

УДК 553.065+553.064/065

DOI: 10.24930/2500-302X-2026-26-1-170-188

## Геолого-генетическая модель Светлинского золототеллуридного месторождения (Южный Урал)

М. Е. Притчин, А. Ю. Кисин, В. В. Мурзин, Д. А. Озорнин

Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург,  
ул. Академика Вонсовского, 15, e-mail: pritchin@igg.uran.ru

Поступила в редакцию 18.12.2025 г., принята к печати 16.01.2026 г.

**Объект исследования.** Работа посвящена Светлинскому золототеллуридному месторождению, крупнейшему эксплуатируемому объекту по добыче золота на Южном Урале, которое локализовано в зоне Светлинского надвига в пределах Кочкарского антиклинория. **Цель работы.** Разработка новой геолого-генетической модели месторождения. **Методы исследования.** В основу работы легли результаты геолого-структурных наблюдений в карьере, геохимических и минералогических исследований, изотопного  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования калийсодержащих минералов. **Результаты.** Установлено, что формированию месторождения предшествовало возникновение в связи с началом уральской коллизии глубинного надвига ( $D_3$ ), дестабилизировавшего геологическую среду. Работа выполнялась тектонопарой “надвиг–продольный изгиб”, что привело к формированию антиклинория, разогреву пород в его ядре, пластичным и квазипластичным деформациям, росту купольных структур, зональному высокоградиентному метаморфизму, глубоким метасоматическим преобразованиям пород. На раннем этапе ( $C_1$ ) в лежачем боку надвига возник мелководный морской бассейн, где шло накопление терригенно-карбонатных отложений с многочисленными подводно-оползневыми явлениями. Морской бассейн закрылся в  $C_{IV}$  в связи с формированием антиклинория и поднятием территории. Ключевую роль в локализации рудного узла сыграл Светлинский купол, на западном склоне которого расположено месторождение. Рост купола привел к деформации и частичному разрушению зоны надвига, формированию систем тектонических срывов (взбросов), которые стали основными флюидоподводящими и рудовмещающими структурами. С куполообразованием, зональным метаморфизмом и гранитизацией связана мобилизация и перераспределение рудных компонентов (Au, Te). Основные рудообразующие процессы протекали на раннем постколлизийном этапе, в интервале 289–277 млн лет назад. **Выводы.** Структуроподготовительные и рудомобилизующие процессы при формировании Светлинского месторождения проходили на коллизийном этапе (380–290 млн лет назад), рудоотложение и формирование месторождения произошли в интервале 289–277 млн лет назад. Главную роль в формировании и локализации месторождения сыграл Светлинский купол, образование которого обусловлено возникновением глубинных надвигов в условиях позднепалеозойской коллизии. Данная модель объясняет золотоносность около- и межкупольных структур в Кочкарском антиклинории и показывает их первоочередность для постановки поисковых работ.

**Ключевые слова:** геология рудных месторождений, геолого-генетическая модель, антиклинорий, месторождения золота

### Источник финансирования

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИГТ УрО РАН, тема № 123011800011-2

## Geological-Genetic Model of Svetlinskoye Gold–Telluride Deposit (Southern Urals)

Mikhail E. Pritchinn, Alexander Yu. Kissin, Valery V. Murzin, Danil A. Ozornin

A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia,  
e-mail: pritchin@igg.uran.ru

Received 18.12.2025, accepted 16.01.2026

**Research subject.** The Svetlinskoye gold–telluride deposit, the largest operating deposit in the Southern Urals, localized within the Svetlinskoye thrust zone of the Kochkar Anticlinorium. **Aim.** To develop a new geological-genetic model of the deposit based on the results of long-term research at the Svetlinskoye open pit. **Materials and methods.** The results of geo-

**Для цитирования:** Притчин М.Е., Кисин А.Ю., Мурзин В.В., Озорнин Д.А. (2026) Геолого-генетическая модель Светлинского золототеллуридного месторождения (Южный Урал). *Литосфера*, 26(1), 170–188. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-1-170-188>. EDN: LIWISB

**For citation:** Pritchinn M.E., Kissin A.Yu., Murzin V.V., Ozornin D.A. (2026) Geological-Genetic Model of Svetlinskoye Gold–Telluride Deposit (Southern Urals). *Lithosphere (Russia)*, 26(1), 170–188. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2026-26-1-170-188>. EDN: LIWISB

© М.Е. Притчин, А.Ю. Кисин, В.В. Мурзин, Д.А. Озорнин, 2026

logical and structural observations in the open pit, geochemical and mineralogical research,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  isotopic dating of potassium-bearing minerals were analyzed. A review of literature sources was conducted. *Results.* The formation of the deposit was preceded by the emergence of a deep thrust ( $D_3$ ) related to the onset of the Uralian collision, which destabilized the geological environment. The tectonic couple "thrust–buckling" was in operation, leading to the formation of the Anticlinorium, heating of rocks in its core, plastic and quasi-plastic deformations, growth of dome structures, zonal high-gradient metamorphism, and deep metasomatic alterations of rocks. At early stages, a shallow marine basin emerged in the footwall of the thrust, accumulating terrigenous-carbonate sediments with numerous submarine landslide phenomena. The marine basin closed in the  $C_{IV}$ , due to the formation of the Anticlinorium and uplift of the territory. The Svetlinsky dome, on whose western slope the deposit is located, played a key role in the localization and transformation of the ore cluster. The growth of the dome led to the deformation and partial destruction of the thrust zone, forming systems of tectonic detachments (thrusts), which became the main fluid-conducting and ore-hosting structures. Dome formation, zonal metamorphism, and granitization were associated with the mobilization and redistribution of ore components (Au, Te). The main ore-forming processes occurred at the early post-collisional stage, in the interval of 289–277 Ma. *Conclusions.* The structural preparation and ore-mobilizing processes during the formation of the Svetlinskoye deposit took place at the collisional stage (380–290 Ma), while ore deposition and deposit formation occurred in the interval of 289–277 Ma. The Svetlinsky dome played the main role in the formation and localization of the deposit; its formation was likely related to the emergence of deep thrusts under the conditions of the Late Paleozoic collision. This model provides a satisfactory explanation for the gold mineralization of peri- and inter-dome structures in the Kochkar Anticlinorium, thus indicating their priority for prospecting.

**Keywords:** economic geology, geological-genetic model, anticlinorium, gold deposits

#### Funding information

The research was carried out within the framework of the State Assignment of the IGG UB RAS, project No. 123011800011-2

## ВВЕДЕНИЕ

Светлинское золототеллуридное месторождение в настоящее время является наиболее крупным из эксплуатируемых золоторудных объектов на Южном Урале, находится в 90 км к югу от г. Челябинск. Оно отличается весьма большими разведанными запасами (около 72 т), доступными для отработки открытым способом. В настоящее время глубина Светлинского карьера достигла 260 м.

Сведения о геологии месторождения и представления о его генезисе, основанные на данных геологоразведочных работ (с большим объемом бурения), опубликованы в коллективной монографии известного специалиста по геологии золоторудных месторождений В.Н. Сазонова (Сазонов и др., 1989). Согласно этим представлениям, месторождение полихронное и полигенное, приурочено к зоне глубинного надвига западного падения и сформировано в пять этапов (из них три рудообразующие):

1) дорудный ( $O-D_1$ ) – формирование терригенно-вулканогенной толщи с сингенетичным слабозолотоносным пиритом;

2) первый рудный ( $D_{1-2}$ ) – слабозолотоносная пиритовая минерализация, связанная с концентрацией золота при формировании крупной синклинальной структуры и регионального зеленокамен-

ного метаморфизма (кварцево-серицитовые, кварцево-серицит-хлоритовые породы с пиритом);

3) второй рудный ( $D_3-C_1$ ) – формирование золотоносных кварцевых жил с ореолами березитизации и лиственитизации, генетически связанных с постмагматическими гидротермальными процессами, вызванными становлением гранитоидов тоналит-гранодиоритовой формации;

4) третий (основной) рудный ( $C_{1-3}$ ) – тектоническая активизация с приразломным метаморфизмом вмещающих пород и ранее сформированных руд в условиях амфиболитовой фации, формирование новых рудных минеральных ассоциаций с теллуридами и золотом, связанных с мантийным флюидом, обогащенным теллуrom;

5) пострудный, экзогенный ( $Mz-Kz$ ) – дезинтеграция рудоносных зон, высвобождение золота из сульфидов и теллуридов и накопление золотоносных продуктов выветривания; выделено две стадии:  $Mz$  – карстование и формирование кор выветривания каолин-гидрослюдистого профиля,  $Kz$  – образование кор выветривания гидрослюдистого профиля.

Иначе говоря, выделен этап накопления слабозолотоносной терригенно-вулканогенной толщи, затем этап мобилизации и перераспределения рудного вещества в связи со становлением гранитоидов тоналит-гранодиоритовой формации; да-

лее следует формирование надвига и этап формирования новых рудных минеральных ассоциаций с теллуридами и золотом, связанных с поступлением мантийных рудоносных флюидов по зоне надвига. Исходя из этих представлений, можно считать, что зоны граничных надвигов антиклинория представляют интерес для постановки поисковых работ на золототеллуридные месторождения.

Авторами с 2009 г. проводится ежегодный мониторинг Светлинского карьера и изучение геологии месторождения непосредственно в обнажениях. Это позволило получить новый фактический материал и внести существенные коррективы в геолого-генетическую модель. Результаты исследований опубликованы в нескольких статьях (Кисин, Притчин, 2015; Кисин и др., 2017, 2018, 2022; Vikent'eva, Vortnikov, 2015; Vikent'eva et al., 2020; Притчин и др., 2024, 2025) и монографии (Кисин, Коротеев, 2017). Окончательное оформление модели произошло после открытия подводно-оползневых структур в терригенно-карбонатных отложениях в лежащем боку надвига (Притчин и др., 2025), ставших новым важным аргументом.

## ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ГЕОЛОГИИ РАЙОНА И МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Месторождение расположено в зоне субмеридиального глубинного надвига западного падения, разделяющего Заураловский синклиниорий на западе и Кочкарский антиклинорий на востоке (рис. 1). Синклиниорий характеризуется вулканогенно-осадочным типом разреза ( $S_1-D_2$ ), зеленосланцевым региональным метаморфизмом, линейным типом складчатости. Антиклинорий ограничен надвигами противоположного падения и характеризуется купольным тектоногенезом: гранитогнейсовые купола с метаморфическим обрамлением. Метаморфизм зональный: в ядрах куполов достигает условий амфиболитовой фации, а в обрамлении – эпидот-амфиболитовой и на удалении – верхов зеленосланцевой фации (Болтыров и др., 1973). Метаморфические породы представлены кристаллическими сланцами переменного состава (кварц, плагиоклаз, биотит, амфибол, ставролит, гранат, силлиманит-фибrolит, дистен, редко андалузит), амфиболитами и мраморами, вблизи границ антиклинория – мраморизованными органогенными известняками. Возраст пород обрамления куполов дискусионен; возраст известняков –  $C_1$  (по фаунистическим остаткам). Границы куполов тектонические типа зон тектонических срывов, увеличивающих углы падения с глубиной. Породы межкупольных и околокупольных депрессий кливажированы, вплоть до интенсивного рассланцевания, образуют веер, раскрытый кверху. Магматические тела представлены Коелгинским массивом гранодиоритов и Пластовским массивом плагиограни-

тов ( $D_3-C_1$ ). В куполах и в межкупольных депрессиях распространены анатектические граниты и редкометалльные пегматиты, иногда миароловые с морионом, бериллом, топазом и турмалином ( $P_{1,2}$ ). На площади антиклинория разрабатываются крупные коренные Кочкарское и Светлинское месторождения золота, известны мелкие месторождения и рудопроявления золота, свинца, вольфрама, урана, горного хрусталя и пьезокварца, драгоценных и полудрагоценных камней (топаз, берилл, турмалин, хризоберилл, рубин, благородная шпинель). В межкупольных и околокупольных структурах распространены россыпи золота, в основном отработанные в XIX–XX вв.

