



## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ И ГЕНЕТИЧЕСКИЕ СООТНОШЕНИЯ ЗОЛОТОРУДНОЙ И РТУТНО-СУРЬМЯНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИЙ НА Hg-Sb-ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕМ МЕСТОРОЖДЕНИИ ЧАУВАЙ (КИРГИЗИЯ): ГЕОЛОГИЯ, МИНЕРАЛОГИЯ РУД И ОСОБЕННОСТИ ГИДРОТЕРМАЛЬНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

А. В. Малютина, Ю. О. Редин, А. С. Гибшер, В. П. Мокрушников

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

Hg-Sb месторождение Чаувай – яркий пример совмещения в пространстве двух контрастных типов оруденения: ртутно-сурьмяного и золотого. Приведены результаты изучения пространственно-временных и генетических соотношений золоторудной и ртутно-сурьмяной минерализаций на основе комплекса как традиционных геологических и минералого-геохимических методов, так и современных инструментальных методов анализа минерального состава. Установлены два типа руд, которые имеют четкую структурную приуроченность: а) ртутно-сурьмяные (киноварь-антимонитовые), приуроченные к джаспероидным брекчиям и проявленные исключительно вдоль тектонического контакта известняков Алайского разреза и терригенных пород толубайской свиты; б) золото-сульфидные (арсенопирит-пиритовые), локализованные в слабоизмененных карбонатно-терригенных породах толубайской свиты, залегающих над плоскостью тектонического контакта. Рудогенез происходил в течение следующих стадий: в позднедиагенетическую, без перерыва переходящую в катагенетическо-гидротермальную, которые характеризуются формированием золотой минерализации, и затем в более позднюю гидротермально-телетермальную, для которой свойственно развитие Hg-Sb оруденения. Установлено, что главным носителем невидимого золота («invisible gold») в рудах является фрамбоидальный и идиоморфный пирит, особенно его высокомышьяковистые разновидности. Комплекс проведенных исследований показал, что золоторудное и ртутно-сурьмяное оруденение разорвано во времени и генетически связано с разными гидротермально-метасоматическими процессами, а месторождение Чаувай может классифицироваться как тип Carlin-like (Карлин-тип).

**Ключевые слова:** Южно-Ферганский пояс, месторождение Чаувай, золотое и ртутно-сурьмяное оруденение, гидротермально-метасоматические изменения вмещающих пород, джаспероиды, Карлин-тип.

## SPATIOTEMPORAL AND GENETIC RELATIONSHIPS OF GOLD ORE AND MERCURY-ANTIMONY MINERALIZATION AT THE Hg-Sb-GOLD-BEARING CHAUVAI DEPOSIT (KIRGHIZIA): GEOLOGY, MINERALOGY OF ORES AND FEATURES OF HYDROTHERMAL-METASOMATIC PROCESSES

A. V. Malyutina, Yu. O. Redin, A. S. Gibsher, V. P. Mokrushnikov

V.S.Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, Russia

The Chauvai Hg-Sb deposit is a striking example of combining two contrasting types of mineralization in space: mercury-antimony and gold ones. The article studies the spatial-temporal and genetic relationships of gold-ore and mercury-antimony mineralization based on a complex of both traditional geological and mineralogical-geochemical methods, as well as modern instrumental methods for analyzing the mineral composition. Two types of ores with clear structural confinedness have been found at the deposit: a) mercury-antimonite (cinnabar-antimonite) ores, associated with jasperoid breccias and manifested exclusively along the tectonic contact of limestone of the Alai section and terrigenous rocks of the Tolubai Formation, and b) gold-sulphide (arsenopyrite-pyritic) ores, localized in slightly modified carbonate-terrigenous rocks of the Tolubai Formation, overlying the plane of tectonic contact. Ore formation occurred during the following stages: in the late diagenetic, without interruption passing into the catagenetic-hydrothermal, characterized by the formation of gold mineralization, and then in the later hydrothermal-telethermal, characterized by the development of Hg-Sb mineralization. It is established that the main carrying agent of invisible gold (“invisible gold”) in ores is framboidal and idiomorphic pyrite and, especially, its high-arsenic varieties. A set of conducted studies has shown that the gold ore and mercury-antimony mineralization is broken in time and is genetically associated with various hydrothermal-metasomatic processes, and the Chauvai deposit can be classified as a Carlin-like type.

**Keywords:** South-Fergana belt, Chauvai deposit, gold and mercury-antimony mineralization, hydrothermal-metasomatic changes of enclosing rocks, jasperoids, Carlin-type.

DOI 10.20403/2078-0575-2021-3-61-82

Месторождение Чаувай расположено на юге Киргизии, входит в состав Южно-Ферганского ртутно-сурьмяного пояса (ЮФРСП), где в совокупности с другими рудными объектами (Хайдаркан, Кадам-

жай, Северный Акташ и др.) образует крупную рудную провинцию [18]. Месторождение открыто в начале прошлого столетия, его относили к ртутно-сурьмяному джаспероидному типу. К тому же оно явля-



ется ярким примером совмещения в пространстве двух контрастных типов оруденения: ртутно-сурьмяного и золотого. По результатам последних исследований месторождение Чаувай классифицируется как Hg-Sb-золотосодержащее и в соответствии со спецификой золотой минерализации может быть отнесено к Карлин-типу [18]. Многие исследователи обосновывают формационную самостоятельность сурьмяно-ртутного оруденения, не связывая его генетически с золото-сульфидным, и относят их к разным этапам рудообразования [3–5, 7, 10, 27, 30, 31, и мн. др.]. Поэтому основная цель статьи – выяснение пространственного и временного соотношения рассеянной золото-сульфидной и ртутно-сурьмяной минерализаций месторождения Чаувай. Решением этого вопроса, на наш взгляд, является изучение процессов изменения вмещающих пород (сульфидизации, декарбонатизации и джаспероидизации), их роль, место и значение в формировании золотого и ртутно-сурьмяного оруденений.

Выявление закономерностей формирования и размещения в пространстве и во времени указанного оруденения на уже известных объектах дает возможность разработать поисковые критерии (предпосылки) и признаки, использование которых позволит создать или дополнить прогнозно-поисковый комплекс для обсуждаемых объектов. Данный комплекс может быть использован не только на Чаувайском рудном поле, но и на других аналогичных месторождениях. Объекты подобного типа широко распространены и на территории России: близкие аналоги месторождения Чаувай – Воронцовское месторождение на Северном Урале и Солонеченское в Забайкалье; также схожими характеристиками обладают Лугоканский, Балейский, Нерчинский рудные узлы в Забайкалье, месторождения Восточного Казахстана (Суздальское, Большевик, Бакырчик, Жерек) и Енисейского края (Удереиское, Благодатное, Попутинское, Олимпиада).

#### **Методы исследований и аналитические методики**

Минералогический анализ лежит в основе проведения всех последующих типов анализа вещества. Минеральный состав, текстурные, структурные особенности, взаимоотношение минеральных индивидов между собой изучались под оптическим микроскопом (Zeiss Axio Lab с установленной цифровой камерой Canon) в отраженном и проходящем свете. Также посредством петрографических исследований были изучены особенности гидротермально-метасоматических процессов. Химический состав рудных минералов анализировался микрорентгеноспектральным методом (EMPA) на приборах JEOL JXA-8100, CAMEBAX-Micro, а также с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM) на приборах JSM-6510, и LEO 1430VP,

снабженных энергодисперсионными спектрометрами (ЭДС).

Микрорентгеноспектральный анализ проводился при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе около 50 нА, минимальном диаметре зонда, с временем набора сигнала на пике и фоне 10 с. В качестве стандартов использовались природные минералы известного состава. SEM исследования проводились при напряжении 20 кВ и силе тока 1,9–2,6 нА.

Содержания петрогенных элементов ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}_{\text{tot}}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) в породах определялись методом РФА в Центре многоэлементных и изотопных исследований ИГМ СО РАН.

#### **Геологическое строение месторождения Чаувай**

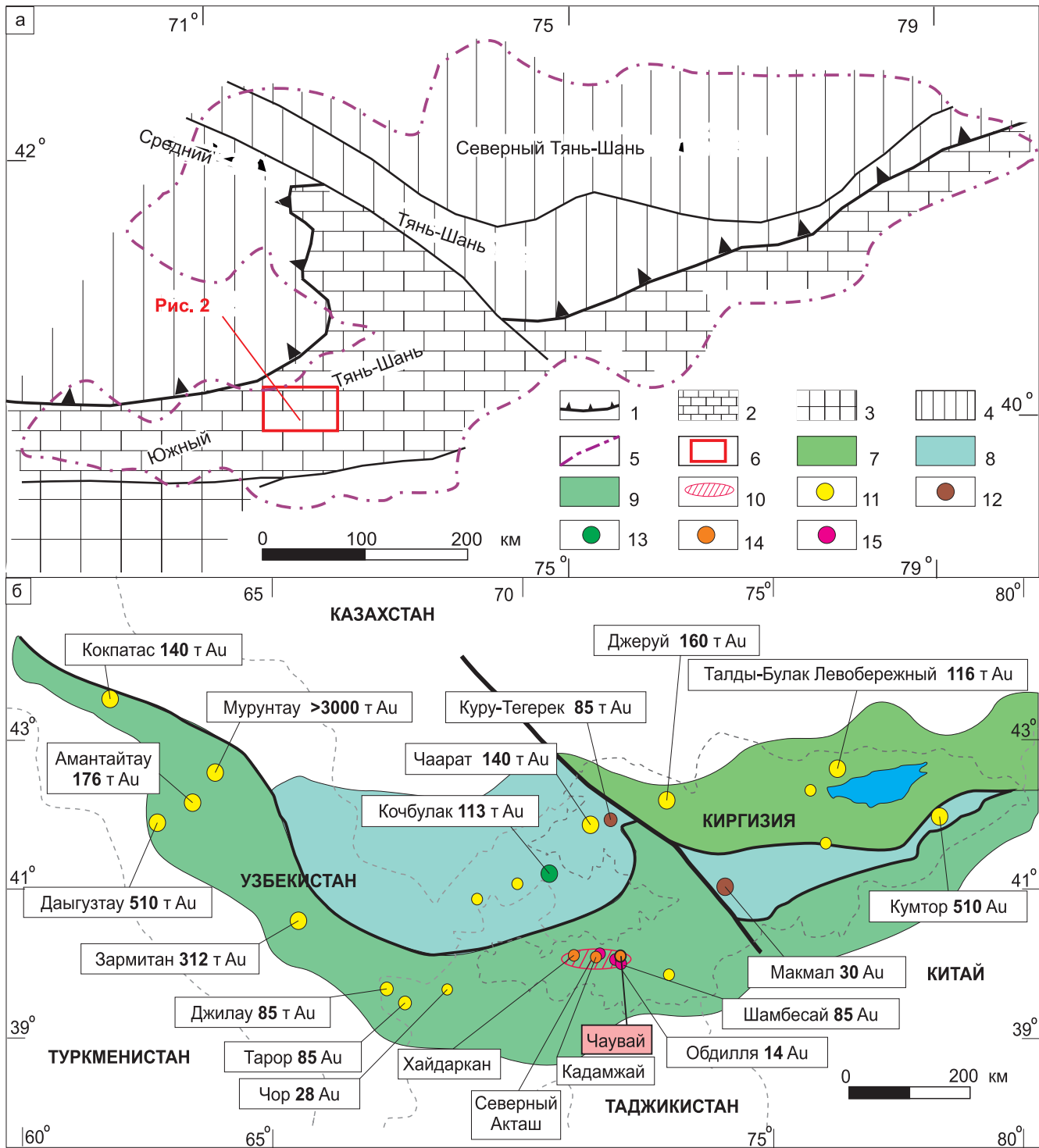
Месторождение Чаувай является составной частью ЮФРСР, который в региональном плане входит в структуру Южного Тянь-Шаня (рис. 1) – позднепалеозойского складчатого пояса, сформированного в результате закрытия Туркестанского океана, разделявшего Киргизско-Казахский, Каракорум-Таджикский и Алай-Таримский континенты [1, 14, 21].

