том числе и с вольфрамом и золотом, сопряженное с раннеколлизийными гранитоидами тоналит-гранодиоритовой формации, обуславливается эволюцией термоградиентных полей, создаваемых массивами этой формации на стадии их консолидации (Пластовский, Шарташский, Айдырлинский, Великопетровский и многие другие массивы).

Кварцевые жилы выполняют протяженные (до 100 м, иногда до 1–1,5 км) трещины скола, реже отрыва, образуют веер жил с крутыми углами падения и представляют собой типичные жилы выполнения с резкими контактами, практически лишенными околожильных изменений. Мощность жил обычно не превышает 1 м, но иногда достигает 2,0–2,5 м. К ним относятся «безрудные», мономинеральные кварцевые жилы со стекловидным, молочно-белым кварцем и «рудные» – шеелит-кварцевые, шеелит-турмалин-кварцевые, золото-кварцевые жилы, нередко с сурьфидами и арсенопиритом, которые совместно с «безрудными» образуют совмещенные жильные поля [19].

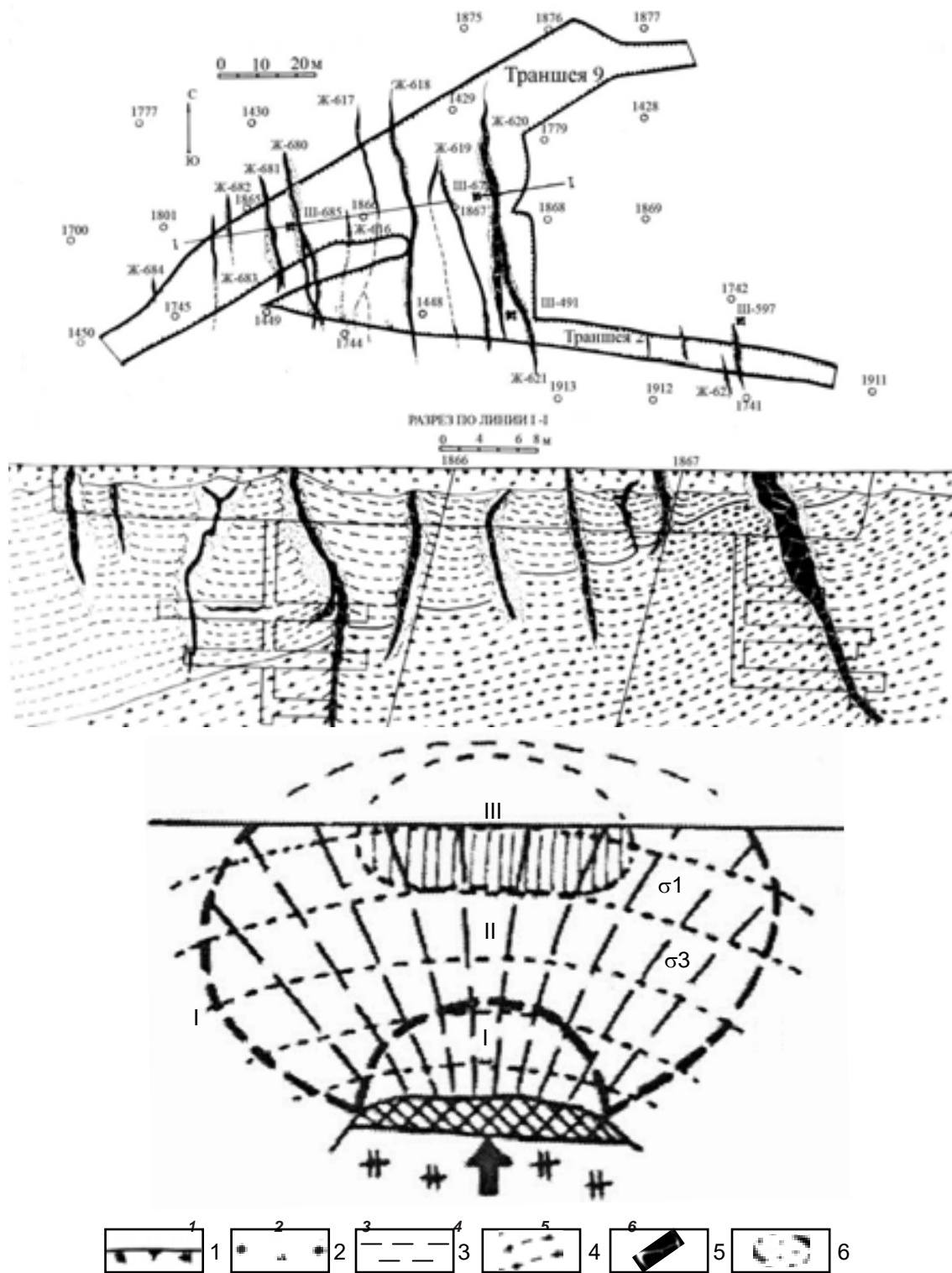
Кварцевые жилы концентрируются во вмещающих породах над остывающим магматическим очагом, в зоне резких температурных градиентов в трещинах скола и отрыва. Ориентировка осей главных напряжений и поверхностей скалывания указывает на вертикальное направление активных усилий снизу вверх магматических масс, создаваемое в результате субширотного сжатия Кочкарского антиклинория.