Золоторудная минерализация на месторождении представлена прожилково-вкрапленным и жильным типами. Оруденение на месторождении представлено девятью рудоносными зонами, выделяемыми по данным опробования. Зоны субпластовые и линзовидные, протяженностью 300–700 м при крайне невыдержанной мощности – 1–80 м, при общей мощности 100–300 м; бурением прослежены до глубины 700 м. Ныне, при бортовом содержании Au 0.2 г/т, они объединены в одну крупную рудную залежь. Предполагалось, что рудные тела контролируются субмеридиональным глубинным надвигом и, в меньшей степени, разломом северо-западного простирания (Сазонов и др., 1989; Огородников и др., 2004). Отмечен и литологический контроль. Золоторудная минерализация представлена прожилково-вкрапленным и жильным типами.

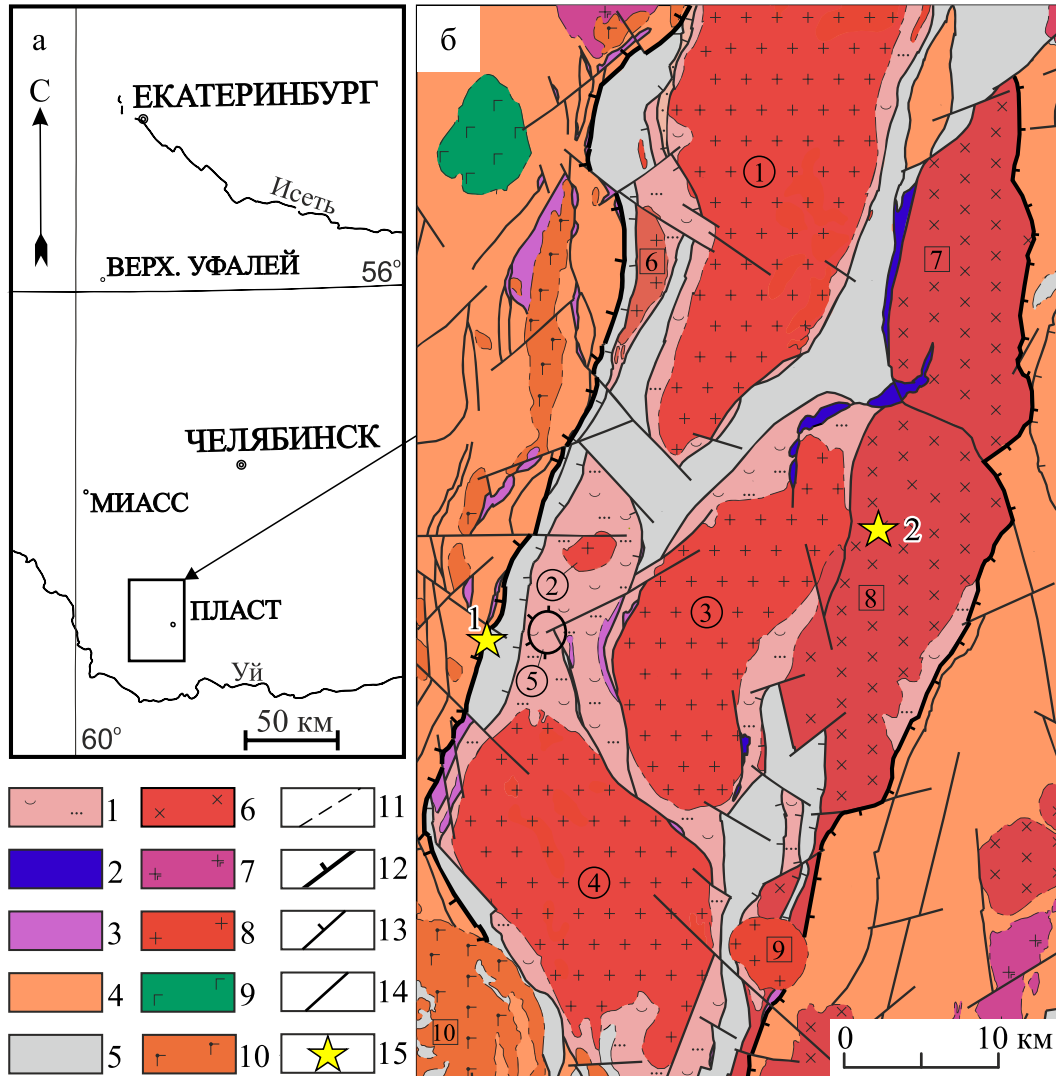
## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалы для построения геолого-генетической модели Светлинского золототеллуридного месторождения собраны при ежегодном мониторинге карьера и его окрестностей, осмотре и геологической документации обнажений, рудоносных метасоматитов, кварцевых жил с отбором образцов и проб для лабораторных петрографических и минералогических исследований. Особое внимание уделялось изучению контактов терригенно-карбонатной толщи лежащего бока надвига с вулканогенно-осадочной толщей его висячего бока, кинематике тектонических движений, последовательности гидротермально-метасоматических преобразований и гидротермального минералообразования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

### Подводно-оползневые текстуры

Подводно-оползневые текстуры обнаружены в мраморизованных известняках и доломитах в узкой полосе меридионального простирания прак-



**Рис. 1.** Географическая позиция (а) и схематическая геологическая карта Кочкарского антиклинария (б) по материалам (Пужаков и др., 2018), с упрощениями и дополнениями.

1 – плагиогнейсы биотитовые, гранат-биотитовые, амфиболиты, кристаллосланцы с гранатом, ставролитом, силлиманитом и кианитом ( $V_1$ ); 2 – ультраметаморфиты апогартсбургитовые аподунитовые нерасчлененные ( $V_2$ ); 3 – серпентиниты ( $O_2$ ); 4 – нерасчлененные вулканогенные, вулканогенно-осадочные комплексы, углеродисто-кремнистые сланцы ( $O_3$ - $D_3$ ); 5 – мраморизованные известняки, мраморы ( $C_{IV}$ ); 6 – тоналиты гнейсовидные, гранодиориты, плагиограниты ( $D_3$ - $C_1$ ); 7 – плагиограниты ( $C_1$ ); 8 – граниты биотитовые, мезократовые и лейкократовые, гнейсограниты ( $C_{1,2}$ ); 9 – габбро, габбро-нориты ( $C_1$ ); 10 – монзогаббро, граносиениты, граниты ( $P_1$ ); 11 – геологические границы; 12–14 – тектонические нарушения: 12 – глубокие надвиги, 13 – сбросы (тектонические срывы), 14 – прочие разломы; 15 – месторождения золота (1 – Светлинское, 2 – Кочкарское). Цифры в кругах – гранито-гнейсовые купола: 1 – Варламовский, 2 – Еремкинский, 3 – Борисовский, 4 – Санарский, 5 – Светлинская купольная структура. Цифры в квадратах – интрузивные массивы: 6 – Котликский, 7 – Коелгинский, 8 – Пластовский, 9 – Каменно-Санарский, 10 – Степнинский.

**Fig. 1.** Geographical position (a) and schematic geological map of the Kochkarsk Anticlinorium (b) based on materials by (Puzhakov et al., 2018), with simplifications and additions.

1 – biotite plagiogneisses, garnet biotite gneisses, amphibolites, crystalline schists with garnet, staurolite, sillimanite and kyanite ( $V_1$ ); 2 – ultrametamorphites apogartsburgite apodunite undivided ( $V_2$ ); 3 – serpentinites ( $O_2$ ); 4 – undivided volcanogenic, volcanogenic-sedimentary complexes, carbonaceous-siliceous shales ( $O_3$ - $D_3$ ); 5 – marbled limestones, marbles ( $C_{IV}$ ); 6 – gneiss-like tonalites, granodiorites, plagiogranites ( $D_3$ - $C_1$ ); 7 – plagiogranites ( $C_1$ ); 8 – biotite, mesocrate and leucocrate granites, gneissogranites ( $C_{1,2}$ ); 9 – gabbro, gabbronorites ( $C_1$ ); 10 – monzogabbro, granosienites, granites ( $P_1$ ); 11 – geological boundaries; 12–14 – tectonic faults: 12 – deep thrusts, 13 – throws (tectonic detachments), 14 – other faults; 15 – gold deposits (1 – Svetlinskoye, 2 – Kochkarskoye). The numbers in the circles are granite-gneiss domes: 1 – Varlamovsky, 2 – Eremkinsky, 3 – Borisovsky, 4 – Sanarsky, 5 – Svetlinskaya dome structure. The numbers in squares are intrusive arrays: 6 – Kotliksky, 7 – Koelginsky, 8 – Plastovsky, 9 – Kamenno-Sanarsky, 10 – Stepninsky.

тически на всем протяжении восточного борта карьера (Притчин и др., 2025). Оползневые текстуры в мраморе представлены: оползнями со щелевидными и округлыми полостями, обусловленными обособлением газовой фазы в неконсолидированном карбонатном осадке, испытавшем гравитационное течение (рис. 2а); мрамором с фрагментами слойков и линз кварцитопесчаника толщиной до 0.5–3 см, хаотично закрученных, смятых, быстро меняющих мощность (рис. 2б), простирание и падение крутое по аз. 260°, под углом 60–80°. Также оползневые текстуры в кальцитовом крупнозернистом кальцитовом мраморе представлены роллами (рис. 2в), а на более глубоких горизонтах (до глубины около 100 м) встречаются темные кальцитовые мраморы с конволютной слоистостью слойков кварцитопесчаника мощностью первые см (рис. 2г).

Терригенно-карбонатные породы находятся в лежачем боку глубинного надвига западного падения, фаунистически охарактеризованы и отнесены к  $S_1v$ . Падение оползневых структур также в западных румбах, но более крутое – до 70–80°. Подобные структуры выявлены и на восточном краю Кочкарского антиклинория, в лежачем боку надвига восточного падения.

Спусковым механизмом оползней здесь, с высокой степенью вероятности, являются сейсмические события. Разжижение и псевдооживление осадков возникают при землетрясениях магнитудой от 5 баллов (Carter, Seed, 1988). По мнению авторов, для неконсолидированного водонасыщенного осадка при изменении угла наклона дна бассейна только на первые градусы даже слабого землетрясения (2–3 балла) будет достаточно для формирования оползня. Наблюдаемые в Светлинском карьере крутые углы падения оползневых текстур можно объяснить как многократным изменением уклона дна морского бассейна и, соответственно, залегания литифицированных осадков, вызванной активностью надвига, так и деформациями карбонатной толщи при формировании надвига.