#### **Структурно-тектонические особенности**

Геологическое строение месторождения Чаувай наиболее наглядно иллюстрируется на примере Опорного участка Чаувайского рудного поля (рис. 2, а), отражающего принципиальную модель покровно-складчатой структуры Южно-Ферганского ртутно-сурьмяного пояса.

На этом участке детально закартирован (в м-бе 1:2000) пакет надвинутых друг на друга дислоцированных тектонических пластин (см. рис. 2, б), плоскости сместителей которых ориентированы на север – северо-запад. В составе ансамбля пластин с юга на север выделяются верхняя – массивные органогенные доломитистые известняки ( $D_1-C_2$ ) и нижняя – терригенно-карбонатные отложения толубайской свиты ( $C_2tl$ ) (рис. 3, а). Толубайская свита сложена гравелитами, песчаниками, углеродистыми алевролитами и аргиллитами с примесью в цементе тонкозернистого карбонатного вещества и отдельными горизонтами известняков. Осадочная структура терригенных отложений толщи – это непрерывное повторение отдельных ритмов осадков, каждый из которых начинается песчаниками с градационной сортировкой обломочного материала (от грубозернистого внизу до тонкозернистого сверху), а заканчивается тонкозернистыми алевроаргиллитами или однородными аргиллитами. Такая стратификация типична для флишевых отложений [2], и данные породы представляют собой толщу турбидитовой природы с характерной ритмичностью по типу циклов Боума [15].

В основании «нижней» пластины породы тектонически и гидротермально-метасоматически переработаны с образованием карбонатных и крем-



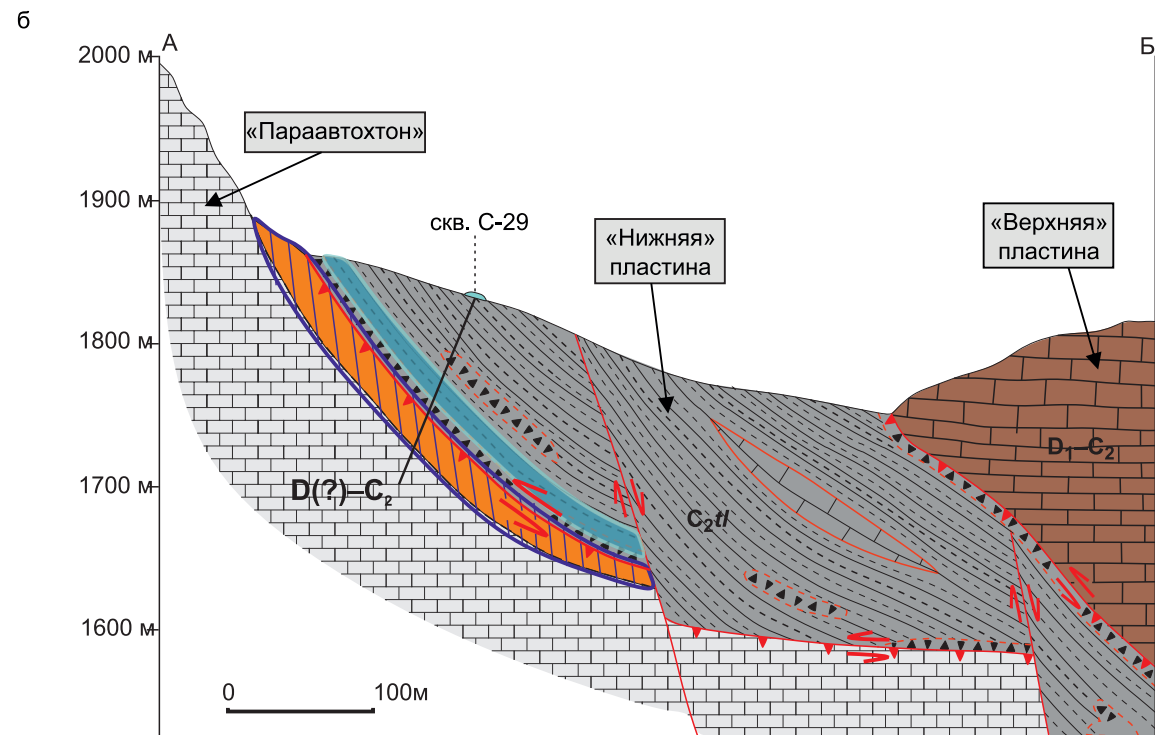
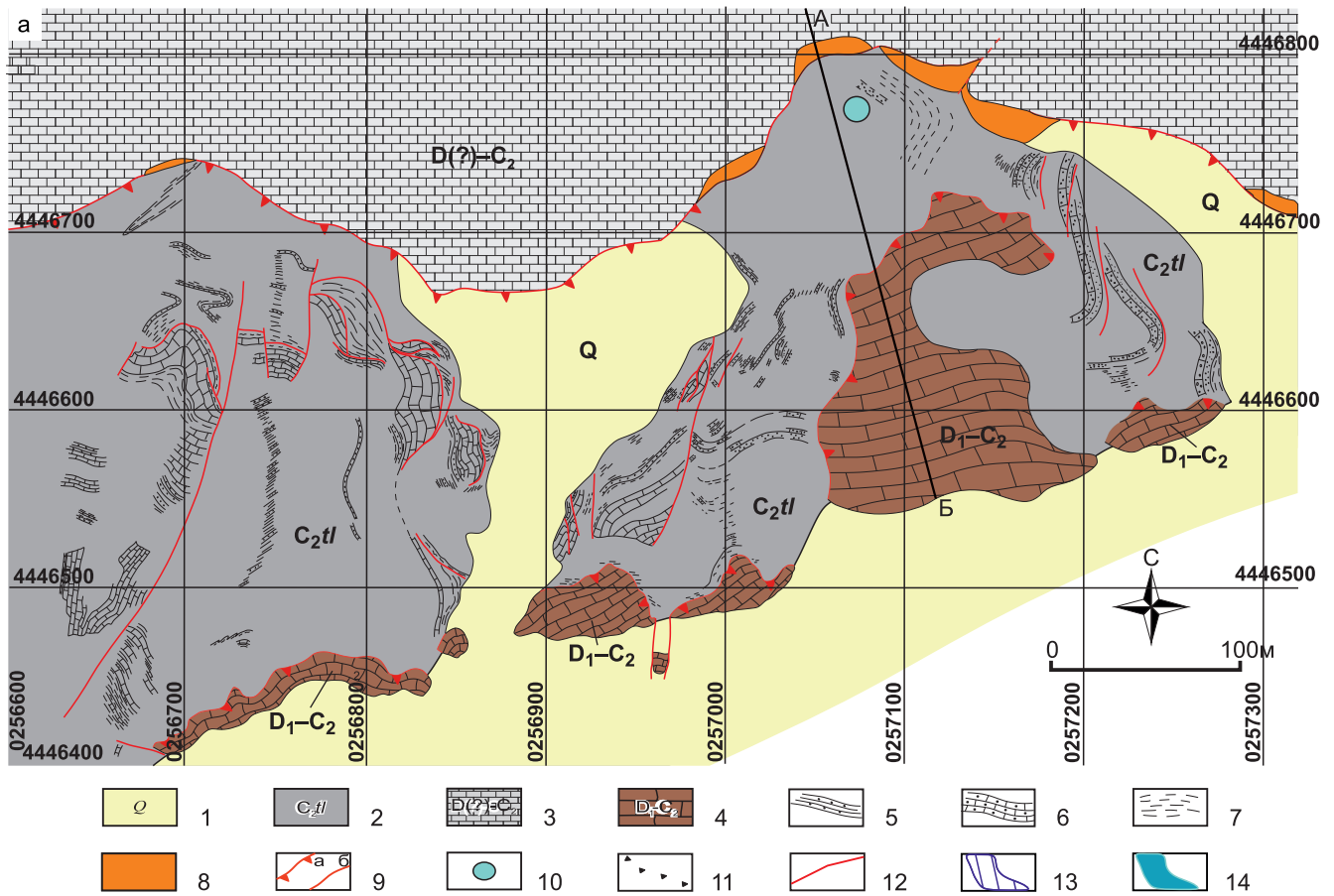
**Рис. 1.** Тектоническая схема юго-западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса (а) [1, 14] и распределение крупнейших месторождений золота на Тянь-Шане и в ЮФРСР (б) [18, 26, 28]

1 – Туркестанская сутура; 2–4 – блоки: 2 – Алай-Таримский, 3 – Каракорум-Таджикский, 4 – Киргизско-Казахский; 5 – государственная граница Киргизии; 6 – положение месторождения Чаувай (уч. Опорный) в структуре Тянь-Шаня (вне масштаба); 7 – Северный Тянь-Шань ( $\Sigma$  276 т Au); 8 – Средний Тянь-Шань ( $\Sigma$  878 т Au); 9 – Южный Тянь-Шань ( $\Sigma$  >4500 т Au); 10 – Южно-Ферганский Sb-Hg пояс; 11–15 – месторождения: 11 – орогенные Au, 12 – скарновые, 13 – эпитеральные, 14 – Sb-Hg джаспероидного типа, 15 – Карлин-типа

нистых тектонических брекчий (джаспероидов). В основной части пластины преобладают описанные флишевые отложения с редкими прослоями (мощностью до 2–3 м) глинистых известняков и калькаренинов [18]. Верхи пластины сложены темно-серыми алевролитами и аргиллитами с тонкими (до 20 см)

прослоями серых песчаников и тектоническим меланжем, представленным блоками (тектонические включения) массивных известняков в дислоцированном терригенном матриксе.