Поэтому деформации этого этапа и образование трещин можно связывать с механизмом поперечного изгиба в жестком блоке при давлении снизу вверх остывающего магматического очага (рис. 4). В распределении зон образования трещин выделяется куполообразная ненарушенная зона (I) непосредственно над очагом расплава («штамп»). Это связано с тем, что здесь все главные напряжения достигают больших величин и действуют как сжимающие усилия, формируя зону всестороннего сжатия. Выше этой зоны располагается область возникновения сколовых трещин (II) (рис. 4). Симметрично относительно «штампа» над зоной сколов располагается зона трещин отрыва (III), которая совпадает с локальным максимумом сколовых напряжений  $\sigma_1$  [20].

Экспериментальные данные [21] и геологические наблюдения показывают, что в градиентных полях рудные и петрогенные элементы закономерно перераспределяются и образуют свои зоны обогащения [10, 22–24]. Так, вольфрам, молибден, мышьяк тяготеют к источникам локального нагревания, т. е. к кровле массива, причем смена оруденения по направлению к вершине купола выглядит следующим образом: W–(Bi + Sn)–Mo (рис. 5). Оруденение распространяется на удалении 200–300 м, медь, свинец, цинк перемещаются и концентрируются в более удаленных холодных частях системы во вмещающих породах на удалении до 1–2,5 км [10, 23, 24].

Поздняя коллизия характеризуется мощным тепловым потоком в пределах гнейсового блока, активным метаморфизмом, достигающим амфиболитовой фации, процессами гранитизации с образованием автохтонных гранитоидов Борисовского комплекса и достаточно крупными магматическими очагами с формированием аллохтонных гранитов Санарского комплекса. Процессы метаморфизма и магматизма сопровождалась интенсивными гидротермально-метасоматическими преобразованиями, которые несут различное оруденение.

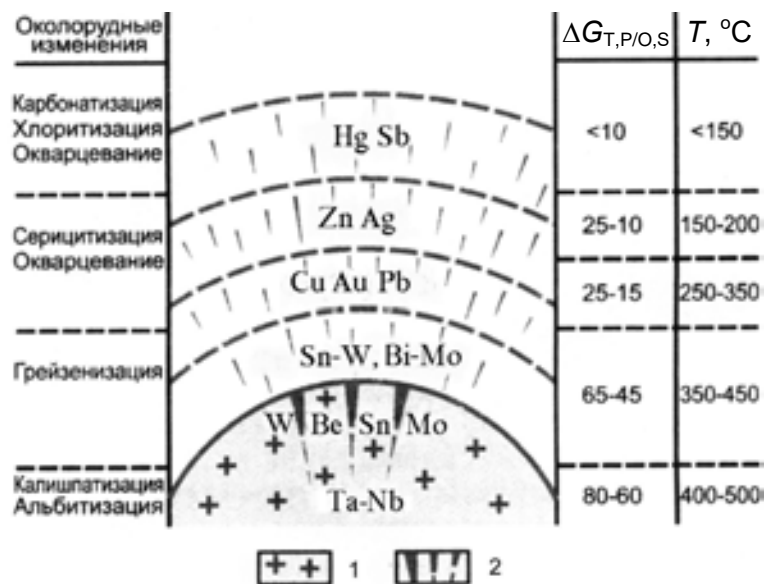
Кварцевые жилы сложены стекловидным, полупрозрачным и молочно-белым кварцем, обычно гигантокристаллической структуры, где отдельные блоки жильного кварца отделены друг от друга индукционными гранями и достигают размеров 30–40 см. Статистическая обработка элементов залегания 510 кварцевых жил Светлинского кварцево-жильно-