### Кварцевые жилы и околожилные рудоносные метасоматиты

В карьере отмечены три системы кварцевых жил (Кисин, Притчин, 2015): 1) субмеридиональная, крутопадающая на запад, 2) субширотная, крутопадающая на север и 3) субмеридиональная, пологопадающая на запад. Рудная зона сопровождается жилы 1-го типа (рис. 3) и представлена пирит-кварц-биотитовыми метасоматитами, детально описанными ранее (Сазнов и др., 1989), наложенными на вулканогенно-осадочные породы. В карьере рудные метасоматиты представлены сильно тектонизированными, вплоть до образования сланцев/милонитов, породами. Аз. прост. сланцеватости 170–180°, западного падения на верхних

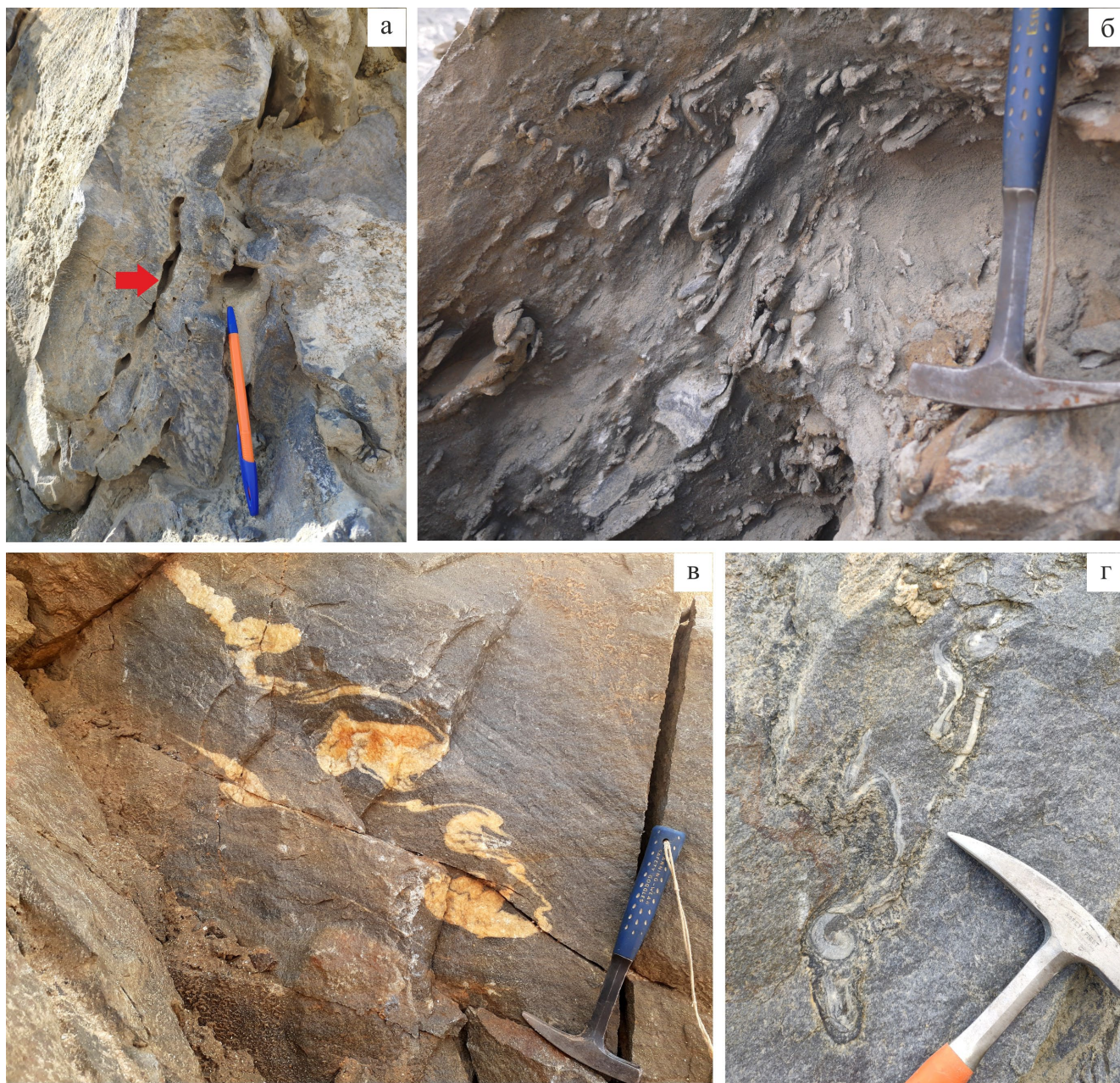
горизонтах от 0 до 62–65°, на глубине – 80–85°. Таким образом, с глубиной наблюдается постепенное увеличение углов падения рудных метасоматитов. Границы рудной зоны выделены по результатам опробования. В ее центральной части залегает свита сильно сближенных, вплоть до совмещения контактов, субмеридиональных кварцевых жил мощностью до 1015 см, перемежаемых со вторичными кварцитами и осветленными вмещающими породами, напоминающими сильно выветрелый березит (см. рис. 3). Суммарная мощность зоны окварцевания составляет от 0.5–1.0 до 20 м. Жильный кварц и рудные метасоматиты подверглись сильному катаклазу. Ориентировка трещин скалывания указывает на правый сдвиг и почти вертикальный взброс восточного борта (или сброс западного).

Рудная зона пересекается системой субширотных субпараллельных линзовидных жил кварца: аз. прост. 270–280°, угол пад. около 70° на север; средняя мощность 1–15 см, протяженность по падению метры и первые десятки метров, интервал между жилами от 0.15–0.20 до 1 м, редко более. К участкам выклинивания рудной зоны количество и размеры жил быстро уменьшаются. По отчетливо выраженной линзовидной форме жил, кулисообразному залеганию, расщеплениям и трещинам предполагается, что кварц здесь выполнял трещины растяжения, вероятно, со взбросовой составляющей (малоамплитудный взброс северного борта) (рис. 4). Субширотные линзовидные жилы кварца секут свиту субмеридиональных жил кварца и вторичных кварцитов рудной зоны (рис. 5), но также подверглись сдвиговым деформациям и пересекаются трещинами с взбросовой кинематикой.

Жилы 3-го типа имеют линзовидную форму, длину до 1–2 м при мощности до 2–3 см; встречаются редко и недостаточно изучены.

### Карбонатные породы

В пределах месторождения висячий бок глубинного надвига сложен вулканогенно-осадочной толщей ( $S_1-D_2$ ), а лежачий бок – терригенно-карбонатными отложениями ( $C_1$ ). Терригенно-карбонатный разрез представлен (Кисин и др., 2022): 1) темно-серыми мелкозернистыми графитсодержащими мраморами с плохо сохранившимися фаунистическими остатками (рис. 6а) и единичными не выдержанными по простиранию и мощности слойками и линзами кварцитопесчаника (см. рис. 2б), 2) мелкозернистыми охряно-желтыми доломитами с макрофауной раннекаменноугольного возраста хорошей сохранности (рис. 6б), 3) мелкозернистыми, массивными, белыми или светло-желтыми доломитовыми мраморами, сменяющимися с глубиной доломиты с фаунистическими остатками, 4) Mg-кальцитовым крупнозернистым и 5) кальцитовым среднезернистым мраморами. Карбонатная толща кли-



**Рис. 2.** Подводно-оползневые структуры в терригенно-карбонатных отложениях Светлинского золоторудного карьера.

а – запрокинутая часть оползня со щелевидными полостями обособлений газовой фазы (красная стрелка) в мелкозернистом мраморе (восточный борт, верхний уступ); б – обрывки слоев и линзочки кварцитопесчаника в мраморе (северо-восточный борт, верхний уступ); в – кальцитовый мрамор дезинтегрированный (на 40 м ниже обнажения, показанного на фрагменте “а”); г – конволютная слоистость кварцитопесчаника в мраморе. Длина ручки 15 см, длина молотка 28 см.

**Fig. 2.** Underwater landslide structures in terrigenous-carbonate deposits of the Svetlinsky gold mine.

a – the inverted part of the landslide with slit-like cavities of gas phase separations (red arrow) in fine-grained marble (eastern side, upper ledge); б – fragments of layers and lenses of quartzitic sandstone in marble northeastern wall, upper bench); в – calcite marble disintegrated (40 m below the outcrop shown in figure a); г – convolute bedding of quartzitic sandstone in marble. Handle length 15 cm, hammer length 28 cm.

важирована, простирание кливажа субмеридиональное, падение на запад под углом 40–80°. Сум-

марная мощность более 800 м. Восточный контакт мраморов тектонический, западного падения.



**Рис. 3.** Субмеридиональная зона окварцевания (красный контур) субвертикального залегания в рудоносных метасоматитах, южный борт Светлинского карьера, глубина 230 м. Вид на юг.

**Fig. 3.** Submeridional quartzification zone (red outline) of subvertical occurrence in orebearing metasomatites, southern wall of the Svetlinsky openpit mine, depth 230 m. View to the south.



**Рис. 4.** Кинематика тектонических движений при формировании субширотных кварцевых жил. Западный борт карьера. Глубина 250 м. Длина молотка 28 см.

**Fig. 4.** Kinematics of tectonic movements during the formation of sublatitudinal quartz veins. Western wall of the openpit mine. Depth 230 m. Hammer length: 28 cm.

Мелкозернистые темно-серые мраморы наблюдаются локально на верхних горизонтах в СВ ча-

сти карьера. Наличие фаунистических остатков и слоев песчаника указывает на вероятное накопление отложений в прибрежных мелководных морских условиях. Доломитовые мраморы (3) с фаунистическими остатками находятся в той же позиции, но локализованы только в ЮВ части карьера. Непосредственный контакт доломита с известняками резкий. Торцовое причленение доломитов к известнякам и хорошая сохранность фаунистических остатков свидетельствуют о дометаморфическом Mg-метасоматозе.

Mg-кальцитовый мрамор (4) распределен в разрезе неравномерно, без определенных границ, преобладает в ЮВ части карьера. Это массивная порода белого или бледно-голубого цвета. При раскалывании издает запах сероводорода. Часто наблюдаются реликты доломитового мрамора с неотчетливыми границами либо участки раздоломичивания непосредственно в массивном доломите (рис. 7). В доломите обычны субпараллельные щелевидные полости, инкрустированные кристалликами кальцита. Трещины в доломите не прослеживаются в Mg-кальцитовом мраморе. Последний часто минерализован и содержит мелкоукрапленность пирита, пирротина, бесцветного флюопита, мусковита (в том числе фуксита), F-апатита, самородной серы, лилового ангидрита, флюорита, желтовато-зеленого сфалерита, хромпаргасита; в минерализованных трещинах отмечены розовый то-



**Рис. 5.** Взаимоотношения вторичного кварцита (1), кварца субмеридиональных (2) и субширотных жил (3). Длина рабочей части молотка 14 см.

**Fig. 5.** The relationship of secondary quartzite (1), quartz of the submeridional (2) and sublatitudinal veins (3). The length of the working part of the hammer is 14 cm.

паз и эвклаз в ассоциации с пиритом, пирротинном, кварцем, бесцветным флогопитом, фукситом, F-апатитом, баритом и рутилом; в миаролах отме-

чены горный хрусталь, доломит, флюорит, розовый топаз и самородная сера. Образование Mg-кальцитового мрамора можно объяснить дедоломитизацией доломитов под воздействием флюидов, вероятнее всего, метаморфогенных.