В породах обеих пластин отмечены многочисленные деформации: известняки вдоль контакта



**Рис. 2.** Крупномасштабная геологическая карта центрального (Опорного) участка месторождения Чаувай (а) и геологический профиль «А–Б» этого участка (б) (с дополнениями А. С. Гибшера, Ю. О. Редина, В. П. Мокрушников, 2017)

1 – четвертичные отложения; 2 – песчаники, алевролиты, аргиллиты, известняки (толубайская свита); 3 – массивно-слоистые органогенные известняки (Алайский тип разреза); 4 – доломитистые известняки; 5 – песчаники; 6 – калькарениты; 7 – алевролиты; 8 – джаспероиды; 9 – разрывные нарушения: а – надвиги, б – сдвиги; 10 – скв. С-29; 11 – тектоническая брекчия; 12 – разрывные нарушения (отображенные в геологическом профиле); 13 – Sb-Hg руды; 14 – золото-сульфидные руды



обычно сильно трещиноватые и брекчированные; параллельно главной плоскости сместителя проявлены дополнительные разрывные нарушения взбросовой (см. рис. 3, б) и сбросовой (см. рис. 3, в) кинематики, присутствуют зеркала скольжения (см. рис. 3, г). В терригенных породах по всему объему пластины прослеживаются пликвативные и разрывные дислокации, рассланцевание и несколько систем кливажных трещин (см. рис. 3, д). Вдоль основного контакта породы также подвержены дроблению и нередко «растаскиванию» вдоль оперяющих разломов.

Пакет описанных тектонических пластин по надвику перекрывает толщу параавтохтона, представленного массивно-слоистыми серыми известняками (D–C<sub>2</sub>) Алайского типа разреза. В верхней части параавтохтона распространены преимущественно органогенные известняки пыркафской свиты (C<sub>2</sub>p). Вдоль плоскости надвига, по которому известняки «перекрываются» терригенными породами, отмечены гидротермально-метасоматические изменения, фиксирующиеся по образованию джаспероидов (см. рис. 3, е, ж). Мощность джаспероидов может варьировать от 30 см до 20 м.

### **Структурно-морфологические особенности рудных тел**

На месторождении оба типа оруденения (сурьмяно-ртутное и золото-сульфидное) имеют четкую структурную приуроченность: Sb-Hg минерализация проявлена исключительно вдоль тектонического контакта алайских известняков и терригенных пород толубайской свиты, золото-сульфидная минерализация тяготеет к подошвенной части терригенной пластины, где породы также подвержены тектоническим и гидротермальным преобразованиям

*Сурьмяно-ртутные руды* приурочены к плоскости тектонического контакта флишевых отложений толубайской свиты и девон(?)-каменноугольных органогенных известняков «параавтохтона». Рудная минерализация (киноварь и антимонит) локализована в цементе джаспероидных брекчий, которые представляют собой раздробленные куски описанных пород, метасоматически замещенных кремнеземом и им же сцементированных. Мощность рудных тел обычно определяется степенью развития джаспероидов; по форме рудные тела отвечают в основном линейным типам: линзовидным, лентообразным, иногда жильным.

*Золото-сульфидная минерализация* (в среднем 1–3 г/т Au в руде) также приурочена к зоне тектонического контакта терригенных и карбонатных пород, но больше тяготеет к подошвенной части терригенной пластины. Джаспероидизация здесь обычно не отмечается, породы брекчированы и «залечены» кремнистым или карбонатным цементом, пронизаны разноориентированными кальцитовыми, реже реальгар-аурипигментовыми прожилками. Выделенные на основе опробования

скважин [18] рудные тела содержат от 0,2 до 5 г/т золота и обычно залегают на 10–30 м выше тектонического контакта. Как правило, рудные тела имеют линзовидную морфологию, не выдержаны по простиранию, повышенная золотоносность носит скорее узловый характер. Руда обычно представлена брекчированными не окремненными (или слабо окремненными) терригенными породами с рассеянной сульфидной вкрапленностью. Вниз по разрезу обогащенные золотом породы сменяются джаспероидами, содержания золота в которых редко превышают 0,3–0,5 г/т.

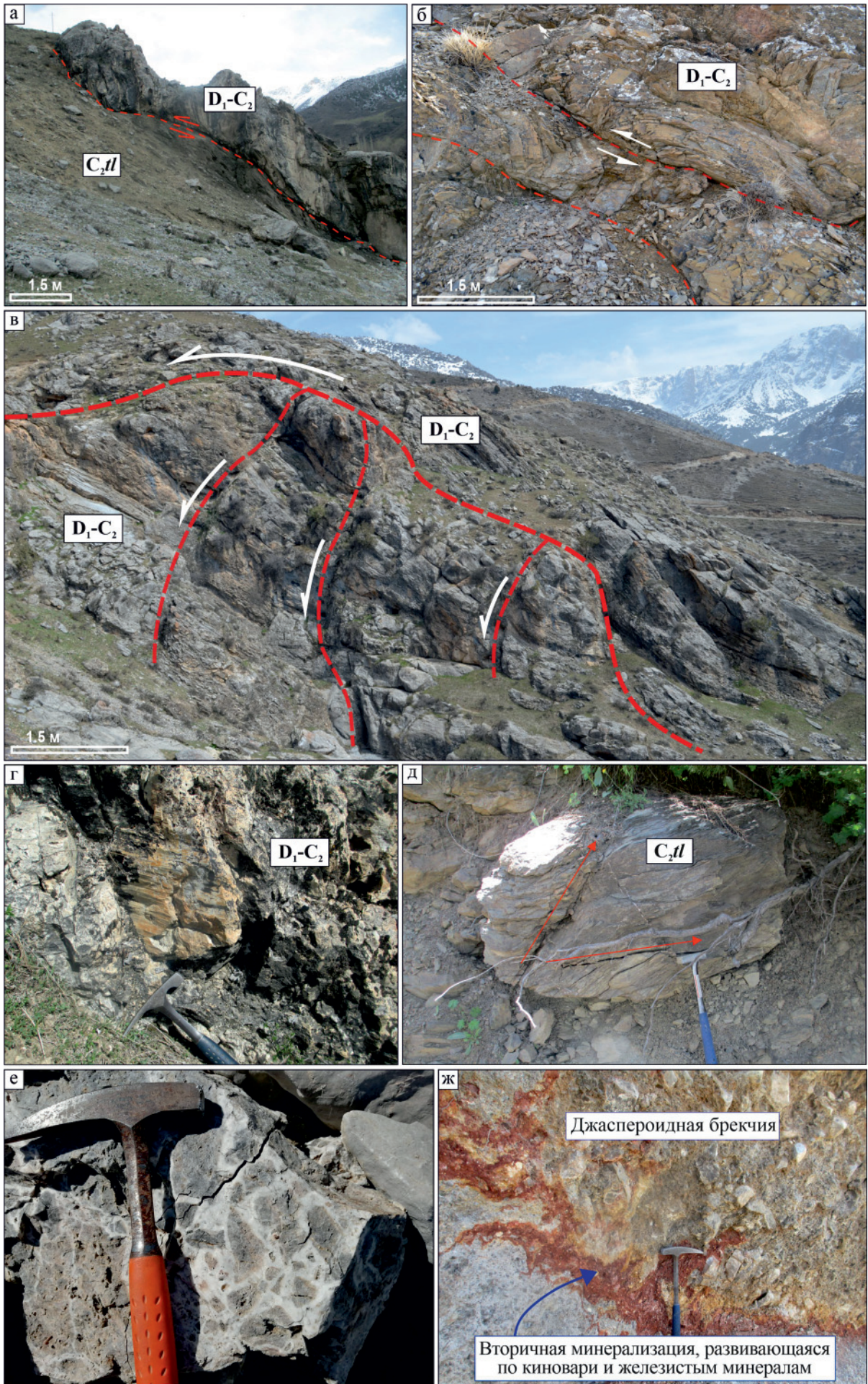
### **Структурный контроль и пространственное соотношение сурьмяно-ртутного и золото-сульфидного оруденений**

Наглядная пространственная приуроченность обоих типов руд, на наш взгляд, обусловлена четким структурным контролем со стороны плоскости разлома и интенсивностью тектонических и гидротермально-метасоматических преобразований пород.

Исходя из полевых наблюдений, детального изучения отчетных карт и документации пробуренных скважин, мы пришли к выводу, что одним из рудоконтролирующих параметров является ориентация плоскости надвига в пространстве. Как выяснилось, положение плоскости сместителя в пределах месторождения неодинаково и в зависимости от «пологости» надвига мощность метасоматитов и, соответственно, интенсивность Sb-Hg оруденения может варьировать. Так, на западном участке месторождения плоскость сместителя близка к вертикальной, и в данном случае джаспероиды практически не развиты. По-видимому, это связано с тем, что при подобной ориентации перекрывающего по надвику флюидоупора (терригенная толща) не происходит экранирования и локализации кремне содержащих и рудных гидротерм, они мигрируют по разломной зоне, практически не подвергая изменениям вмещающие толщи.

Ближе к центральному (Опорному) участку плоскость сместителя выполаживается, и вместе с тем заметно возрастает мощность джаспероидных тел (до 20 м), и они становятся более выдержанными. Сурьмяно-ртутное оруденение в джаспероидах Опорного участка также проявлено более интенсивно.

Выборочное (узловое) проявление золото-сульфидных руд, по всей видимости, также следствие неоднородной тектонической и гидротермальной переработки пород, которые контролируются поведением плоскости сместителя. Из общего числа скважин, линейно заложенных вдоль оси месторождения, только в половине отмечены содержания золота более 1 г/т. Большая часть этих скважин имеет стандартное строение по типу скв. С-29, где на контакте известняков и терригенных пород развиты джаспероидные брекчии, а содержания золота отмечены выше плоскости надвига, в по-



### Рис. 3. Тектонические дислокации в осадочных толщах

а – пластина доломитистых известняков, надвинутая по плоскости взброса на толубайскую толщу; б–г – дислокации внутри пластины известняков: б – взбросовые, в – сбросовые, г – зеркала скольжения; д – расланцевание и две системы кливажных трещин в терригенных породах; е – джаспероидная брекчия без рудной минерализации; ж – джаспероидная брекчия с железисто-ртутной минерализацией

дошвенной зоне терригенной толщи [18]. Породы этой «обогащенной» зоны часто графитизированы, брекчированы, разбиты карбонатными и реальгар-аурипигментовыми прожилками и практически не окремнены.

Несколько скважин, в которых отмечены повышенные содержания золота, пробурены на западном участке месторождения, где плоскость сместителя имеет субвертикальное положение. В этом случае скважины вскрывают такую последовательность пород: отложения толубайской свиты → брекчированные отложения толубайской свиты → брекчированные известняки → массивно-слоистые известняки. Повышенные содержания золота в этих случаях приурочены к брекчированным терригенным породам, в которых также иногда отмечаются графитизация и поздняя мышьяковистая минерализация.

Таким образом, в толщах терригенных пород, перекрывающих известняки по плоскости надвига, происходили перераспределение и аккумуляция золота в виде золото-сульфидного оруденения. Вероятнее всего, этому способствовало, во-первых, тектоническое преобразование пород вблизи плоскости надвига, а во-вторых, возможно, гидротермальное изменение, связанное с ранними этапами джаспероидизации.