**Рисунок 4. Жилы выполнения. Светлинское хрусталеносное поле. Участок II-Водораздельный, траншеи № 2, 9 и схема образования трещин скальвания при механизме давления магматического тела снизу вверх, по [20]. 1 – почвенно-растительный слой; 2 – элювий; 3 – биотит-кварцевый сланец; 4 – двуслюдяно-кварцевый сланец; 5 – кварцевые жилы; 6 – измененные сланцы.**  
**Figure 4. Dilation vein. Svetlinsky crystal-bearing field. Section II-water-dividing, trenches No 2, 9 and the scheme of formation of shear fractures under the pressure of the magmatic body from the bottom-up, according to [20]. 1 - soil and plant layer; 2 - eluvium; 3 - biotite-quartz schist; 4 - two-mica-quartz schist; 5 - quartz veins; 6 - modified schists.**

го поля показала, что большая часть кварцевых жил имеют северо-западное простирание, выполняя эшелонированные трещины скальвания, и значительно реже выполняют трещины отрыва.

В зальбандах жил обычно развиваются двуминеральные парагенезисы, состоящие из алюмосиликатов: силлиманит-кварцевых, андалузит-кварцевых, мусковит-кварцевых метасоматитов [7]. В некоторых разновидностях метасоматитов отмечены парагенезисы с кордиеритом и куммингтонитом, что свидетельствует о развитии процесса в условиях относительно низкого давления. На заключительной стадии формирования кварцевых жил при ощелачивании растворов, при



**Рисунок 5. Контроль геохимической, рудной зональности температурной зональностью, возникающей вокруг флюидизированных рудоносных гранитных массивов [24]. 1 – граниты; 2 – кварцевые жилы.**  
**Figure 5. Control of geochemical ore zonality by the temperature zonality that occurs around fluidized ore-bearing granite massifs [24]. 1 - granites; 2 - quartz veins.**

высокой активности серы отлагаются сульфиды (2–5 %), среди которых резко преобладают пирит и халькопирит. Эти жилы слабозолотоносны (0,1–1,1 г/т), однако иногда в них попадаются участки, обогащенные золотом (до 15–18 г/т).

В жильном кварце Светлинского месторождения горного хрусталя, в протоочках также встречены рудные минералы: пирит, халькопирит, сфалерит, шеелит, магнетит, ильменит, ксенотим, монацит, колумбит, рутил, в единичных знаках самородное золото. Наиболее высокие содержания характерны для западного блока, примыкающего к горному отводу золоторудного месторождения.

Более поздние (постжильные) метасоматиты сформировались в результате развития хрусталеносных гнезд из щелочных низкотемпературных растворов. В пределах Светлинского месторождения развиты кварцевые жилы с хрусталеносными гнездами и без них. Кварцевые жилы, особенно стекловидные, в свое время использовались для варки специальных стекол и в качестве сырья для выращивания кристаллов кварца. Жилы же с хрусталеносными полостями, содержащие кондиционные кристаллы кварца, представляют основной практический интерес. Из указанных ранее более



**Рисунок 6. Пересечение хрусталеносным гнездом полевошпат-кварцевой жилы, локализованной в амфиболитах. Центральный блок, Светлинское месторождение. По [25]. 1 – амфиболит; 2 – жильный кварц; 3 – жильный кварц перекристаллизованный; 4 – полевошпат; 5 – кристаллы кварца; 6 – хлорит; 7 – глинистые минералы.**  
**Figure 6. Intersection of the crystal-bearing bunch of feldspar-quartz vein localized in amphibolites. Central block, Svetlinskiy deposit. According to [25]. 1 - amphibolite; 2 - vein quartz; 3 - vein quartz recrystallized; 4 - feldspar; 5 - quartz crystals; 6 - chlorite; 7 - clay minerals.**

360 кварцевых учтенных жил Светлинского кварцево-жильного месторождения только 15 % являются хрусталеносными и только 2–3 % из последних жил содержат гнезда с кондиционными кристаллами кварца. Работами многих исследователей показано, что хрусталеносные гнезда наложены на кварцевые жилы [4, 7, 25], что доказывается главным образом тем, что отдельные гнезда пересекают кварцевые жилы (рис. 6).