Кальцитовый мрамор (5) – это светлая, массивная, часто кливажированная порода, состоящая из полиэдров кальцита, вследствие чего легко разрушается до дресвянистого состояния; наиболее распространен в СВ части карьера. Наблюдаются все промежуточные различия между мелкозернистым графитсодержащим мрамором и кальцитовым мрамором. Кальцит в шлифах, как правило, не показывает признаков деформации. Аналогичный мрамор на Кучинском проявлении рубина (Кисин, 1991) отнесен к рекристаллизованному, образованному в результате пластических деформаций при стрессовых напряжениях. В качестве акцессорной минерализации отмечены редкие кристаллики флогопита и пирита.

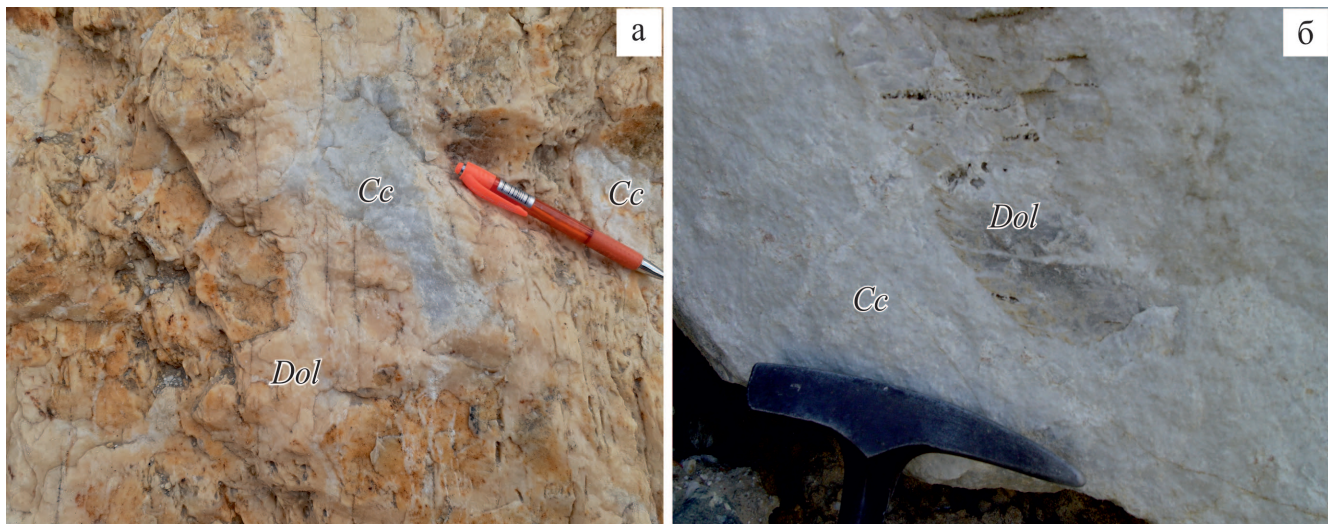
#### <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar изотопное датирование K-содержащих минералов Светлинского месторождения

В целях оценки времени формирования Светлинского месторождения методом <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar изотопного датирования K-содержащих минералов подобраны пробы минералов с учетом их образования относительно друг друга и относительно основных тектонических процессов: стрессовых напряжений коллизионного этапа и постколлизивной релаксации. Первые – сильно деформированные, вторые – без признаков деформации.



**Рис. 6.** Перекристаллизованные членики криноидей в кальцитовом мраморе (а) и кораллы в доломитовом мраморе (б).

**Fig. 6.** Recrystallized crinoid stems in calcite marble (a) and corals in dolomitic marble (b).



**Рис. 7.** Дедоломитизация метасоматического дометаморфического доломита (а) с образованием Mg-кальцитового мрамора; реликты доломитового мрамора в Mg-кальцитовом мраморе (б).

Обращают на себя внимание многочисленные трещины в доломите и их отсутствие в Mg-кальцитовом мраморе. Cc – кальцитовый мрамор, Dol – доломитовый мрамор.

**Fig. 7.** Demetallization of metasomatic pre metamorphic dolomite (a) with the formation of Mg calcite marble; relicts of dolomitic marble within Mg calcite marble (б).

Note the numerous fractures in the dolomite and their absence in the Mg calcite marble. Cc – calcite marble, Dol – dolomite marble.

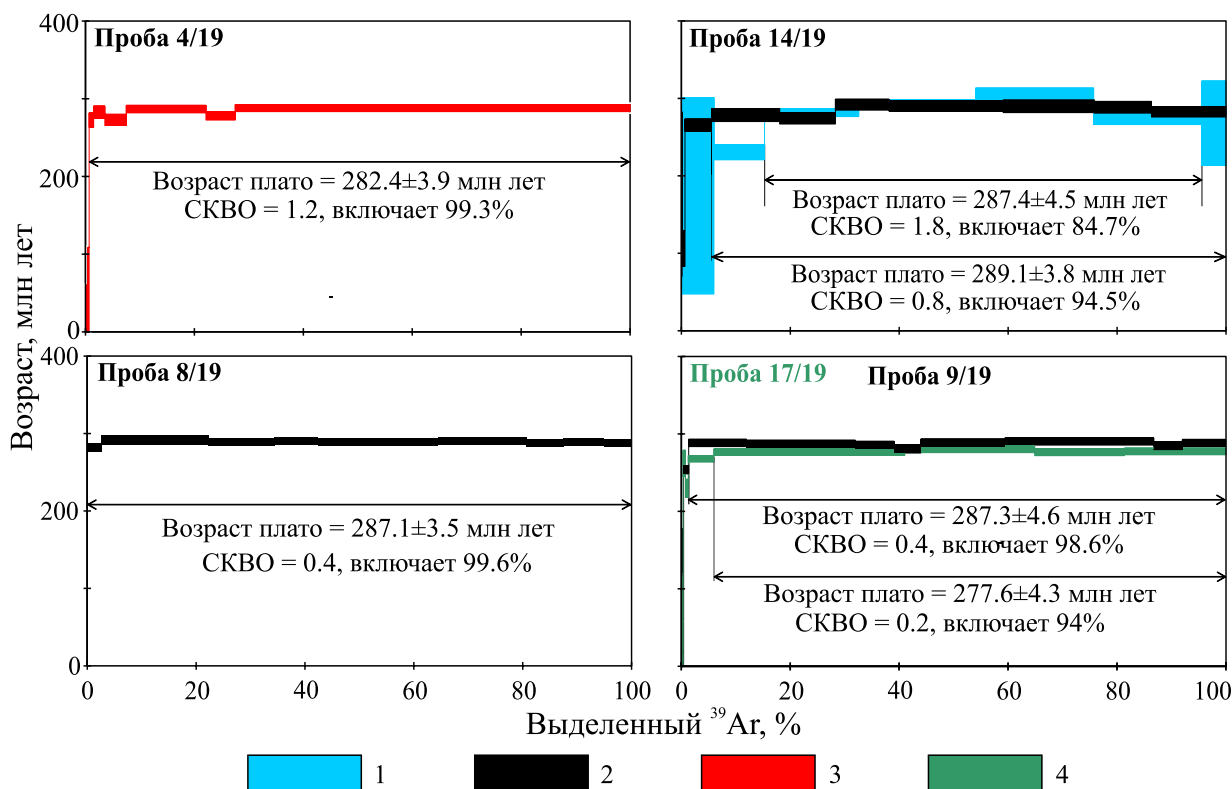
Список проб включал: 1) флогопит из мрамора (обр. 4/19): бесцветные, прозрачные, хорошо ограниченные, недеформированные кристаллы размером до 2 мм; 2) биотит из зальбанда субширотной кварцевой жилы в рудной зоне (обр. 8/19) – крупночешуйчатые сростки размером до 5 мм в жильном кварце; 3) биотит из рудоносного пирит-кварц-плагиоклаз-биотитового метасоматита (обр. 9/19) – сростки крупночешуйчатого биотита до 8 мм по наибольшему измерению; 4) биотит и актинолит (обр. 14/19) из биотит-актинолит-кальцитовой жилы в серпентините – биотит-чешуйки до 4 мм в поперечнике, актинолит-сноповидные сростки и игольчатые кристаллы длиной до 3 мм; 5) фуксит из каверн в Mg-кальцитовом мраморе вблизи контакта с золотоносными метасоматитами (обр. 17/19) – кристаллы свободного роста, поперечником до 2 мм, на стенках каверн. Результаты анализов приведены на рис. 8.

По результатам изотопного  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования K-содержащих минералов метасоматитов кварцевых жил и мраморов рудоотложение на Светлинском месторождении пришлось на ранний постколлизийный этап (289–277 млн лет назад), отвечающий режиму тектонической релаксации (Притчин и др., 2024).

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Кочкарский антиклинорий является составной частью Главного гранитного пояса Урала (Кейльман, 1974) протяженностью более 800 км, что указывает на его принадлежность к уральским структурам, сформированным в результате позднепалеозойской коллизии. Начало коллизии фиксируется образованием глубинных надвигов. К ним относятся и Светлинский надвиг, заложенный в позднедевоне (Кейльман и др., 1973; Пужаков и др., 2018). Можно предположить, что состав и строение земной коры на момент заложения надвига были одинаковыми по обе его стороны. Кора в разрезе условно состояла из трех частей: вулканогенно-осадочной толщи (верхняя часть), условных “гранитных” (средняя часть) и “основных-ультраосновных” (серпентинитовых) (нижняя часть) слоев (Резанов, 1991). Земная кора, как и литосфера в целом, реологически и тектонически расслоена и способна к горизонтальному проскальзыванию по различным тектоническим поверхностям (Тектоническая расслоенность ..., 1980, 1982, 1990; Леонов, 1993). Среднее содержание золота в верхней части континентальной коры  $4.36 \cdot 10^{-7} \%$  (Григорьев, 2009).

Заложение глубинного надвига немедленно включает в работу тектонопару “надвиг–продоль-



**Рис. 8.** Возрастные  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  спектры для К-содержащих минералов Светлинского месторождения золота (Притчин и др., 2024). Анализы выполнены в Институте геологии и минералогии СО РАН. Аналитик А.В. Травин.

1 – актинолит, 2 – биотит, 3 – флогопит, 4 – фуксит.

**Fig. 8.**  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age spectra for K-bearing minerals from the Svetlinsky gold deposit (Pritchichin et al., 2024). Analyses were performed at the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS by A.V. Travin.

1 – actinolite, 2 – biotite, 3 – phlogopite, 4 – fuchsite.