### Минеральный состав руд и последовательность их формирования

Всего на месторождении Чаувай установлено более 20 рудных минералов. К числу главных рудообразующих минералов относятся киноварь, антимонит, пирит, второстепенных – реальгар, аурипигмент, реже встречаются арсенопирит, марказит и др. Для месторождения Чаувай нами установлены два типа руд, которые были названы в соответствии с преобладающими в них элементами или минералами: 1) сурьмяно-ртутные, представляющие собой главный объект добычи на месторождении; 2) золото-сульфидные, имеющие здесь подчиненное значение.

### Типы руд

*Ртутно-сурьмяное оруденение* выражено в джаспероидных брекчиях и представлено киноварью и антимонитом. Как правило, руды относятся к прожилковым и вкрапленным типам; минерализация в подавляющем большинстве случаев проявлена в цементе джаспероидных брекчий, что свидетельствует о более позднем ее формировании относительно джаспероидных тел. Сопутствует Sb-Hg рудам низкотемпературная мышьяковистая минерализация (реальгар и аурипигмент).

*Золото-сульфидные руды* – мелкозернистые вкрапленные, прожилково-вкрапленные с содержанием сульфидов не более 1–3 %. Сульфиды присутствуют во всем разрезе толубайской свиты, обычно в виде тонкой (от 5–10 до 500–700 мкм) вкрапленности в локальных горизонтах песчаников и алевролитов. Однако содержания золота 0,2–5 г/т [18] отмечаются только в подошвенной части терригенной пластины, где породы толубайской свиты наиболее тектонически и гидротермально преобразованы.

Макроскопически видимое самородное золото в рудах месторождения не установлено и идентифицируется исключительно по данным пробирного анализа скважин колонкового бурения. Поскольку изучение плоскополированных аншлифов также не позволило выявить его присутствие, то мы предполагаем, что золотая минерализация представлена золотосодержащими сульфидами, где золото наблюдается либо в виде наночастиц, сорбированных на сульфидах, либо в химически связанном виде. Доминирующим сульфидным минералом в рудах данного типа является пирит, в подчиненном количестве встречается арсенопирит, изредка марказит.

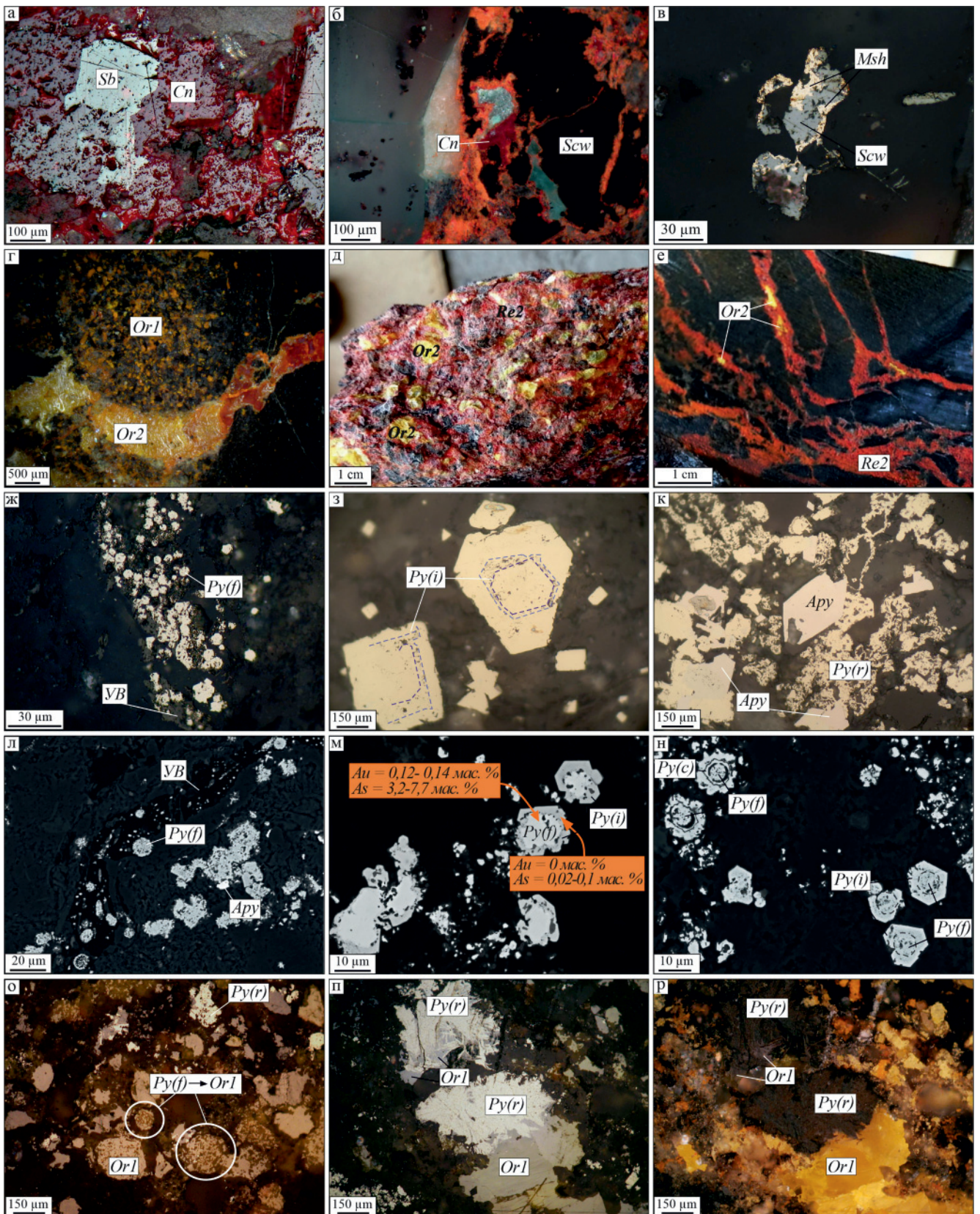
### Типоморфные особенности основных минералов Hg-Sb руд

*Антимонит* – один из наиболее распространенных сульфидных минералов. Он часто находится в сростании с киноварью (рис. 4, а), иногда слагает микровключения в арсенопирите. Образует агрегаты различной зернистости (от первых мкм до нескольких см). Нередко замещается оксидами и гидроксидами сурьмы вплоть до образования псевдоморфоз. Количество антимонита различно: от единичных зерен и микровключений в других минералах до мономинеральных прожилков.

*Киноварь* также весьма распространена в Hg-Sb рудах. Аналогично антимониту образует различные по размеру агрегаты. Встречается в виде сростаний с антимонитом и ртутьсодержащими блеклыми рудами (швацитом) (см. рис. 4, б).

*Швацит* встречается редко. Образует гнезда размером до 1 см и мелкие одиночные зерна. Наиболее характерны сростания с киноварью.

*Ртутистое серебро* (мошелландсбергит) в отраженном свете имеет розовато-желтый цвет и встречается в сростании с ртутными блеклыми рудами. Образует тонкие каймы вокруг зерен (см. рис. 4, в) и развивается по трещинкам в блеклой руде. Такие специфические формы выделения свидетельствуют о выпадении ртутистого серебра за счет гипергенного изменения блеклой руды.



Аурипигмент и реальгар слагают низкотемпературную ассоциацию, сменяющую более высокотемпературную стадию Hg-Sb минерализации. Оба минерала всегда сопутствуют друг другу и развиты в областях брекчирования и окварцевания пород. Мышьяковистая минерализация распространена исключительно в надрудных терригенных отложениях толубайской свиты, где эти сульфиды представлены

двумя основными генерациями: 1) разноориентированными прожилками, 2) вкраплениями в слоистых песчаниках (см. рис. 4, г). Биминеральные и мономинеральные прожилки наиболее широко развиты в зонах дислокаций, где реальгар-аурипигментовые агрегаты цементируют обломки пород, придавая им брекчевидную текстуру (см. рис. 4, е). Формы выделения в виде вкрапленности также



**Рис. 4.** Типоморфные особенности минералов Hg-Sb и золото-сульфидных руд

а – сростание антимонита и киновари; б – сростание киновари и швацита; в – ртутистое серебро (мошелландсбергит), развивающееся по краям зерна швацита; г – две генерации аурипигмента: вкрапленность в слоистом песчанике (Or1) и секущий прожилок (Or2); д – гнезда аурипигмента в зернистом агрегате реальгара; е – поздняя генерация реальгара, обрастающая более ранний аурипигмент; ж – фрамбоидальный пирит в реликтах углистого вещества; з – идиоморфный пирит с зональной микроструктурой (зоны роста трассируются скоплениями частиц нерудного вещества); к – сростание реликтового пирита и арсениопирита; л – скопление фрамбоидов пирита в углистом веществе (BSE); м – зональное строение зерен пирита: высокомышьяковистое фрамбоидное ядро в кайме идиоморфного пирита (BSE); н – обрастание фрамбоидов кокардовым (радиальным) пиритом двух генераций (в левом верхнем углу) и зерна идиоморфного пирита с фрамбоидами в ядре (в правом нижнем углу) (BSE); о – псевдоморфозы аурипигмента по фрамбоидальному пириту; п – структуры замещения пирита аурипигментом; р – изображение (п) в скрещенных николях; Sb – антимонит, Sp – киноварь, Scw – швацит, Msh – мошелландсбергит, Or1 – аурипигмент, замещающий пирит, Or2 – жильный/зернистый аурипигмент, Re2 – жильный/зернистый реальгар, Py(f) – фрамбоидальный пирит, Py(i) – идиоморфный пирит, Py(r) – реликтовый пирит, Ау – арсениопирит, УВ – углистое вещество

широко проявлены вблизи зон дробления, где данные минералы замещают ранее образованный пирит (см. рис. 4, о–р). Иногда в сплошных зернистых и жильных выделениях наблюдаются реликтовые зерна реальгара, окруженные более поздней генерацией аурипигмента (см. рис. 4, д, е). Это связано с процессами изменения реальгара в приповерхностных условиях и постепенным его замещением аурипигментом.

Также стоит отметить, что примерно в 30 % скважин, вскрывающих горизонты с кондиционными содержаниями золота, наиболее высокие его содержания сопутствуют интенсивному развитию реальгар-аурипигментовой минерализации в «черносланцевой» зоне терригенных пород.

*Нерудные минералы* представлены в основном кварцем, метасоматическим кремнеземом, кальцитом, флюоритом, изредка баритом.