Формированию хрусталеносных гнезд предшествовала хрупкая деформация, что привело к дроблению кварца в залъбандовых частях и на выклинках кварцевых жил. В эти ослабленные участки поступал хрусталеобразующий гидротермальный раствор, который обусловил трансформацию минералов кварцевых жил и их вмещающих пород.

Раздробленный жильный кварц частично растворялся, а оставшаяся часть выступила в качестве затравок для роста горного хрусталя. Биотит вмещающих пород и жил в указанных условиях заместился мусковитом гнездового выполения с выделением рутила и гетита. Магний обычно фиксировался в составе гнездового хлорита. Интересно, что иногда наблюдалось непосредственное развитие хлорита по биотиту, минуя стадию мусковитизации. Причем если жила расположена в амфиболитах, то хлорит накапливался в значительном количестве во внутренней части гнезд. При локализации жил в кристаллических сланцах хлорит в гнездах также отмечается, но в существенно меньшем количестве, к тому же он фиксируется «пятнами». Хлорит в гнездах (в рыхлой массе и в кристаллах кварца) представлен гельминтами размером до 1 мм и более в поперечнике.

Плаггиоклаз, развитый в оторочке кварцевых жил, в физико-химических условиях, свойственных формированию гнезд, замещается альбитом и мусковитом. В случае развития процесса в амфиболитах возникали альбитовые друзы. Хрустальные гнезда располагаются, как правило, на выклинивании кварцевых жил, когда кварцевая жила выступает в качестве экрана или в полостях растворения. Кристаллы кварца представлены темно-дымчатыми (в пегматитах), дымчатыми, лимонно-желтыми, фиолетовыми и визуальными бесцветными разностями.

### Заключение

Ядра куполовидных структур в блоках положительного изгиба коры обычно представлены массивами гранито-нейсов, которые часто отождествляются с поднятиями фундамента. Большую роль здесь играют метаморфические и метасоматические процессы. Их развитию весьма способствует наличие больших вертикальных и латеральных градиентов температур и давлений. Гранитизация и дебазификация являются наиболее важными и самыми распространенными метасоматическими процессами данного этапа. С ними связан вынос в околокупольное пространство ряда рудных и нерудных компонентов. В ядрах куполовидных структур накапливаются флюиды, обогащенные легколетучими элементами (Be, Li, Sn, Ta, Nb и др.). Над купольными структурами образуются крутопадающие трещины растяжения, выполненные кварцем.

Снятие тектонических напряжений переводит систему в регрессивный этап. В ядрах куполовидных структур и в зоне сжатия падает всестороннее давление, что может сопровождаться возникновением анатектических гранитов. Большой запас тепловой и химической энергии обеспечивает длительное функционирование пневматолито-гидротермальной системы. Расплавы, наиболее богатые летучими, формируют дайковый комплекс гранитов и пегматитов с редкометалльной и самоцветной минерализацией. В надкупольном пространстве формируется кварцево-жильное поле с наложенными хрусталеносными гнездами.