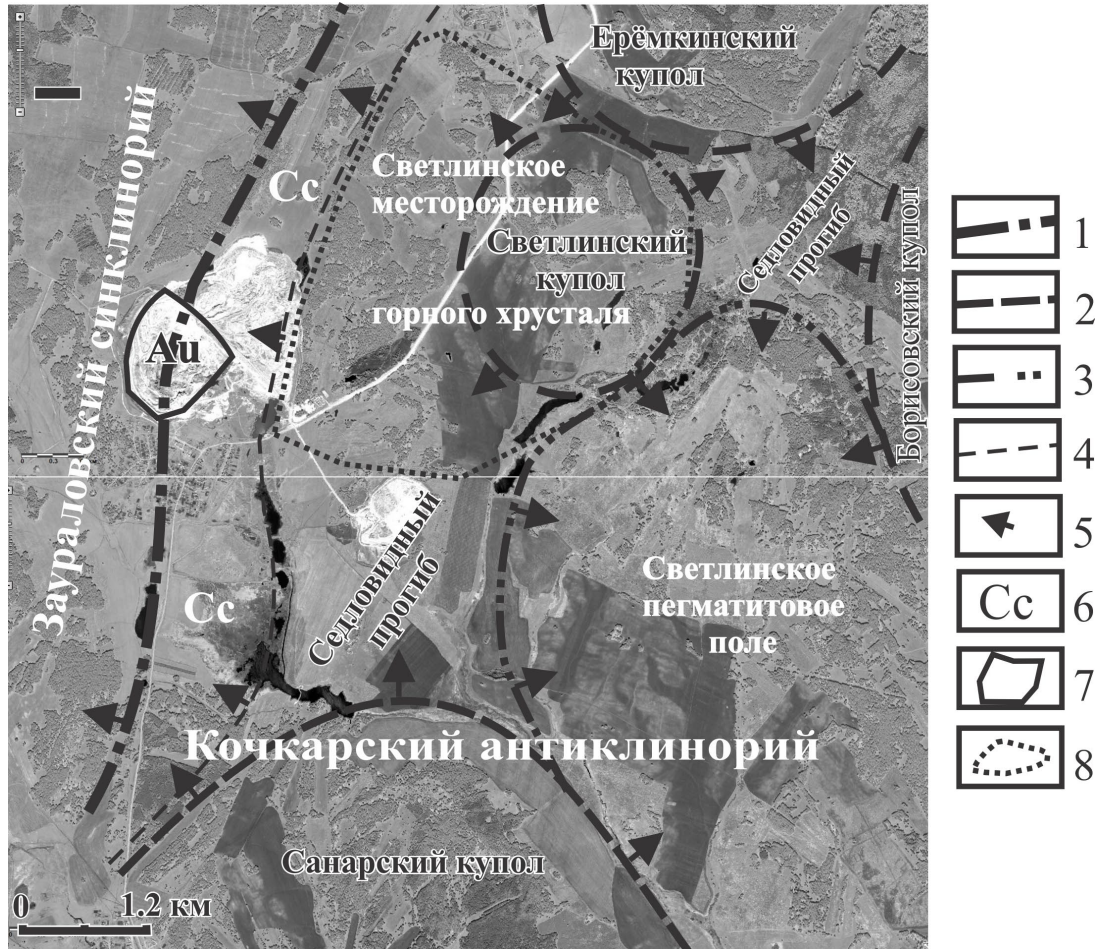
ный изгиб” (Кисин, Коротеев, 2017). Благодаря изгибающим моментам и нарастающей вертикальной нагрузке земная кора в нарастающей вертикальной нагрузке опускается с образованием мелководного морского бассейна ( $C_1$ ), быстро заполняемого терригенно-карбонатными отложениями. На активном этапе развития надвига опускание его лежачего бока продолжается, дно морского бассейна непрерывно меняет наклон, а осадки погружаются на глубину и подвергаются литогенезу. Вследствие изменения наклона дна, неравномерного осадконакопления и высокой сейсмической активности в слабоконсолидированных осадках возникают многочисленные подводные оползни (Притчин и др., 2025).

Примечательно, что на востоке границей антиклинория также является глубинный надвиг, но уже восточного падения (см. рис. 1), и тоже имеется терригенно-карбонатная толща с фаунистическими остатками визейского возраста и с подводно-оползновыми текстурами (Притчин и др., 2025),

что подтверждает работу тектонопары. Карбонатный разрез здесь включает дометаморфические метасоматические доломиты (с остатками макрофауны), кальцитовые и Mg-кальцитовые мраморы (Кисин, 2007). Иначе говоря, терригенно-карбонатная толща  $C_1$  возраста с оползновыми текстурами осадка – это типичная ситуация для краевых участков Кочкарского антиклинория.

Таким образом, по мнению авторов, начало формированию Светлинского месторождения золота положило возникновение в связи с началом уральской коллизии глубинного надвига, дестабилизировавшего геологическую среду. Работа выполнялась тектонопарой “надвиг–продольный изгиб”, перераспределявшей тектоническую энергию сжатия и приводящей к глубоким структурно-вещественным преобразованиям земной коры.

В карьере Светлинского месторождения мрамор с фаунистическими остатками с глубиной и вкрест простирается на восток, к ядру антиклинория



**Рис. 9.** Дешифрирование космоснимка окрестностей Светлинского месторождения золота.

1 – Светлинский надвиг, 2 – границы купольных структур, 3 – тектоническая граница межкупольной депрессии, 4 – тектоническая граница лежащего бока терригенно-карбонатной толщи, 5 – направление падения, 6 – терригенно-карбонатная толща, 7 – контур карьера Светлинского месторождения золота, 8 – граница Светлинского месторождения горного хрусталя и пьезокварца.

**Fig. 9.** Interpretation of a satellite image of the area surrounding the Svetlinsky gold deposit.

1 – Svetlinsky thrust fault, 2 – boundaries of dome structures, 3 – tectonic boundary of the interdomal depression, 4 – tectonic boundary of the footwall of the terrigenous-carbonate sequence, 5 – dip direction, 6 – terrigenous-carbonate sequence, 7 – outline of the Svetlinsky gold deposit openpit mine, 8 – boundary of the Svetlinsky deposit of rock crystal and piezoelectric quartz.

рия, быстро сменяются кальцитовым мрамором в интервале 10–20 м. Такая высокая интенсивность мраморизации требует дополнительного источника тепла. Этим источником не может быть фрикционное тепло зоны надвига, поскольку мраморизация нарастает вкост простираения толщи, по мере удаления от надвига. Иначе говоря, источник тепла находился восточнее. В Кочкарском антиклинории метаморфизм зональный, нарастающий к гранитогнейсовым куполам (Болтыров и др., 1973). Ближайшим к месторождению куполом является Светлинский, выделенный одним из авторов по результатам дешифрирования аэрофото-

снимков, данных бурения, геофизических исследований, диафтореза и металлогении (Кисин, 1989). В апикальной части купола кристаллические сланцы содержат силлиманит и ставролит, но испытали сильный диафторез (альбитизацию, микроклиннизацию, хлоритизацию); к апикальной его части и западному склону приурочено крупное Светлинское месторождение горного хрусталя и пьезокварца (рис. 9). Жилы с горным хрусталем распространены до мраморов, а Mz-Kz ложковые отложения золотоносны. Таким образом, источником тепловой энергии для метаморфизма мраморов может выступать Светлинский купол.

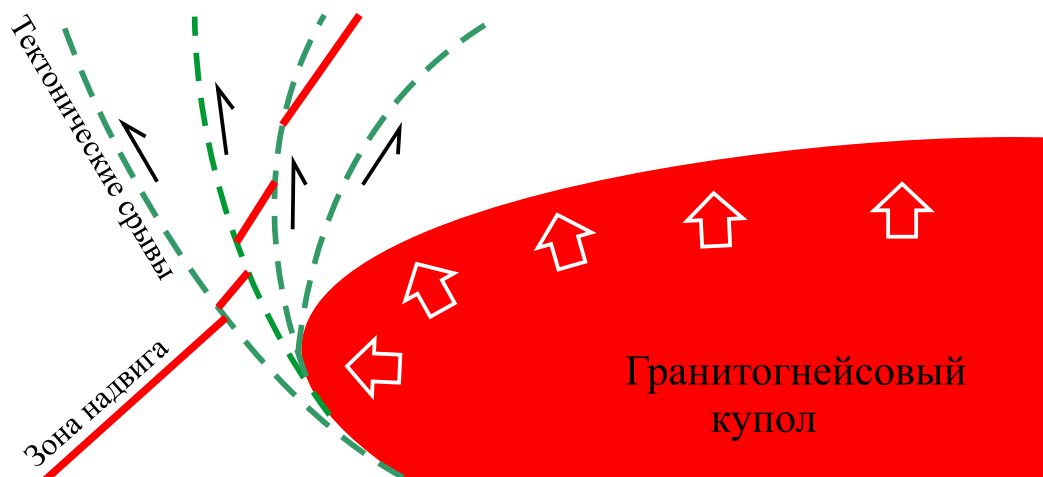


Рис. 10. Деформация отмирающей зоны надвига растущим гранитогнейсовым куполом.

Fig. 10. Deformation of a waning thrust zone by a growing granitogneiss dome.

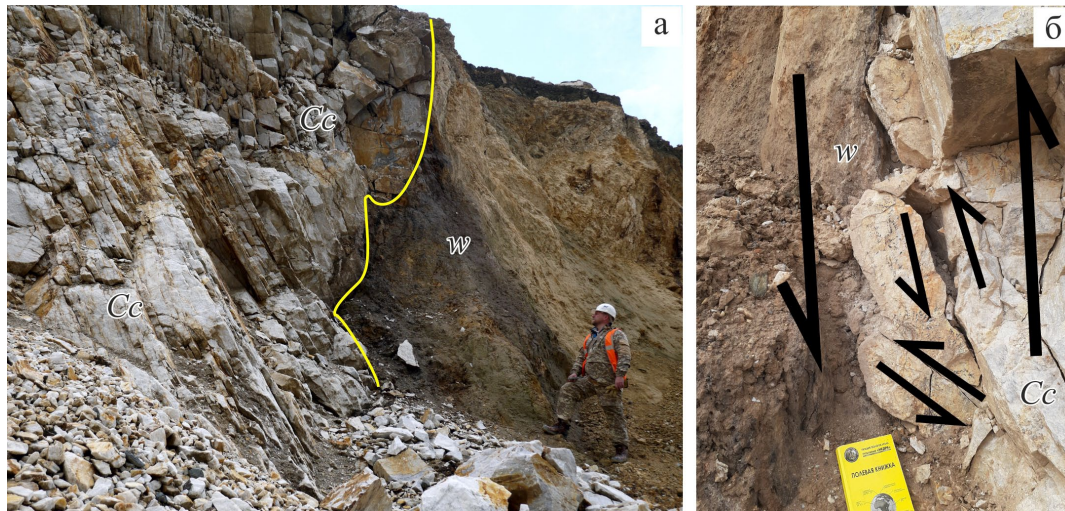
Отмеченные в карьере 3 системы кварцевых жил хорошо объясняются формированием Светлинского купола, на западном склоне которого локализовано месторождение (Кисин, Притчин, 2015; Кисин и др., 2019, 2022). Субмеридиональные жилы кварца и тела вторичных кварцитов, сопровождаемые рудоносными метасоматитами, имеют листрическую природу, отвечая зонам тектонических срывов в обрамлении купольной структуры: сверху вниз углы падения постепенно возрастают и даже меняют направление падения на противоположное (рис. 10). Подъем восточного борта этих тектонических зон неоднократно фиксировался структурными наблюдениями в карьере, в локальном масштабе это подтверждается по ориентированным образцам и прозрачным шлифам. Кроме того, в субмеридиональном теле рудоносных метасоматитов распространены согласные мелкие линзочки гранулированного кварца с отчетливо проявленными признаками образования в условиях тектонического покоя или растяжения (отсутствия сростков кварца, множество миарол, недеформированных сноповидных агрегатов актинолита и кристаллов биотита). Тектонические срывы являются хорошими флюидоподводящими и рудовмещающими структурами, а процессы гранитизации, сопровождающие куполообразование, мобилизуют и перераспределяют многие химические элементы, включая Au и Te.