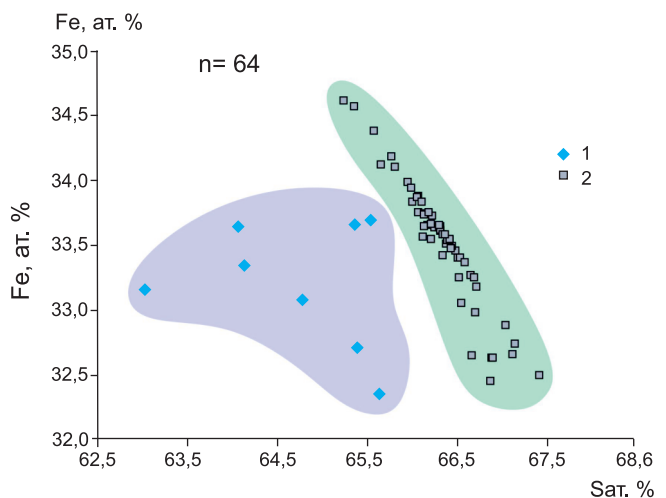
**Типоморфные особенности основных минералов золото-сульфидных руд**

*Пирит* наиболее распространен в рудах данного типа. Нередко находится в сростании с арсениопиритом, замещается аурипигментом, реальгаром, иногда отдельные зерна цементируются киноварью. На месторождении представлен двумя основными морфологическими разностями: фрамбоидами (см. рис. 4, ж, л) и идиоморфными кристаллами (см. рис. 4, з). Фрамбоиды представляют собой наиболее ранние генерации пирита, образованного в рыхлом осадке при участии бактерий. Идиоморфный пирит отвечает более поздним гидротермальным генерациям и часто обладает ярко выраженной зональной микроструктурой. Также нередко идиоморфные кристаллы содержат реликтовое фрамбоидальное ядро (см. рис. 4, м, н), что свидетельствует о последовательной смене генераций. Помимо этого, пирит часто встречается в виде реликтов (см. рис. 4, к, о–р), кокардовых нарастаний (см. рис. 4, н) на ранее образованных фрамбоидах или мелких кристаллах.

По химическому составу пирит неоднороден (рис. 5). Вся выборка составов пирита образует два поля: одно отвечает составу пирита, близкому к теоретическому, в то время как во второе попадают пи-

риты с повышенным содержанием мышьяка. Для последних характерен дефицит серы, замещаемой мышьяком, содержание которого может достигать до 6,7 мас. %. В таких «мышьяковистых» пиритах методом SEM установлены наибольшие содержания золота (от 0,18 до 0,85 мас. %). Во всех случаях повышенные концентрации золота приурочены к ядерным частям зональных кристаллов, где чаще всего ядро представлено реликтами фрамбоидов (см. рис. 4, м). Полученные результаты указывают на наличие в пирите повышенных концентрации золота, но, к сожалению, установить количественные (достоверные или значимые) его содержания не представляется возможным ввиду применяемых методов. Но в то же время можно с уверенностью предполагать, что именно пирит является основным минералом – концентратором золота в рудах и, вероятнее всего, его мышьяковистая разновидность.

В свою очередь микрорентгеноспектральный анализ не выявил какой-либо отчетливой динамики содержания золота в тех или иных частях кристаллов. Золото (от 0,07 до 0,14, в среднем 0,04 мас. %) встречается как в ядерных частях, так и во внешних каймах примерно с равной частотой. Помимо этого,



**Рис. 5.** Вариации состава пирита в исследованных образцах, по данным EMPA

Пирит: 1 – «мышьяковистый» (As 1,24–6,7 мас. %), 2 – стехиометрический (As до 0,77 мас. %)



отмечены постоянные примеси никеля, меди, мышьяка, изредка сурьмы.

*Арсенопирит* по частоте встречаемости резко уступает пириту. Иногда образует собственные кристаллы (см. рис. 4, к), но чаще всего отмечается в сростании с идиоморфным пиритом или нарастании на него в виде кайм. Размер индивидов не превышает 350 мкм. В ассоциациях с киноварью и антимонитом часто содержит микровключения антимонита. Содержания золота не обнаружены ни одним из ранее перечисленных аналитических методов.

*Марказит* встречается редко и приурочен к гидротермально-измененным породам, часто ассоциирует с аурипигментом и реальгаром. Слагает удлиненные зерна и маломощные прожилки в брекчированных породах. Содержания золота не обнаружены ни одним из ранее перечисленных аналитических методов, как и в арсенопирите.

*Нерудные минералы* представлены кварцем и кальцитом.

### Особенности гидротермально-метасоматических изменений вмещающих пород

*Джаспероидизация.* Особенности этих процессов на месторождении Чаувай изучались по материалам скважин колонкового бурения, заложенных в 2017–2018 гг. в рамках буровой разведывательной программы. Важную роль играли параметры заложения скважин, согласно которым входной угол задавался так, чтобы ствол проходил через неизменные терригенные породы с подсечением тектонического контакта с известняками, где развиты джаспероиды, и уходил в неизменные известняки в забое. Таким образом обеспечивалась максимальная информативность керна.

Препараты (плоскополированные шлифы) были изготовлены из керна скв. С-29 на Опорном участке (см. рис. 2). Образцы для препаратов отбирались в соответствии с данными пробирного опробования скважины [18], которое проводилось с целью определения границ продуктивных золотосодержащих интервалов. По данным опробования большинства скважин (включая С-29) повышенные содержания золота отмечены только вблизи зоны надвига, где они могут достигать 5 г/т.

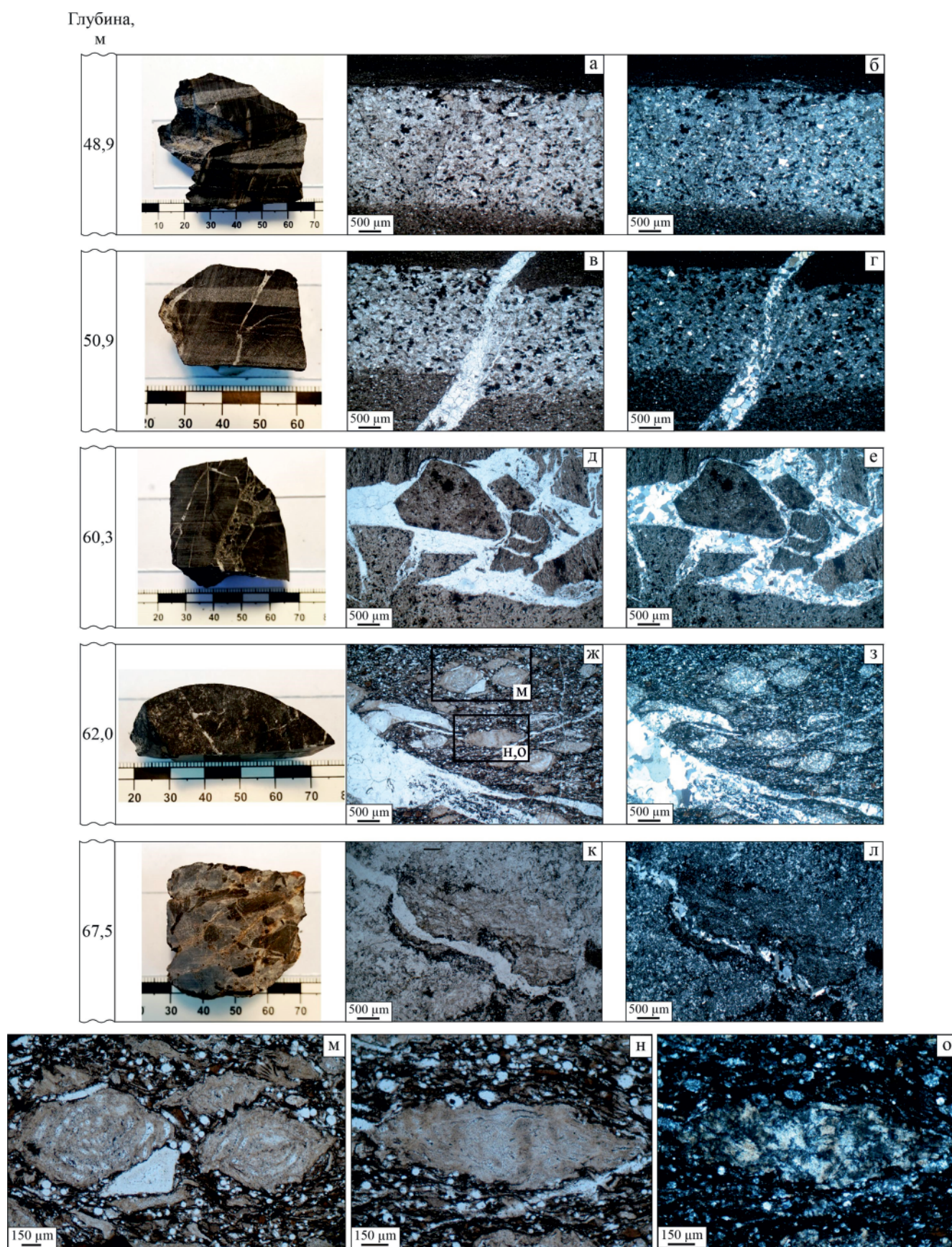
В интервале от устья скважины до глубины 48 м керн слагают однотипные неизменные и карбонатно-терригенные породы толубайской свиты, не содержащие золота. Начиная с гл. 48,9 м отмечены содержания Au до 2 г/т, при этом внешне породы ничем не отличаются от залегающих выше по разрезу неизменных терригенных образований. Керна скважины с этой отметки представлен переслаивающимися средне-мелкозернистыми песчаниками, алевролитами и аргиллитами (рис. 6, а, б) с примесью карбонатных разнозернистых обломков (от 0,25 до 0,025 мм).

С глубиной породы все чаще разбиты кварцевыми прожилками или брекчированы и «залечены» кварцем (см. рис. 6, в, г). На гл. 60,3 м ствол скважины пересекает горизонт брекчий (см. рис. 6, д, е), состоящих из обломков неизменных терригенных пород и кварцевого цемента. Содержания золота в них не превышают 0,26 г/т. Начиная с гл. 62 м отмечена частичная джаспероидизация пород (см. рис. 6, ж, з), что выражено окремнением фораминифер надотряда *Fusulinoida* [11], распространенных в данных отложениях (см. рис. 6, м–о).

Фораминиферы сыграли ведущую роль в возрастном датировании флишевых отложений, распространенных в Южном Тянь-Шане, включая и толубайскую свиту, возраст которой оценивается как раннемосковский (С<sub>2</sub><sup>2</sup>) [6]. Помимо крупных (~500 мкм) представителей отряда *Ozawainellida Solovieva, 1980(?)* с характерной ромбовидной раковиной (см. рис. 6, м) и *Fusulinida Fursenko, 1958(?)* с более вытянутой раковиной с волнистой поверхностью (см. рис. 6, н, о), в породе присутствуют многочисленные мелкие индивиды, также метасоматически замещенные кварцем. В шлифе они выглядят как равномерно распределенные по породе сфероидальные, иногда слегка уплощенные агрегаты мелкозернистого кварца и, скорее всего, представляют собой поперечные сечения раковин тех же фузулинид.