*Работа выполнена в рамках темы государственного задания ИГГ УрО РАН (гос. регистрации № АААА-А18-118052590028-9).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Болтыров В. Б., Пыстин А. М., Огородников В. Н. Региональный метаморфизм пород в северном обрамлении Санарского гранитного массива на Южном Урале // Геология метаморфических комплексов Урала: труды СГИ. 1973. Вып. 91. С. 53–66.
2. Таланцев А. С. Камерные пегматиты Урала. М.: Наука, 1988. 144 с.
3. Огородников В. Н., Сазонов В. Н., Поленов Ю. А. Минерагения шовных зон Урала. Ч. 1. Кочкарский рудный район (Южный Урал). Екатеринбург: УГГГА, 2004. 216 с.
4. Поленов Ю. А. Эндогенные кварцево-жильные образования Урала. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2008. 269 с.
5. Кисин А. Ю. Кварцевые жилы в надкупольных структурах и прогнозирование их хрусталеносности по элементам залегания // Ежегодник-1994. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1995. С. 74–77
6. Кисин А. Ю., Притчин М. Е. Разрывная тектоника на Светлинском месторождении золота (Южный Урал) // Вестник Перм. ун-та. Геология. 2015. Вып. 3 (28). С. 34–42.
7. Огородников В. Н. Алюмокремниевые метасоматиты Кочкарского и Адамовского метаморфических комплексов: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Екатеринбург, 1975. 120 с.
8. Овчинников Л. Н. Образование рудных месторождений. М.: Недра, 1988. 255 с.
9. Иванов К. С. Основные черты геологической истории (1,6–0,2 млрд лет) Урала: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1998. 253 с.
10. Сазонов В. Н., Огородников В. Н., Коротеев В. А., Поленов Ю. А. Месторождения золота Урала. Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2001. 622 с.
11. Калинин А. С., Ревердатто В. В., Васильева Э. Н. Модель глубинного плутонометаморфизма и анатексиса // ДАН СССР. 1977. Т. 237, № 5. С. 1167–1170.
12. Ферштатер Г. Б., Шардакова Г. Ю., Краснобаев А. А. и др. Rb–Sr и цирконовый U–Pb возраст Каменского мигматит-плутона (Средний Урал) // Ежегодник-2006. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2007. С. 200–206
13. Огородников В. Н. Пространственная и генетическая сопряженность золоторудных, редкометалльных и хрусталеносных кварцево-жильных образований Урала // Рудогенез. Миасс: ИМ УрО РАН, 2008. С. 212–219.
14. Косалс Я. А. Источники и способы обогащения рудным веществом ювенильных растворов в процессе формирования редкометалльных месторождений, связанных с гранитными интрузиями // К вопросу об источнике вещества эндогенных рудных месторождений. Алма-Ата: КазИМС, 1970. С. 105–115.
15. Barnham C. W. Hydrothermal fluids at the magmatic stage // Geochemistry of hidrothermal ore deposits. N. Y.: Holt, Rinehart, Winston, Inc., 1967. 670 p.
16. Munoz J. L., Eugster H. P. Experimental control of fluorine reaction in hydrothermal systems // Amer. Mineral., 1969. Vol. 54, № 5/6. P. 943–959.
17. Рябчиков И. Д. Термодинамика флюидной фазы гранитоидных магм. М.: Наука, 1975. 230 с.



18. Кейльман А. Г., Болтыров В. Б., Бурьян Ю. И., Горожанкин В. Т. К вопросу о структурной эволюции Кочкарского антиклинория // Геология метаморфических комплексов Урала: труды СГИ. 1973. Вып. 91. С. 38–45.
19. Огородников В. Н. Закономерности размещения и условия образования кварцево-жильных хрусталеносных и золоторудных месторождений Урала: дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Свердловск, 1993. 367 с.
20. Старостин В. И. Структурно-петрофизический анализ эндогенных рудных полей. М.: Недра, 1979. 240 с.
21. Дударев А. Н. Анализ геолого-физических условий эндогенного рудообразования. Новосибирск: Наука, 1975. 197 с.
22. Рундквист Д. В., Денисенко В. К., Павлова И. Г. Грейзеновые месторождения. М.: Недра, 1971. 328с.
23. Летников Ф. А. Синэнергетика геологических систем. Новосибирск: Наука, 1992. 228 с.
24. Летников Ф. А. Взаимосвязь процессов гранитизации, метаморфизма и тектоники // Геотектоника, 2000. № 1. С. 3–22.
25. Эшкин В. Ю., Карякина Т. А., Богданова Г. Н. Типы кристаллов кварца и закономерности их пространственного размещения на одном из хрусталеносных полей Урала // Геология, поиски и разведка нерудных полезных ископаемых. Л.: ЛГИ, 1974. Вып. 1. С. 71–78.