Серии сближенных субширотных кварцевых жил линзовидной формы могли образоваться в результате растяжения при изгибе, продольном или поперечном. С учетом близости Светлинского купола это, несомненно, поперечный изгиб. По падению эти жилы ориентированы перпендикулярно касательной к поверхности купольной структу-

ры. Судя по взаимоотношениям субмеридиональных и субширотных кварцевых жил и их ассоциации с рудоносными метасоматитами, формирование их было почти синхронное, но последовательное и растянутое по времени. Их количество максимально вблизи взброса в рудоносных метасоматитах и быстро сокращается по мере удаления от него. Субширотные кварцевые жилы пересекают субмеридиональные, вокруг них нередко ореолы пиритизации в рудоносных метасоматитах. Это подтверждает флюидоподводящую и рудокализирующую роль зон тектонического срыва.

Возникновение трех систем кварцевых жил невозможно объяснить глубинным надвигом западного падения, но хорошо объясняется ростом купольной структуры (Светлинской) и обрамляющей его зоны тектонических срывов (сбросов или взбросов в зависимости от направления падения) и напряжений растяжения в обрамлении купола (см. рис. 10).

Таким образом, структуроподготовительные и рудомобилизующие процессы при формировании Светлинского месторождения золота проходили на коллизионном этапе (380–290 млн лет назад): опускание лежачего бока надвига с возникновением мелководного морского бассейна и накоплением терригенно-карбонатной толщи ( $D_3-C_{1v}$ ), закрытие морского бассейна в связи с формированием антиклинория ( $C_{1v}$ ), формирование гранитогнейсовых куполов (с зональным метаморфизмом, метаморфогенными и рудоносными флюидами) и сопровождаемые многочисленными тектоническими срывами взбросовой кинематики (флюидоподводящие и рудовмещающие структуры), деформирующими зону терпящего активность глубинного надвига ( $C_{1v}-C_3$ ).



**Рис. 11.** Контакты мрамора (Cc) с крупным блоком бесструктурной коры выветривания метавулканитов (w): а – на востоке, б – на западе.

Ширина блока около 60 м. В метавулканитах есть субширотные жилы кварца. Падение кливажа в мраморе в нижней части обнажения западное, вверху – субвертикальное. Вид на юг.

**Fig. 11.** Contacts between marble (Cc) and a large block of structureless weathering crust of metavolcanic rocks (w): а – in the eastern sector, б – in the western sector.

The block width is about 60 m. Sublatitudinal quartz veins occur within the metavolcanic rocks. Cleavage dip in the marble is westerly in the lower part of the exposure and subvertical in the upper part. View to the south.

Особый интерес представляет характер контактов мраморной толщи с метавулканитами и рудоносными метасоматитами. Авторами неоднократно наблюдались крупные блоки мрамора, “протыкающие” метавулканиты и рудоносные метасоматиты. Этим объясняется крайне извилистая линия контакта, появление блоков мрамора среди метавулканитов и рудоносных метасоматитов (рис. 11). Изучение кинематики тектонических движений на поверхности блоков мрамора всегда указывает на их подъем. Большие объемы светлых каолинитизированных пород с “древними” подземными выработками, залегающие между крупными блоками мрамора, ранее принимались за карстовые образования. Однако оказалось, что в них распространены субширотные кварцевые жилы, образованные на позднем коллизионном этапе.

В теле мраморов вскрыты тела золотоносных аргиллизитов мощностью 30–40 м, прослеженные по нескольким уступам (рис. 12). Вверх по разрезу они сменяются линейными корами выветривания, а вниз – более каменистыми разностями – аргиллизитами. Процессы гидротермальной аргиллизации метавулканитов и рудоносных метасоматитов доказываются наличием в аргиллизитах системы субширотных кварцевых жил. Наличие золотоносных аргиллизитов может указывать на более длительный процесс рудообразования, особенно в части отложения рудного самородного золо-

та, как полагают некоторые исследователи (Грязнов и др., 2007).

В целом наблюдениями установлено, что зона глубинного надвига в пределах карьера полностью уничтожена субвертикальными восходящими движениями блоков мрамора (взбросовая кинематика). Взброс представлен зоной меридионального простирания с субвертикальными блоками внедрения (протрузиями) мраморов лежачего бока надвига в метавулканиты всячего бока (рис. 13). Неравномерное внедрение мраморов вызвало складкообразование в всячем боку надвига. На метавулканиты, претерпевшие хрупкопластические и хрупкие деформации, наложена золотосульфидная жильная и прожилково-вкрапленная минерализация. По наиболее проницаемым породам и вдоль границы мраморов развиты аргиллизиты и глубокие линейные коры выветривания.

Таким образом, рудоотложение и формирование месторождения произошли на этапе постколлизионной релаксации, в интервале 289–277 млн лет назад, а возможно, и большем, включая триас. Сброс стрессовых напряжений привел к падению общего давления и движению флюидов по тектонически ослабленным зонам, в том числе по зонам тектонических срывов, обрамляющих купольные структуры. Главную роль в формировании и локализации месторождения сыграл Светлинский купол, на западном склоне которого оно расположено.



**Рис. 12.** Юго-восточный угол Светлинского карьера (съемка с квадрокоптера, июль 2024 г.).

*a* – аргиллизит, *Cc* – мрамор (доломитовый и Mg-кальцитовый), *w* – метавулканиды и золотоносные метасоматиты. Ширина изображения по верхнему уступу около 800 м, по нижнему около 200 м. Вид на южный борт.

**Fig. 12.** Southeastern corner of the Svetlinsky openpit mine (UAV survey, July 2024).

*a* – argillisite, *Cc* – marble (dolomitic and Mg-calcite), *w* – metavolcanic rocks and goldbearing metasomatites. Image width is about 800 m along the upper bench and about 200 m along the lower bench. View of the southern wall.

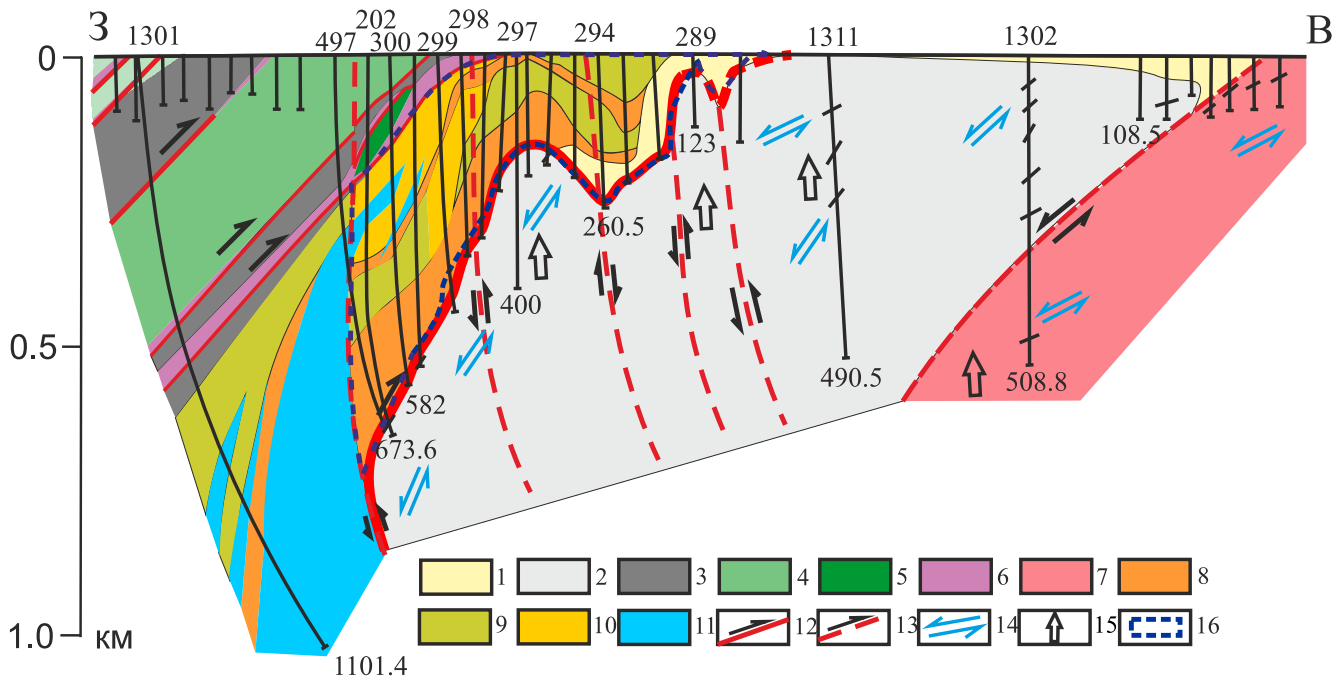
По результатам проведенных исследований последовательность формирования Светлинского месторождения золота представлена на рис. 14.

1. Формирование Светлинского месторождения золота началось с заложения в позднем девоне глубинного надвига западного падения, связанного с началом позднепалеозойской уральской коллизии (рис. 14а). Надвиг сопровождается изгибающими моментами и возникновением парного надвига противоположного падения.

2. В связи с развитием надвигов произошло опускание их лежащих боков с образованием мелководных морских бассейнов (рис. 14б), быстро заполняющихся терригенно-карбонатными осадками ( $C_{IV}$ ). Прогрессивное развитие надвига сопровождалось опусканием осадков на глубину, изменением наклона дна бассейна и возникновением подводно-оползневых структур.

3. Закрытие морского бассейна произошло в поствайское время, вероятно, по причине подъема территории в результате формирования антиклинорной структуры (рис. 14в). Причиной этого мог быть продольный изгиб и утолщение коры в результате работы тектонопары “надвиг–продольный изгиб” (Кисин, Коротеев, 2017).

4. Еще на коллизионном этапе имел место Mg-метасоматоз терригенно-карбонатной толщи с образованием доломитовых мраморов по известнякам. Метасоматоз проявился локально, что обусловлено, вероятно, наличием рассредоточенных флюидоподводящих зон. В связи с активностью надвига доломиты, как и вся терригенно-карбонатная толща, испытали кливажирование (кливаж разлома), вплоть до интенсивного расщепления. На поздних этапах локально на доломиты наложен  $Ca$ -метасоматоз с образованием массивных кальцитовых мраморов.



**Рис. 13.** Схематический геологический разрез по линии 13 скважин колонкового бурения с учетом структурных наблюдений в Светлинском карьере. Масштаб гор. = верт.

1 – карстовые отложения и бесструктурные коры выветривания; 2 – мрамор и мраморизованные известняки (C<sub>1v</sub>); 3 – серицит-биотит-кварцевые и углистые сланцы (S<sub>1</sub>-D<sub>3</sub>); 4 – амфиболиты аповулканические (S<sub>1</sub>-D<sub>3</sub>); 5 – габбро метаморфизованное; 6 – талькиты, серпентиниты; 7 – кварц-плагиоклаз-биотитовые сланцы с альмандином и ставролитом; 8 – кварц-серицит-биотитовые метасоматиты милонитизированные; 9 – амфиболовые метасоматиты; 10 – амфибол-биотитовые метасоматиты; 11 – вторичные кварциты; 12 – надвиг; 13 – тектонические срывы (взбросы) обрамления купольной структуры; 14 – кливаж в мраморе, сланцеватость пород и направление сдвига; 15 – направление движения блоков пород; 16 – контуры рудоносной зоны.

**Fig. 13.** Schematic geological crosssection along the line of 13 core drilling boreholes, incorporating structural observations from the Svetlinsky openpit mine. Horizontal scale = vertical scale.