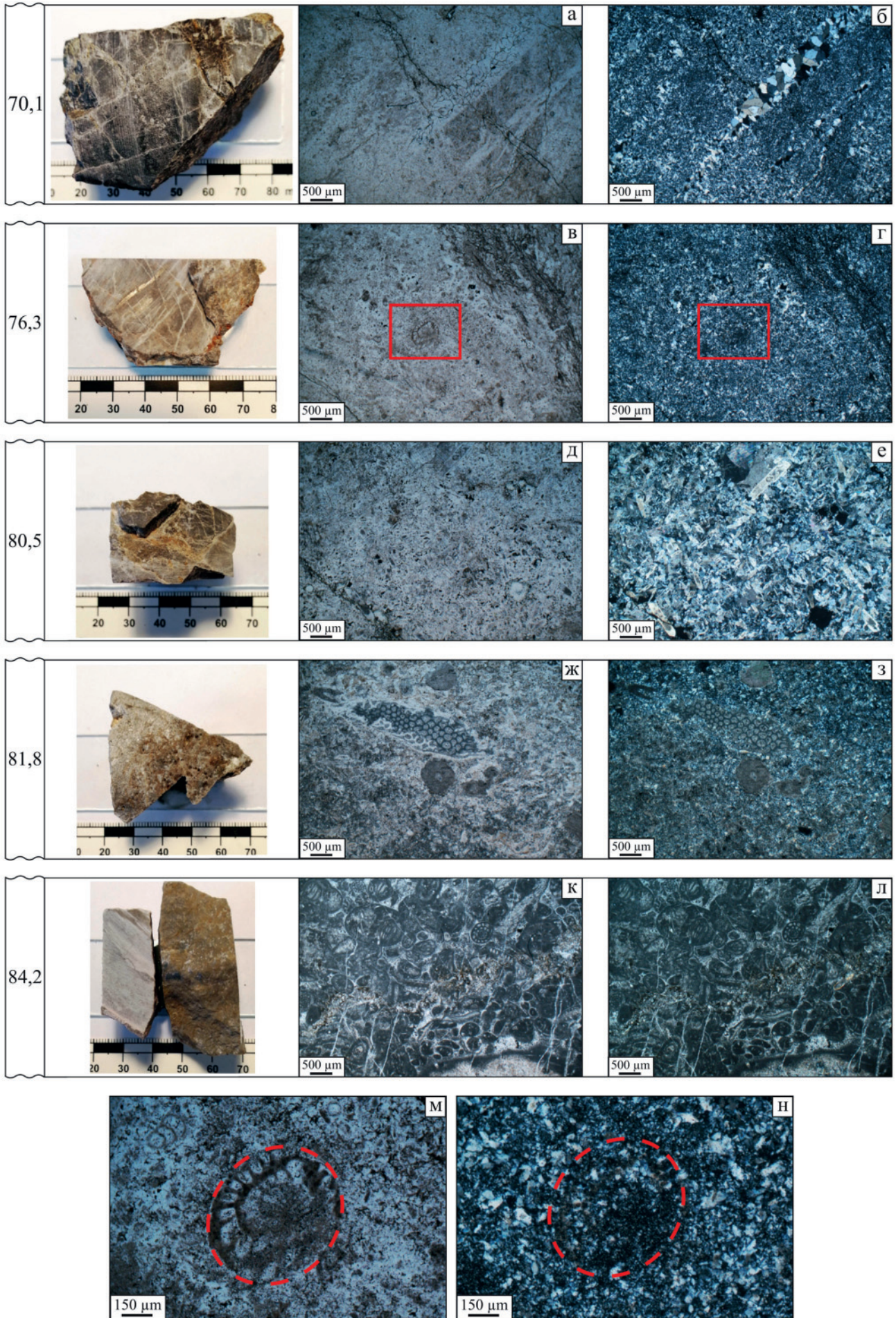
Ниже по разрезу частично окремненные брекчии сменяются полностью джаспероидизированными (см. рис. 6, к, л), где обломки замещены тонкозернистым кварцем. Такие кремнистые брекчии представляют собой джаспероиды по терригенным породам. В них можно различить тонкозернистый матрикс, цементирующий неоднородно окварцованные обломки пород, а также поздние секущие кварцевые прожилки. Такие текстурно-структурные особенности говорят о многостадийности процессов джаспероидизации.

Мощность джаспероидов по терригенным породам на Опорном участке варьирует от 5 до 10 м и служит индикатором «контактной» зоны между терригенно-карбонатными породами толубайской свиты и известняками Алайского разреза, поскольку брекчированные и джаспероидизированные терригенные породы сменяются брекчированными и джаспероидизированными известняками (рис. 7). Эти метасоматиты, как правило, имеют более светлую окраску, чем джаспероиды по терригенным породам, в них угадывается массивная текстура, унаследованная от известняков, нередко можно различить крупные псевдоморфозы по фоссилиям (см. рис. 7, м, н). Эти породы чаще всего однородны, иногда разбиты кварцевыми прожилками (см. рис. 7, а, б), содержат разнообразные органические остатки (см. рис. 7, в, г) в тонкокристаллической основной массе. Остатки представлены мелкими (0,02–0,1 мм) комками и сгустками микро- и скрытокристаллической структуры водорослевого



**Рис. 6.** Изменение степени окварцевания терригенных пород по мере приближения к контактовой зоне (слева – фотография каменного образца, из которого изготовлен соответствующий шлиф; изображения б, г, е, з, л, о соответствуют изображениям а, в, д, ж, к, н в скрещенных николях)

а–г – неизменные породы; д, е – неизменная брекчированная порода; ж, з – частично окварцованная брекчированная порода; к, л – джаспериодизированная порода; м–о – ископаемые остатки фораминифер: м – представители отряда *Ozawainellida* Solovieva, 1980(?), н, о – отряда *Fusulinida* Fursenko, 1958(?)





**Рис. 7.** Снижение степени окварцевания известняков по мере удаления от контактовой зоны (слева – фотография каменного образца, из которого изготовлен соответствующий шлиф; изображения б, г, е, з, л, н соответствуют изображениям а, в, д, ж, к, м в скрещенных николях)

а–г – джаспероиды по известнякам; д, е – джаспероид с гнездами крупнозернистого кальцита; ж, з – частично окремененный известняк с реликтами фоссилий; к, л – неизменный известняк алайского типа разреза; м, н – поперечный срез криноидеи, метасоматически замещенной кремнеземом

происхождения. В некоторых обломках встречаются слойчатоподобные обособления и прожилки бурого цвета, маркированные глинистым и органическим веществом. Исходный известняк полностью замещен мелкозернистым до скрытокристаллического кварцем и, вероятно, халцедоном. На поверхности кристаллов кварца присутствует тонкий пылевидный карбонатный материал.

Джаспероиды по известнякам на месторождении Чаувай развиты более масштабно и превосходят по мощности джаспероидизированные терригенные породы. В пределах Опорного участка их мощность варьирует в среднем от 10 до 20 м. В этих породах широко проявлено ртутно-сурьмяное оруденение, представленное киноварью и антимонитом. Содержания золота в джаспероидизированных известняках не превышают 0,2 г/т, а в остальных скважинах чаще всего близки к нулю.

Вниз по разрезу джаспероиды сменяются частично окварцованными известняками (см. рис. 7, д, е), не содержащими золота. Порода, отобранная с гл. 80,5 м на 90–95 % состоит из кремнезема, основная масса которого представлена разноориентированным удлиненно-призматическим кварцем. В кристаллах ярко выражена зональность, которая трассируется пылевидным карбонатным материалом. Также присутствуют мелкие изометричные кварцевые зерна и скрытокристаллические формы кремнезема. В породе отмечены гнезда от мелко- до крупнозернистого (перекристаллизованного) кальцита (~5–10 %), который, вероятно, не успел раствориться из-за снижения активности процессов джаспероидизации. В образце с гл. 81,8 м (см. рис. 7, ж, з) широко распространены реликты фоссилий (80 % от общего объема), сложенные первичным карбонатом и окруженные матриком из смеси метасоматического кремнезема и мелкозернистого до пылевидного карбонатного материала.

Забой скважины на гл. 84 м (см. рис. 7, к, л) уходит в неизменные темно-серые органогенные известняки, на 95 % сложенные различными ископаемыми остатками морской фауны, которые сцементированы тонкозернистым кальцитом, заполняющим пространство между фоссилиями разного размера (0,05–2 мм). Различие известняков и джаспероидов по цвету обнаружено только при изучении в шлифе. Оно может быть обусловлено «высветлением» известняков в процессе джаспероидизации и отгонки органики в перекрывающие породы [12].

Представленный петрографический разрез наглядно отображает картину околорудной зонально-

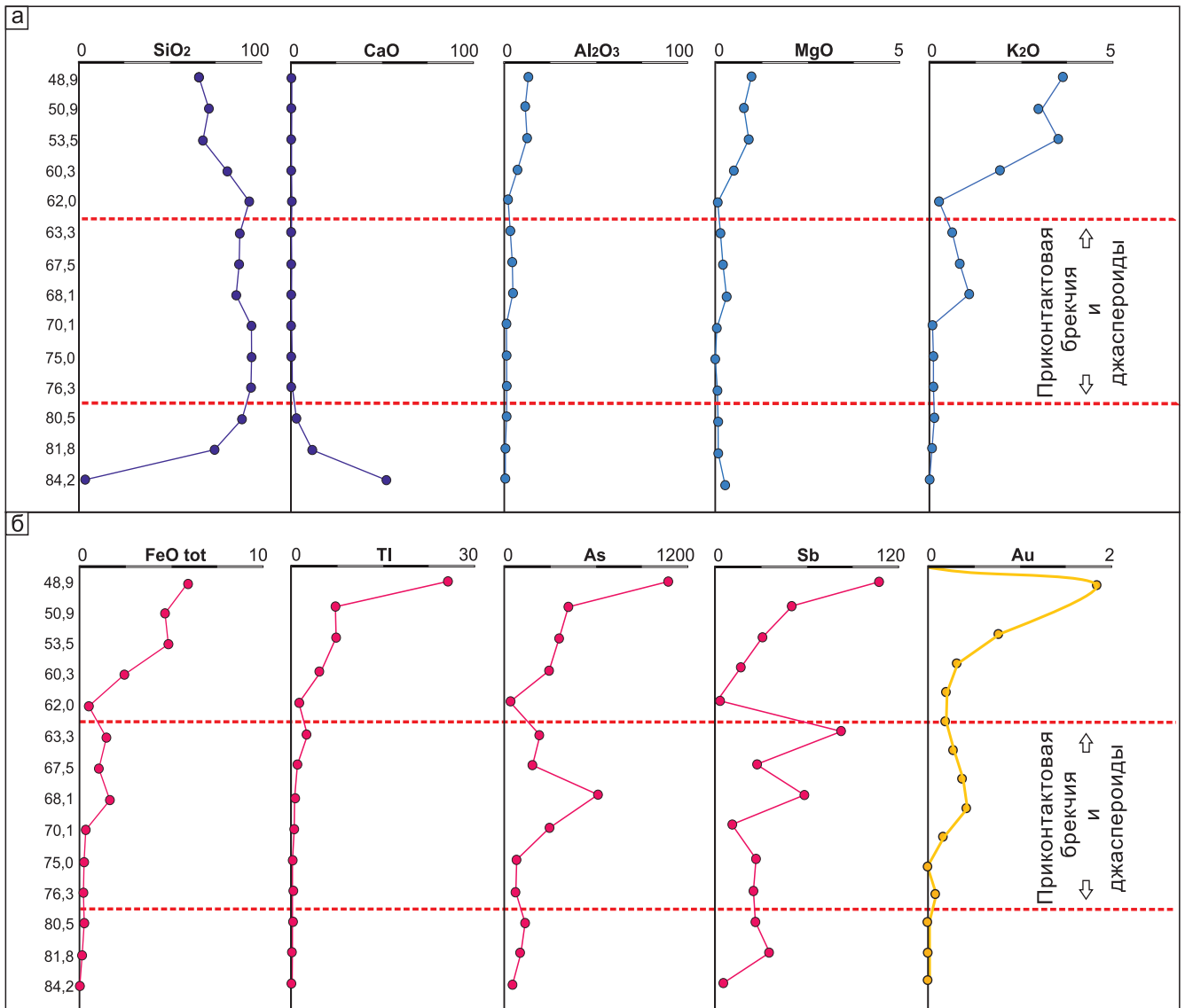
сти [9], которая в общем выглядит следующим образом. Осевая часть представляет собой поверхность надвига, где проявлена максимальная степень джаспероидизации пород (примерно в инт. 63–80 м), как правило, приуроченной к кровельной части известняков. Здесь породы подвергались интенсивному выщелачиванию, растворению и замещению кремнеземом. В терригенных породах всяческого блока также отмечается маломощная зона выщелачивания (инт. 63–68 м) и окварцевания.