*Статья поступила в редакцию 20 мая 2019 года*

# The role of the Svetlinskaya granite-gneiss dome structure in the formation of quartz-vein deposits (South Ural)

Alexander Yurievich KISIN<sup>1</sup>,  
Vitaly Nikolaevich OGORODNIKOV<sup>2</sup>,  
Yuri Alekseevich POLENOV<sup>2</sup>,  
Valery Vasilyevich MURZIN<sup>1</sup>,  
Mikhail Egorovich PRITCHIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg

<sup>2</sup>Ural State Mining University, Russia, Ekaterinburg

**Relevance of the work.** The Kochkarsky zonal metamorphic complex was formed as a result of regional compression of the earth's crust during collisional transformations. Under these conditions, suture zones developed along the boundaries of the gneiss blocks, within which the rocks underwent a metamorphic transformation at the level of the epidote-amphibolite and amphibolite facies. The research results will improve the methodology of forecasting and prospecting in deposits of this type. Purpose of the work. determination paragenetic relationships between deposits of gold, rock crystal and myarolic rare-metal pegmatites located in the area of Kochkarsky anticlinorium, near the village of Svetly in the Southern Urals.

**Methodology of research.** To solve the set tasks, new materials were used, collected during the study of the walls of the Svetlinsky gold mine such as interpretation of aerial photographs and satellite imagery, as well as reinterpretation of actual material over the past 50 years.

**Results.** The common link between these deposits is the slightly eroded Svetlinsky dome, which complicates the overlying bed of a large granite-gneiss massif. As a result of the study, it was found that the Svetlinskoye rock crystal deposit is confined to the apical part of the dome; the field of myarolic raremetal pegmatites is located to the interdome structure, and the Svetlinskoye gold deposit is located to the western thrust-overthrust boundary.

**Conclusions.** The Svetlinsky dome structure of the Late Paleozoic age, which underwent significant tectonic deformations in the early and late collisions, controls the deposits of piezoquartz and gold, as well as partially the field of rare-metal myarolic pegmatites with precious stones.