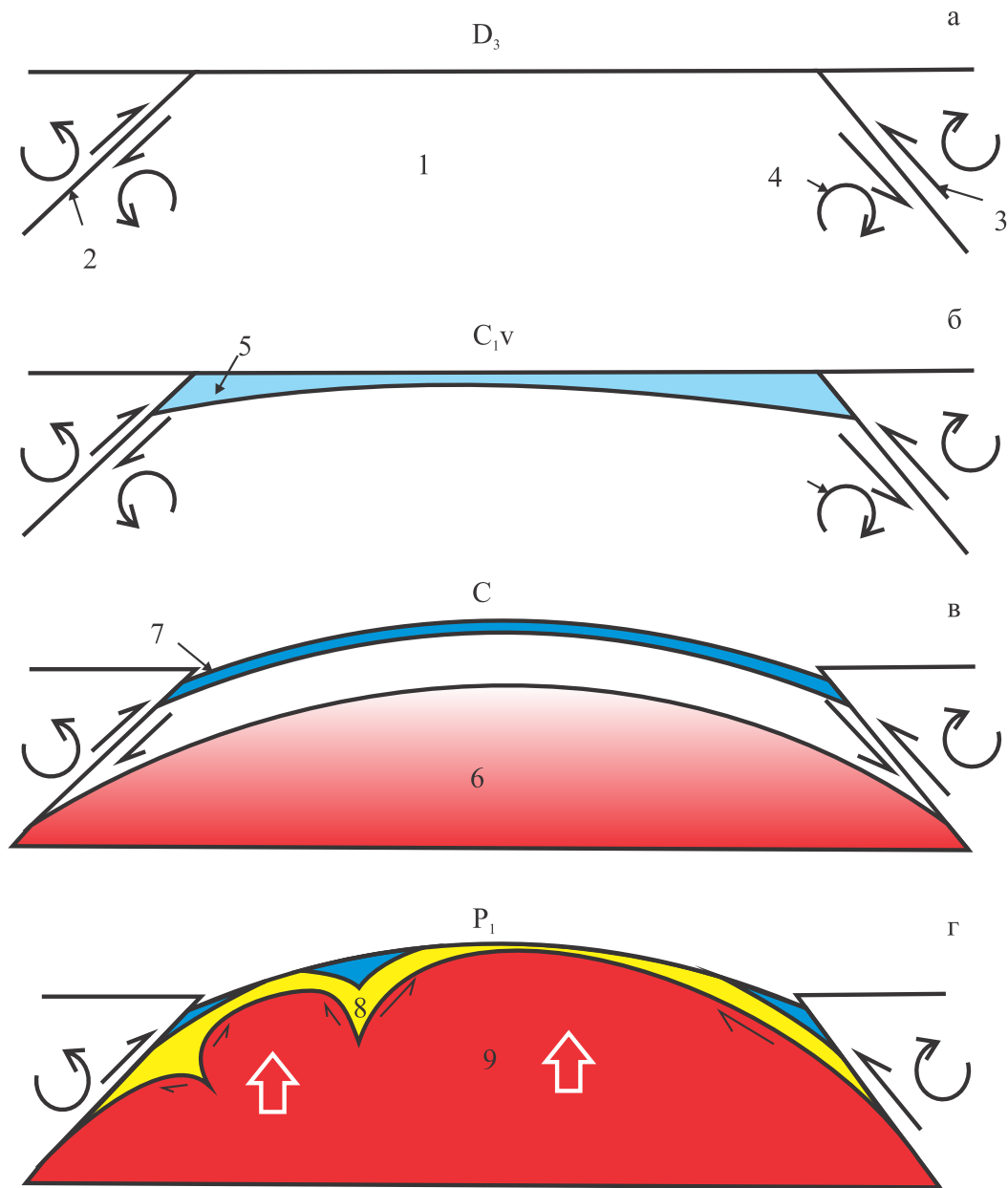
1 – karst deposits and structureless weathering crusts; 2 – marble and marmorized limestones (C<sub>1v</sub>); 3 – sericite-biotite-quartz and carbonaceous schists (S<sub>1</sub>-D<sub>3</sub>); 4 – apovolcanic amphibolites (S<sub>1</sub>-D<sub>3</sub>); 5 – metamorphosed gabbro; 6 – talcites, serpentinites; 7 – quartz-plagioclase-biotite schists with almandine and staurolite; 8 – quartz-sericite-biotite metasomatites (mylonitized); 9 – amphibole metasomatites; 10 – amphibole-biotite metasomatites; 11 – secondary quartzites; 12 – thrust fault; 13 – tectonic ruptures (reverse faults) framing the dome structure; 14 – cleavage in marble, rock foliation, and shear direction; 15 – direction of rock block movement; 16 – boundaries of the ore bearing zone.

5. В породах всячего бока надвига Mg-Fe-метасоматоз коллизионного этапа проявился и в виде локальной биотитизации и амфиболитизации метавулкаников.

6. Трансформация механической энергии в тепловую и химическую происходила в условиях стрессовых напряжений в ядре формирующегося антиклинория. Она сопровождалась разогревом пород, пластичным течением материала вверх с переносом тепловой энергии и формированием гранитогнейсовых куполов (рис. 14г). Возникновение Светлинского купола определило локализацию месторождения. В породах обрамления имеет место зональный метаморфизм. На Светлинском месторождении карбонатные породы преобразованы в мраморы. Происходит затухание над-

вигового процесса и начинается формирование зон тектонических срывов, окаймляющих купола, выдвигание вверх крупных блоков мрамора, деформирующих зону надвига. В всячем боку надвига сформировались три системы кварцевых жил, сопровождаемые пирит-кварц-кальцит-плагиоклаз-биотитовыми метасоматитами.

7. Постколлизийный этап фиксируется сбросом стрессовых напряжений, полным отмиранием надвига, возникновением анатектических гранитов в апикальной части гранитогнейсовых куполов, началом пневматолито-гидротермальной стадии. На раннем постколлизийном этапе в карбонатной толще отлагается ряд минералов, включая F-флогопит, пирит, пирротин; позднее – хромпаргасит, а затем мусковит, фуксит, турма-



**Рис. 14.** Зарождение и эволюция Кочкарского антиклинория в условиях позднепалеозойской уральской коллизии.

1 – земная кора; 2 – надвиг; 3 – направление движения; 4 – изгибающие моменты; 5 – мелководный морской бассейн; 6 – область трансформации механической энергии сжатия в тепловую и химическую; 7 – терригенно-карбонатные осадки, зональный метаморфизм в обрамлении гранитогнейсовых куполов; 8 – сланцы, бластомилониты в обрамлении куполов; 9 – гранитогнейсы, анатектические граниты.

**Fig. 14.** Initiation and evolution of the Kochkarsky anticlinorium under Late Paleozoic Uralian collision conditions.

1 – Earth's crust; 2 – thrust fault; 3 – direction of movement; 4 – bending moments; 5 – shallow marine basin; 6 – zone of mechanical compression energy transformation into thermal and chemical energy; 7 – terrigenous-carbonate sediments, zonal metamorphism in the framing of granitoid gneiss domes; 8 – schists and blastomylonites in the dome framing; 9 – granite-gneisses, anatectic granites.

лин, ангидрит, аподоломитовый тальк, флюорит, F-апатит, кварц, розовый топаз, эвклаз, сера самородная, сфалерит, блеклая руда, галенит, рутил и золото.

8. Золоторудная минерализация отложилась не только в пирит-кварц-плаггиоклаз-биотитовых метасоматитах, но и в породах, контактирующих с мраморами.

9. По результатам изотопного  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  датирования калийсодержащих минералов метасоматитов и кварцевых жил Светлинского месторождения установлено, что гидротермальные рудные ассоциации образовались на раннем постколлизиионном этапе, в интервале 289–277 млн лет назад (Притчин и др., 2024), и имеют близкий возраст с анатектическими гранитами Кочкарского антиклинория (Ферштатер и др., 2007).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Начало формированию Светлинского месторождения золота положило возникновение в связи с началом уральской коллизии глубинного надвига, дестабилизировавшего геологическую среду. Работа выполнялась тектонопарой “надвиг–продольный изгиб”, перераспределявшей концентрирующую тектоническую энергию сжатия, приводящую к глубоким структурно-вещественным преобразованиям земной коры: возникновению положительного изгиба коры, разогреву, метаморфизму, метасоматозу, утолщению коры, пластическим и квазипластическим течениям, купольному тектоногенезу с зональным метаморфизмом.

Структуроподготовительные и рудомобилизующие процессы при формировании Светлинского месторождения проходили на коллизиионном этапе (380–290 млн лет назад): опускание лежачего бока надвига с возникновением мелководного морского бассейна и накоплением терригенно-карбонатной толщи ( $D_3-C_1v$ ), закрытие морского бассейна в связи с формированием антиклинория ( $C_1v$ ), формирование гранитогнейсовых куполов (с зональным метаморфизмом, метаморфогенными и рудоносными флюидами), сопровождаемых многочисленными тектоническими срывами взбросовой кинематики (флюидоподводящие и рудовмещающие структуры), деформирующими зону теряющего активность глубинного надвига ( $C_1v-C_3$ ).

Рудоотложение и формирование месторождения произошли на этапе постколлизиионной релаксации, в интервале 290–276 млн лет назад, а возможно, и большем, включая триас. Сброс стрессовых напряжений привел к падению общего давления и движению флюидов по тектонически ослабленным зонам, в том числе по зонам тектонических срывов, обрамляющих купольные структуры. Главную роль в формировании и локализации месторождения сыграл Светлинский купол, на западном склоне которого оно расположено.

Данная модель хорошо объясняет золотоносность около- и межкупольных структур в Кочкарском антиклинории, их россыпеобразующую роль и указывает на их первоочередность для постановки поисковых работ на коренные месторождения золота.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Болтыров В.Б., Пыстин А.М., Огородников В.Н. (1973) Региональный метаморфизм пород северного обрамления Санарского гранитного массива на Южном Урале. *Геология метаморфических комплексов Урала*, 53-66. (Тр. Свердл. Горн. ин-та, 91).
- Григорьев Н.А. (2009) Распределение химических элементов в верхней части земной коры. Екатеринбург: УрО РАН, 382 с.
- Грязнов О.Н., Баранников А.Г., Савельева К.П. (2007) Нетрадиционные типы золотоаргиллизитового оруднения в мезозойских структурах Урала. *Изв. УГГУ*, 22, 41-53.
- Кейльман Г.А., Болтыров В.Б., Бурьян Ю.И., Горожанкин В.Т. (1973) К вопросу о структурной эволюции Кочкарского антиклинория. *Геология метаморфических комплексов Урала*, 38-45. (Тр. Свердл. Горн. ин-та, 91).
- Кейльман Г.А. (1974) Мигматитовые комплексы подвижных поясов. М.: Недра, 200 с.
- Кисин А.Ю. (2007) Деформационные макроструктуры в карбонатных породах гранито-гнейсовых комплексов Урала. *Литосфера*, (1), 90-108.
- Кисин А.Ю. (1991) Месторождения рубинов в мраморах (на примере Урала). Свердловск: УрО АН СССР, 130 с.
- Кисин А.Ю. (1989) Принципы прогнозирования хрусталеносности кварцевых жил в надкупольных структурах. *Геологическая наука – народному хозяйству*. Инф. мат.-лы. Свердловск: УрО АН СССР, 3.
- Кисин А.Ю., Коротеев В.А. (2017) Блоковатость и рудогенез. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 349 с.
- Кисин А.Ю., Мурзин В.В., Притчин М.Е. (2017) Золото в мраморах Светлинского карьера (Южный Урал). *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 164, 223-226.
- Кисин А.Ю., Мурзин В.В., Притчин М.Е. (2018) Особенности контакта карбонатных пород Кочкарского антиклинория с вулканогенно-осадочной толщей Заураловского синклинория в Светлинском золоторудном карьере (Южный Урал). *Тр. ИГГ УрО РАН*, вып. 165, 210-214.
- Кисин А.Ю., Огородников В.Н., Поленов Ю.А., Мурзин В.В., Притчин М.Е. (2019) Роль Светлинской гранитогнейсовой купольной структуры в образовании кварцево-жильных месторождений (Южный Урал). *Изв. УГГУ*, 4(56), 7-19. DOI: 10.21440/2307-2091-4
- Кисин А.Ю., Притчин М.Е. (2015) Разрывная тектоника на Светлинском месторождении золота (Южный Урал) и ее рудоконтролирующая роль. *Вестн. Перм. ун-та. Геол.*, 28(3), 34-42. DOI: 10.17072/psu.geol.28.34
- Кисин А.Ю., Притчин М.Е., Озорнин Д.А. (2022) Геолого-структурная позиция Светлинского месторождения золота (Южный Урал). *Зап. Горн. ин-та*, 255, 369-376. DOI: 10.31897/PMI.2022.46
- Леонов Ю.Г. (1993) Тектонические критерии интерпретации сейсмических отражающих горизонтов в нижней коре континентов. *Геотектоника*, (5), 4-15.
- Огородников В.Н., Сазонов В.Н., Поленов Ю.А. (2004) Минералогия шовных зон Урала. Ч. 1. Кочкарский рудный район (Южный Урал). Екатеринбург: Изд-во УГГА, 216 с.
- Притчин М.Е., Кисин А.Ю., Викентьева О.В., Озорнин Д.А., Травин А.В., Викентьев И.В. (2024)  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