Далее на обоих флангах от плоскости сместителя следуют зоны умеренного выщелачивания (62–48,9 и 80,5–81,8 м). Для них характерно наложение вторичного кальцита, мигрирующего из зоны джаспероидизации. Кальцит в этом случае образует систему многочисленных разноориентированных жил и просечек в породах обоих типов. В скв. С-29 это не отображено, но данная тенденция отчетливо наблюдается в других изученных скважинах.

Выше зоны умеренного выщелачивания в породах всяческого блока формируется зона так называемых черных сланцев или углисто-глинистых терригенных пород [13], которые, вероятно, образовались при участии растворенного органического вещества, перемещенного гидротермами из подстилающих известняков в процессе их джаспероидизации. Породы этой зоны часто обогащены углеродистым веществом, имеют характерный черный цвет, графитовидный блеск на сколах, низкую твердость и оставляют мажущий след на руках.

Внешняя, самая удаленная зона изменения терригенных пород всяческого блока характеризуется минералами последних оставшихся компонентов, «отгоняемых» из зоны выщелачивания. Щелочи фиксируются по наличию серицита, железо и сера – по гидротермально-метасоматическому пириту, марказиту и арсенопириту, оставшаяся часть органики – по черному углеродистому веществу [13].

По мере удаления от зоны тектонического контакта наблюдаются закономерные изменения в поведении петрогенных и рудных компонентов (рис. 8, а, б). Содержание кремнезема в породе снижается скачкообразно при переходе из контактовой зоны джаспероидов в массивные известняки. Вместе с этим содержание CaO резко возрастает при движении из метасоматической зоны выщелачивания в неизменные известняки. Для остальных компонентов ( $Al_2O_3$ , MgO,  $K_2O$ , FeOtot) характерно относительно постепенное снижение содержаний от терригенных пород к джаспероидам и известнякам. Содержание рудных (Au, Sb) и элементов-индикаторов (Tl, As) в породе резко возрастает в при-



**Рис. 8.** Распределение петрогенных (а) и рудных (б) элементов в породах в инт. 48,9–84,2 м [9, 18] (содержание  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{FeO}_{\text{tot}}$  в мас. %,  $\text{TI}$ ,  $\text{As}$ ,  $\text{Sb}$ ,  $\text{Au}$  в г/т)

контактной зоне, отмечаются также повышенные содержания в зоне джаспероидов. Так, в данной скважине содержания *золота* изменяются от 0 до 1,98 г/т (в среднем 0,4 г/т) [18], *сурьмы* от 6,2 до 109 г/т (39 г/т), *таллия* от 0,05 до 30 г/т (4,25 г/т), *мышьяка* от 45 до 1100 г/т (291 г/т).

**Сульфидизация и источник золота.** В ходе изучения руд были выявлены различные морфологические типы пиритов и в соответствии со спецификой образования каждого типа было сделано предположение, что процессы сульфидизации в пределах месторождения протекали в несколько стадий: 1) раннедиагенетическую, 2) позднедиагенетическую, 3) катагенетически-гидротермальную.

Первая, раннедиагенетическая стадия сульфидизации связана с ростом концентраций пирита (реже марказита) в осадках ранее существовавшего бассейна. Пирит представлен фрамбоидами и изредка мелкими (до 30 мкм) идиоморфными кристаллами. Эти ранние генерации широко распространены в верхней части разреза толубайской

свиты и практически отсутствуют в нижней ее части, что может быть связано с поздними приконтактовыми изменениями пород [8]. Породы, которые значительно обогащены фрамбоидальным пиритом, всегда содержат и остатки органического вещества, преобразованного в углистое вещество, битумы или их реликты, что также свидетельствует в пользу диагенетической природы его образования.

Вторая стадия сульфидизации протекала на фоне позднего диагенеза, когда при погружении и уплотнении осадок литифицировался, а вместе с ним преобразовывались и ранее сформированные сульфиды. На этой стадии часть фрамбоидов перекристаллизовывалась с образованием идиоморфных кристаллов пирита, а часть просто служила своего рода затравкой, на которую нарастал субидоморфный и нодулярный пирит. При этом в ядре сохранялись реликты фрамбоидов или их скоплений.

Завершающая стадия сульфидизации связана с процессами катагенеза и раннего метаморфизма, которые объединяются в катагенетически-гидротер-

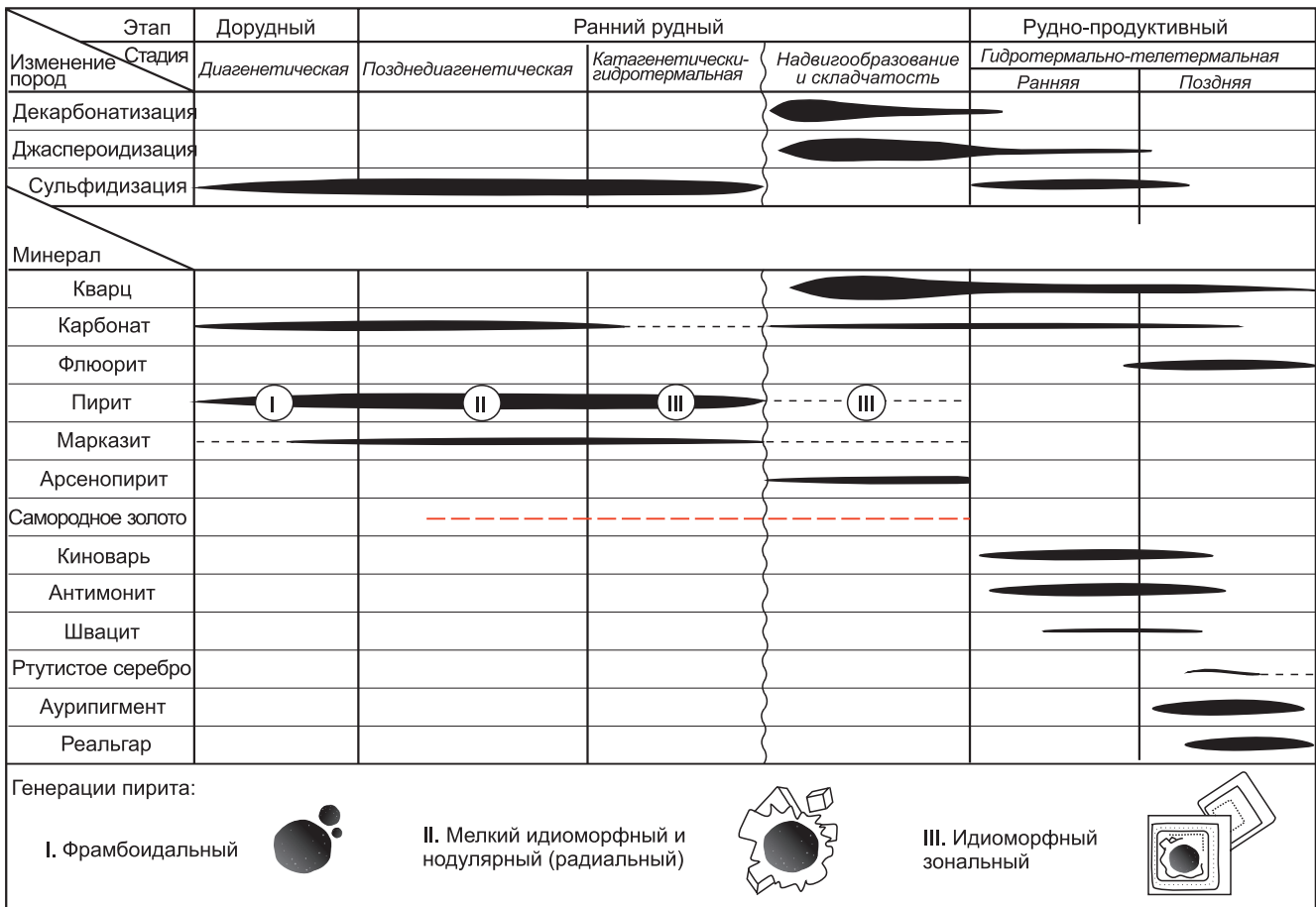


Рис. 9. Схема последовательности процессов изменения вмещающих пород и минералообразования на месторождении Чаувай

мальную стадию. В этот период породы активно преобразовывались под действием минерализованных поровых вод, а позднее, с началом процессов джаспероидизации частично могли подвергаться воздействию телетермальных растворов. В эту общую стадию кристаллизовался гидротермальный пирит, который нарастал на предыдущие генерации или замещал их. Такой пирит представлен хорошо оформленными кристаллами, рассеянными в слоях породы, или агрегатами, выполняющими прожилки и просечки в породе. Нередко внешние зоны кристаллов пирита обогащены мышьяком, вплоть до образования арсенопиритовых кайм, что говорит о доминирующей роли мышьяка на завершающих этапах рудоотложения.

Таким образом, на месторождении Чаувай процессы сульфидизации протекали в несколько стадий, для каждой из которых характерна кристаллизация того или иного морфологического типа пирита. Учитывая результаты исследования золотосодержащих сульфидов, мы придерживаемся концепции сингенетичного источника золота в золото-сульфидных рудах месторождения Чаувай.