**Keywords:** geology of deposits, pegmatites, piezoquartz, geotectonics, Urals.

## REFERENCES

1. Boltyrov V. B., Pystin A. M., Ogorodnikov V. N. 1973, *Regional'nyy metamorfizm porod v severnom obramlenii Sanarskogo granitnogo massiva na Yuzhnom Urale* [Regional metamorphism of rocks in the northern frame of the Sanar granite massif in the Southern Urals]. *Geology of metamorphic complexes of the Urals: proceedings of the Sverdlovsk State Institute*, issue 91, P. 53–66.
2. Talantsev A. S. 1988, *Kamernyye pegmatity Urala* [Chamber pegmatites of the Urals]. Moscow, 144 p.
3. Ogorodnikov V. N., Sazonov V. N., Polenov Yu. A. 2004, *Minerageniya shovnykh zon Urala* [Minerageny of suture zones of the Urals]. Part 1. Kochkarsky ore district (South Ural). Ekaterinburg, 216 p.
4. Polenov Yu. A. 2008, *Endogennyye kvartsevo-zhil'nyye obrazovaniya Urala* [Endogenous quartz-vein formations of the Urals]. Ekaterinburg, 269 p.
5. Kisin A. Yu. 1995, *Kvartsevyye zhily v nadkupal'nykh strukturakh i prognozirovaniye ikh khrustalenosnosti po elementam zaleganiya* [Quartz veins in domed structures and prediction of their crystallinity by attitude]. *Yearbook-1994*. Ekaterinburg, pp. 74–77.
6. Kisin A. Yu., Pritchyn M. E. 2015, Explosive tectonics at the Svetlinsky gold deposit (South Ural). *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya* [Bulletin of the Perm University. Geology], issue 3 (28), P. 34–42. (In Russ.)
7. Ogorodnikov V. N. 1975, *Alyumokremniyevyye metasomatity Kochkarskogo i Adamovskogo metamorficheskikh kompleksov* [Silicon-aluminum metasomatites of the Kochkarsky and Adamovsky metamorphic complexes], PhD thesis. Ekaterinburg, 120 p.
8. Ovchinnikov L. N. 1988, *Obrazovaniye rudnykh mestorozhdeniy* [Formation of ore deposits]. Moscow, 255 p.
9. Ivanov K. S. 1998, *Osnovnyye cherty geologicheskoy istorii (1,6–0,2 mlrd let) Urala* [Main features of the geological history (1.6–0.2 billion years) of the Urals], PhD thesis. Ekaterinburg, 253 p.
10. Sazonov V. N., Ogorodnikov V. N., Koroteyev V. A., Polenov Yu. A. 2001, *Mestorozhdeniya zolota Urala* [Gold deposits of the Urals]. Ekaterinburg, 622 p.
11. Kalinin A. S., Reverdatto V. V., Vasilieva E. N. 1977, *Model of deep plutonic metamorphism and anatexis. Doklady Akademii nauk* [Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences. Earth Science Sections], vol. 237, no. 5, P. 1167–1170. (In Russ.)
12. Ferstater G. B., Sherdakova G. Yu., Krasnobaev A. A. et al. 2007, *Rb–Sr i tsirkonovyy U–Pb vozrast Kamenskogo migmatit-plutona (Sredniy Ural)* [Rb–Sr and zircon U–Pb age of the Kamensky migmatite-pluton (Middle Urals)]. *Yearbook-2006*. Ekaterinburg, P. 200–206.
13. Ogorodnikov V. N. 2008, *Prostranstvennaya i geneticheskaya sopryazhennost' zolotorudnykh, redkometall'nykh i khrustalenykh kvartsevozhil'nykh obrazovaniy Urala* [Spatial and genetic conjugation of gold ore, rare metal and crystal-bearing quartz veinformations of the Urals]. *Ore genesis*. Miass, P. 212–219.
14. Kosals Ya. A. 1970, *Istochniki i sposoby obogashcheniya rudnym veshchestvom yuvenil'nykh rastvorov v protsesse formirovaniya redkometall'nykh mestorozhdeniy, svyazannykh s granitnymi intruziyami* [Sources and methods of ore enrichment of juvenile solutions in the formation of rare-metal deposits associated with granite intrusions]. *To the question of the source of matter of endogenous ore deposits*. Almaty, P. 105–115.
15. Barnham C. W. 1967, Hydrothermal fluids at the magmatic stage. *Geochemistry of hidrotermal ore deposits*. N. Y.: Holt, Rinehart, Winston, Inc., 670 p.
16. Munoz J. L., Eugster H. P. 1969, Experimental control of fluorine reaction in hydrothermal systems. *Amer. Mineral.*, vol. 54, no. 5/6, P. 943–959.
17. Ryabchikov I. D. 1975, *Termodinamika flyuidnoy fazy granitoidnykh magm* [Thermodynamics of the fluid phase of granitoid magmas]. Moscow, 230 p.
18. Keylman A. G., Boltyrov V. B., Buryan Yu. I., Gorozhankin V. T. 1973, *K voprosu o strukturnoy evolyutsii Kochkarskogo antiklinoriya* [On the structural evolution of the Kochkarsky anticlinorium]. *Geology of metamorphic complexes of the Urals: proceedings of the Sverdlovsk State Institute*, issue 91, P. 38–45.
19. Ogorodnikov V. N. 1993, *Zakonomernosti razmeshcheniya i usloviya obrazovaniya kvartsevo-zhil'nykh khrustalenykh i zolotorudnykh mestorozhdeniy Urala* [Patterns of placement and formation conditions of quartz-vein crystal-bearing and gold ore deposits of the Urals], PhD thesis, 367 p.

✉ polenov\_yu@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-8115-8034>

20. Starostin V. I. 1979, *Strukturno-petrofizicheskiy analiz endogennykh rudnykh poley* [Structural and petrophysical analysis of endogenous ore fields]. Moscow, 240 p.
21. Dudarev A. N. 1975, *Analiz geologo-fizicheskikh usloviy endogennogo rudoobrazovaniya* [Analysis of the geological and physical conditions of endogenous ore formation]. Novosibirsk, 197 p.
22. Rundkvist D. V., Denisenko V. K., Pavlova I. G. 1971, *Greyzenovyye mestorozhdeniya* [Greisen deposits]. Moscow, 328 p.
23. Letnikov F. A. 1992, *Sinenergetika geologicheskikh sistem* [Synergetics of geological systems]. Novosibirsk, 228 p.
24. Letnikov F. A. 2000, Interconnection of the processes of granitization, metamorphism and tectonics. *Geotektonika* [Geotectonics], P. 3–22. (In Russ.)
25. Eshkin V. Yu., Karyakina T. A., Bogdanova G. N. 1974, *Tipy kristallov kvartsa i zakonomernosti ikh prostranstvennogo razmeshcheniya na odnom iz khrustalenosnykh poley Urala* [Types of quartz crystals and patterns of their spatial distribution in one of the crystal-bearing fields of the Urals]. *Geology, prospecting and exploration of nonmetallic minerals*, issue 1, P. 71–78.

The article was received on May 20, 2019