- датирование гидротермальных процессов на крупных золоторудных месторождениях Кочкарского антиклинория (Южный Урал, Россия). *Геол. руд. месторожд.*, **66**(5), 533-545. DOI: 10.31857/S0016777024050062
- Притчин М.Е., Кисин А.Ю., Озорнин Д.А. (2025) Оползневые текстуры осадка в нижнекаменноугольных терригенно-карбонатных отложениях Кочкарского антиклинория (Южный Урал). *Литол. и полезн. ископаемые*, **60**(2), 231-242. DOI: 10.31857/S0024497X25020064
- Пужаков Б.А., Шох В.Д., Шулькина Н.Е., Шулькин Е.П., Тарелкина Е.А., Долгова О.Я. (2018) Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-6 1:200 000. Изд. 2-е. Сер. Южно-Уральская. Лист N-41-XIII (Пласт). Объясн. зап. М.: Моск. фил. ВСЕГЕИ, 205 с.
- Резанов И.А. (1991) Проблема нижней коры. *Геотектоника*, **(5)**, 15-25.
- Сазонов В.Н., Попов Б.А., Григорьев Н.А., Мурзин В.В., Мецнер Э.И. (1989) Зово-мантийное оруденение в салических блоках эвгеосинклиналей. Свердловск: УрО АН СССР, 112 с.
- Тектоническая расчлененность литосферы. (1980) (Под ред. А.В. Пейве). М.: Наука, 215 с.
- Тектоническая расчлененность литосферы и региональные геологические исследования. (1990) (Под ред. Т.А. Никитиной). М.: Наука, 293 с.
- Тектоническая расчлененность литосферы новейших подвижных поясов: сб.ст. (1982) (Отв. ред. А.В. Пейве). М.: Наука, 113 с. (*Тр. ГИИ АН СССР*, вып. 359).
- Ферштатер Г.Б., Краснобаев А.А., Беа Ф., Монтеро П., Бородина Н.С. (2007) История и геодинамические обстановки палеозойского интрузивного магматизма Среднего и Южного Урала (по результатам датирования цирконов). *Геотектоника*, **(6)**, 52-77.
- Carter D.P., Seed H.B. (1988) Liquefaction Potential of Sand Deposits Under Low Levels of Excitation. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center University of California, 119 p.
- Vikent'eva O.V., Bortnikov N.S. (2015) The large Svetlinsk Au-Tedeposit, South Urals: telluride mineralization for genetic reconstructions. *Proc. 13th Biennial SGA Meeting, Nancy, France*, 851-854.
- Vikent'eva O., Prokofiev V., Borovikov A., Kryazhev S., Groznova E., Pritchkin M., Vikentyev I., Bortnikov N. (2020) Contrasting fluids in the Svetlinsk gold-telluride hydrothermal system, South Urals. *Minerals*, **10**, paper 37, 1-26. DOI:10.3390/min10010037
- Boltyrov V.B., Pystin A.M., Ogorodnikov V.N. (1973) Regional metamorphism of rocks of the northern rim of the Sanar granite massif in the Southern Urals. *The geology of the metamorphic complexes of the Urals*, 53-66. (*Tr. Sverd. Gorn. Instituta*, **90**). (In Russ.)
- Carter D.P., Seed H.B. (1988) Liquefaction Potential of Sand Deposits Under Low Levels of Excitation. Berkeley, Earthquake Engineering Research Center University of California, 119 p.
- Fershtater G.B., Krasnobayev A.A., Bea F., Montero P., Boro-dina N.S. (2007) History and geodynamic conditions of Paleozoic intrusive magmatism in the Middle and South-ern Urals (based on the results of zircon dating). *Geotectonics*, **(6)**, 52-77. (In Russ.)
- Grigor'ev N.A. (2009) Distribution of chemical elements in the upper part of the Earth's crust. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 382 p. (In Russ.)
- Gryaznov O.N., Barannikov A.G., Savel'eva K.P. (2007) Unconventional types of gold-argillite mineralization in Mesozoic structures of the Urals. *Izv. UGGU*, **(22)**, 41-53 (In Russ.)
- Keil'man G.A. (1974) Migmatite complexes of mobile belts. Moscow, Nedra Publ., 200 p. (In Russ.)
- Keil'man G.A., Boltyrov V.B., Bur'yan Yu.I., Gorozhankin V.T. (1973) On the question of the structural evolution of the Kochkar anticlinorium. *The geology of the metamorphic complexes of the Urals*, 38-45. (*Tr. Sverd. Gorn. Instituta*, **91**). (In Russ.)
- Kisin A.Yu. (1989) Principles of forecasting quartz vein crystal content in supradome structures. *Geological science for the national economy. Information materials*. Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 3. (In Russ.)
- Kisin A.Yu. (1991) Deposits of rubies in marbles (on the example of the Urals). Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 130 p. (In Russ.)
- Kisin A.Yu. (2007) Deformation macrostructures in carbonate rocks of granite-gneiss complexes of the Urals. *Litosfera*, **(1)**, 90-108. (In Russ.)
- Kisin A.Yu., Koroteev V.A. (2017) Block folding and ore genesis. Ekaterinburg, IGG UrO RAN Publ., 349 p. (In Russ.)
- Kisin A.Yu., Murzin V.V., Pritchkin M.E. (2018) Features of the contact of carbonate rocks of the Kochkar anticlinorium with the volcanogenic-sedimentary strata of the Zaural synclinorium in the Svetlinsky gold mine (Southern Urals). *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 165, 210-214. (In Russ.)
- Kisin A.Yu., Murzin V.V., Pritchkin M.E. (2017) Gold in the marbles of the Svetlinsky quarry (Southern Urals). *Tr. IGG UrO RAN*, vyp. 164, 223-226. (In Russ.)
- Kisin A.Yu., Ogorodnikov V.N., Polenov Yu.A., Murzin V.V., Pritchkin M.E. (2019) The Role of the Svetlinskaya Granitogneiss Dome Structure in the Formation of Quartz-Vein Deposits (Southern Urals). *Izv. UGGU*, **4**(56), 7-19. (In Russ.) DOI 10.21440/2307-2091-4
- Kisin A.Yu., Pritchkin M.E. (2015) Fault Tectonics of the Svetlinskoye Gold Deposit (South Urals) and its Role in Ore Control. *Vestn. Perm. Universiteta. Geol.*, **28**(3), 34-42. (In Russ.) DOI: 10.17072/psu.geol.28.34
- Kisin A.Yu., Pritchkin M.E., Ozornin D.A. (2022) Geological and structural position of the Svetlinskoye gold deposit (Southern Urals). *Zap. Gorn. In-ta*, **255**, 369-376. (In Russ.) DOI: 10.31897/PMI.2022.46
- Leonov Yu.G. (1993) Tectonic criteria for the interpretation of seismic reflecting horizons in the lower crust of continents. *Geotectonics*, **(5)**, 4-15 (In Russ.)
- Ogorodnikov V.N., Sazonov V.N., Polenov Yu.A. (2004) Mineralogy of suture zones of the Urals. Pt 1. Kochkarsky ore region (Southern Urals). Ekaterinburg, UGGA Publ., 216 p (In Russ.)
- Pritchkin M.E., Kisin A.Yu., Ozornin D.A. (2025) Landslide sediment textures in Lower carboniferous terrigenous-carbonate deposits of the Kochkarsky anticlinorium (Southern Urals). *Litol. Polezn. Iskop.*, **60**(2), 231-242. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0024497X25020064
- Pritchkin M.E., Kisin A.Yu., Vikent'eva O.V., Ozornin D.A., Travin A.V., Vikentiev I.V. (2024) <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating of hydrothermal processes in large gold deposits of the

## REFERENCES

- Kochkar anticlinorium (South Urals, Russia). *Geol. Rud. Mestorozhd.*, **66**(5), 533-545. DOI: 10.31857/S0016777024050062
- Puzhakov B.A., Shokh V.D., Shchul'kina N.E., Shchul'kin E.P., Tarelkina E.A., Dolgova O.Ya. (2018) State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. 2nd ed. The South Ural series. Sheet N-41-XIII (Formation). Explanatory note. Moscow, Moscow branch of VSEGEI Publ., 205 p. (In Russ.)
- Rezanov I.A. (1991) The problem of the lower crust. *Geotectonics*, (5), 15-25 (In Russ.)
- Sazonov V.N., Popov B.A., Grigor'ev N.A., Murzin V.V., Metsner E.I. (1989) Crust-mantle mineralization in sialic blocks of eugeosynclines. Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 112 p. (In Russ.)
- Tectonic stratification of the lithosphere. (1980) (Ed. A.V. Peive). Moscow, Nauka Publ., 215 p. (In Russ.)
- Tectonic stratification of the lithosphere and regional geological studies. (1990) (Ed. T.A. Nikitina). Moscow, Nauka Publ., 293 p. (In Russ.)
- Tectonic stratification of the lithosphere of the newest mobile belts: collection of articles. (1982) (Ed. A.V. Peive). Moscow, Nauka Publ., 113 p. (*Tr GIN AN SSSR*, vyp. 359).
- Vikent'eva O.V., Bortnikov N.S. (2015) The large Svetlinsk Au-Tedeposit, South Urals: telluride mineralization for genetic reconstructions. *Proc. 13th Biennial SGA Meeting, Nancy, France*, 851-854.
- Vikent'eva O., Prokofiev V., Borovikov A., Kryazhev S., Groznova E., Pritchin M., Vikentyev I., Bortnikov N. (2020) Contrasting fluids in the Svetlinsk gold-telluride hydrothermal system, South Urals, *Minerals*, 10, paper 37, 1-26. DOI:10.3390/min10010037