### Последовательность формирования минеральных парагенезисов

Формирование минеральных ассоциаций месторождения Чаувай проходило в три этапа: дорудный, ранний рудный и рудно-продуктивный (рис. 9).

Дорудный этап характеризуется ростом фрамбоидального пирита в раннедиагенетическую стадию. В свою очередь, ранний рудный этап состоит из трех стадий: позднедиагенетической, катагенетически-гидротермальной и тектонической (покровно-складчатой). Первые две стадии связаны с ранее существовавшим Туркестанским бассейном, а последняя – с его закрытием и образованием покровно-складчатой структуры.

В первую, позднедиагенетическую стадию происходило частичное растворение фрамбоидального пирита и его переотложение в виде нодулярных (радиальных) скоплений или мелких идиоморфных зерен. Во вторую стадию развивался преимущественно гидротермальный идиоморфный пирит, при этом имели место вариации состава минералообразующей среды, что выражено в каймах и зонах, слагаемых мышьяковистым пиритом и арсенопиритом. В последнюю стадию ведущую роль играли внутриформационные преобразования пород на фоне надвигообразования и складчатости. Эти преобразования прежде всего связаны с декарбонатизацией и джаспероидизацией вмещающих пород. В данный период не происходило существенного отложения рудных минералов.

Исходя из комплекса проведенных исследований, можно судить о том, что обогащение золотом происходило на позднедиагенетической и катаге-

нетически-гидротермальной стадиях, поскольку содержания золота, спорадически встречающиеся в кристаллах пирита, приурочены либо к фрамбоидальным (ядерным) частям кристаллов, либо к идиоморфным разностям, особенно с выраженной зональной микроструктурой. Ввиду этого этап, в который входят вышеперечисленные стадии, обозначен нами как ранний рудный.

Рудно-продуктивный этап характеризуется формированием более поздних по отношению к золотой минерализации Hg-Sb руд и сопутствующей мышьяковистой минерализации. Так как главным объектом добычи на месторождении являются Hg-Sb руды, под рудным этапом нами подразумевается время образования именно Hg-Sb минерализации. Этот этап делится на две стадии образования минеральных ассоциаций: раннюю и позднюю. Ранняя стадия характеризуется отложением основной массы киновари и антимонита и, возможно, частично блеклой руды. В позднюю стадию формировалась мышьяковистая минерализация – реальгар и аурипигмент, отложение последних порций блеклой руды и ее дальнейшее гипергенное изменение, выраженное обособлением ртутистого серебра.

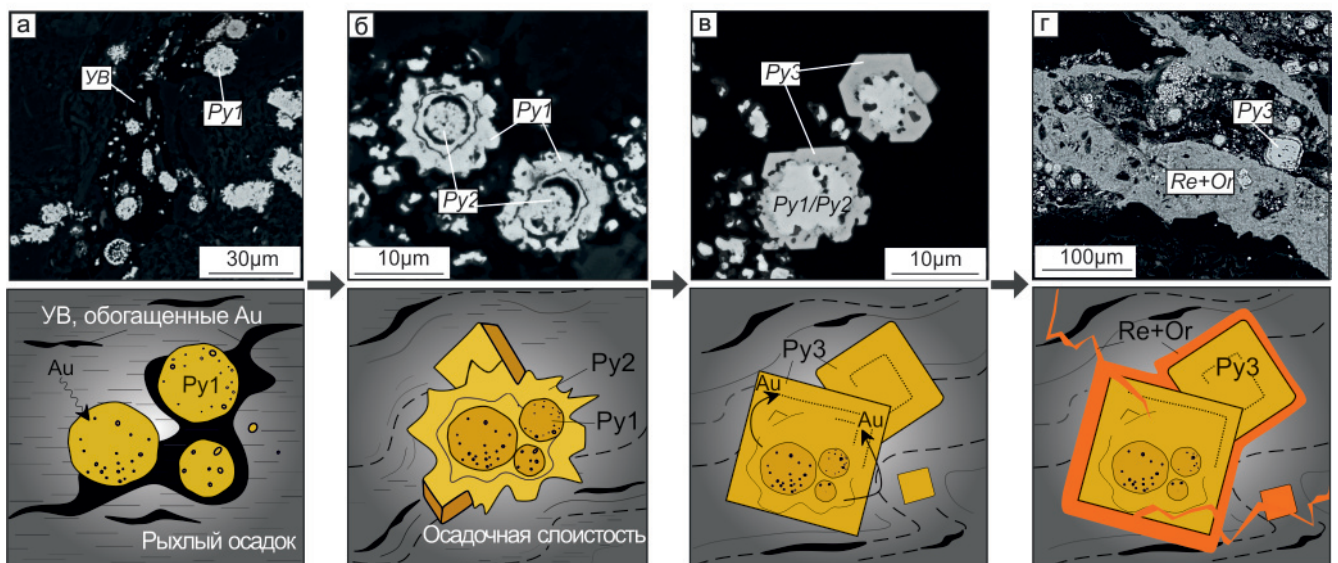
**Обсуждение результатов**

Sb-Hg месторождения джаспероидного геолого-промышленного типа генетически классифицируются как телетермальные [13]. Одним из главных факторов рудоотложения является складчато-надвиговая структура залегания определенных типов пород, когда вдоль плоскости крупных разломов-надвигов формируются рудные залежи. За счет тектонического перекрытия проницаемых карбонатных пород глинисто-терригенными толщами создается

эффект экранирования, особенно ярко выраженный в ядрах и крыльях антиклинальных складок. На месторождении Чаувай формирование покровно-складчатой структуры не только сыграло ведущую роль в образовании сурьмяно-ртутного оруденения, но и способствовало развитию золоторудной минерализации.

По нашему мнению, формирование Sb-Hg золотосодержащего месторождения Чаувай началось еще в середине каменноугольного периода с накопления осадков толубайской толщи. По всей массе данных отложений развит фрамбоидальный пирит, в котором, судя по результатам исследований, спорадически встречаются повышенные содержания золота. По всей видимости, одним из источников была локальная область сноса, из которой золото и другие элементы-примеси (как правило, As, Mo, V, Ni, Zn, Ag, U и др.) транспортировались реками в морской бассейн и отлагались вместе с терригенным осадком. Дальнейшее преобразование осадка способствовало перераспределению и концентрации элементов в растущих сульфидах и остаточном органическом веществе.

Многими авторами доказано, что золото и другие элементы в виде тонкодисперсных и коллоидных частиц, адсорбированных на глинах и оксид-гидроксидах железа, в больших количествах поступают в океанические бассейны. При взаимодействии коллоидного материала речного стока с морской водой сначала происходят десорбция и растворение металлов, а затем их восстановление в придонных эвксинических условиях [23, 32]. Чаще всего продуктами восстановления являются металлоорганические комплексы, обогащающие илы и мелкозернистые песчаники окраинно-континентальной обстановки.



**Рис. 10.** Образование и эволюция золотосодержащего пирита при формировании месторождения Чаувай а – раннедиагенетический и обогащенный золотом Py1; б – позднедиагенетический Py2, замещающий более ранний Py1 или нарастающий на него; в – катагенетический/гидротермальный идиоморфный Py3, нарастающий на агрегаты Py2/Py1 (золото, рассеянное в Py1 и Py2, высвобождается, образуя каймы вокруг Py3 или трассирует зоны роста кристаллов); г – поздняя мышьяковистая минерализация (Re+Or), развивающаяся по ранее образованному пириту





С началом процессов раннего диагенеза в осадке происходило частичное анаэробное разложение органического вещества и, соответственно, разрушение металлоорганических комплексов, в результате чего высвобождались золото, мышьяк и др. Данные элементы могли встраиваться в структуру растущего диагенетического пирита (рис. 10, а) либо концентрироваться на поверхности кристаллов или фрамбоидов [23]. С этим этапом мы связываем накопление основного количества золота на будущем золотосодержащем месторождении Чаувай.

При дальнейшем преобразовании осадка в стадии позднего диагенеза и катагенеза (см. рис. 10, б) формировались новые генерации нодулярного и идиоморфного пирита ( $Pu_2$ ), которые либо нарастали на ранний фрамбоидальный пирит ( $Pu_1$ ), либо замещали его. Соответственно, при растворении фрамбоидов пирита ( $Pu_1$ ) происходило высвобождение некоторого количества золота и перераспределение его в новые растущие генерации. Оставшееся органическое вещество преобразовываясь, сохранялось в породе в виде графитовых или углистых пленок.

Такие характерные углеродистые алевролиты и песчаники с золотосодержащим диагенетическим пиритом развиты не только на Чаувае, но и на других месторождениях и рудопроявлениях ЮФРСР (Хайдаркан, Кадамжай, Абшир, Северный Акташ, Обдилля). Это свидетельствует в пользу того, что накопление золота и рост фрамбоидального пирита происходили масштабно, на осадочной стадии формирования пород и не являются наложенными процессами.

Следующим этапом, определившим возможность образования месторождения Чаувай, была эпоха тектонической активности, результатом которой стало формирование Южно-Тяньшаньской покровно-складчатой структуры. По крупным разломам-надвигом терригенные отложения толубайской толщи были локально надвинуты на известняки Алайского разреза. Один из таких надвигов оказался рудоконтролирующим для будущего Sb-Hg золотосодержащего месторождения (рис. 11, а).

В разломных зонах терригенные осадки толубайской свиты подвергались не только тектоническому, но и гидротермальному преобразованию. Под действием напряжений и отделяющихся седиментогенных растворов перекристаллизовывался ранее образованный пирит, образуя сравнительно более крупные идиоморфные кристаллы (см. рис. 10, в). Золото, входящее в состав пирита, также перераспределялось вблизи фронта перекристаллизации, и в результате происходило обогащение сульфидов вдоль плоскости надвига и опережающих разломов.

Одновременно с этим мигрировавшие по плоскостям надвигов гидротермальные растворы (предположительно, результат смешения седиментогенных, метеорных и телетермальных вод [13, 25]) экранировались локальными флюидопорами,

«застаивались» и пропитывали подстилающие известняки. Брекчированные и хорошо проницаемые карбонатные породы, взаимодействуя с растворами, активно декарбонатизировались и метасоматически замещались кремнеземом с образованием джаспероидов (см. рис 11, б).

Завершающим этапом в формировании месторождения было поступление минерализованных растворов по трещинам в джаспероидных телах и формирование киноварь-антимонитового оруденения вдоль плоскости надвига (см. рис. 11, б), а также позднее наложение As-минерализации (см. рис. 10, г; 11, б, в) на терригенные породы.

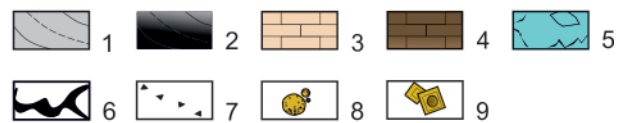
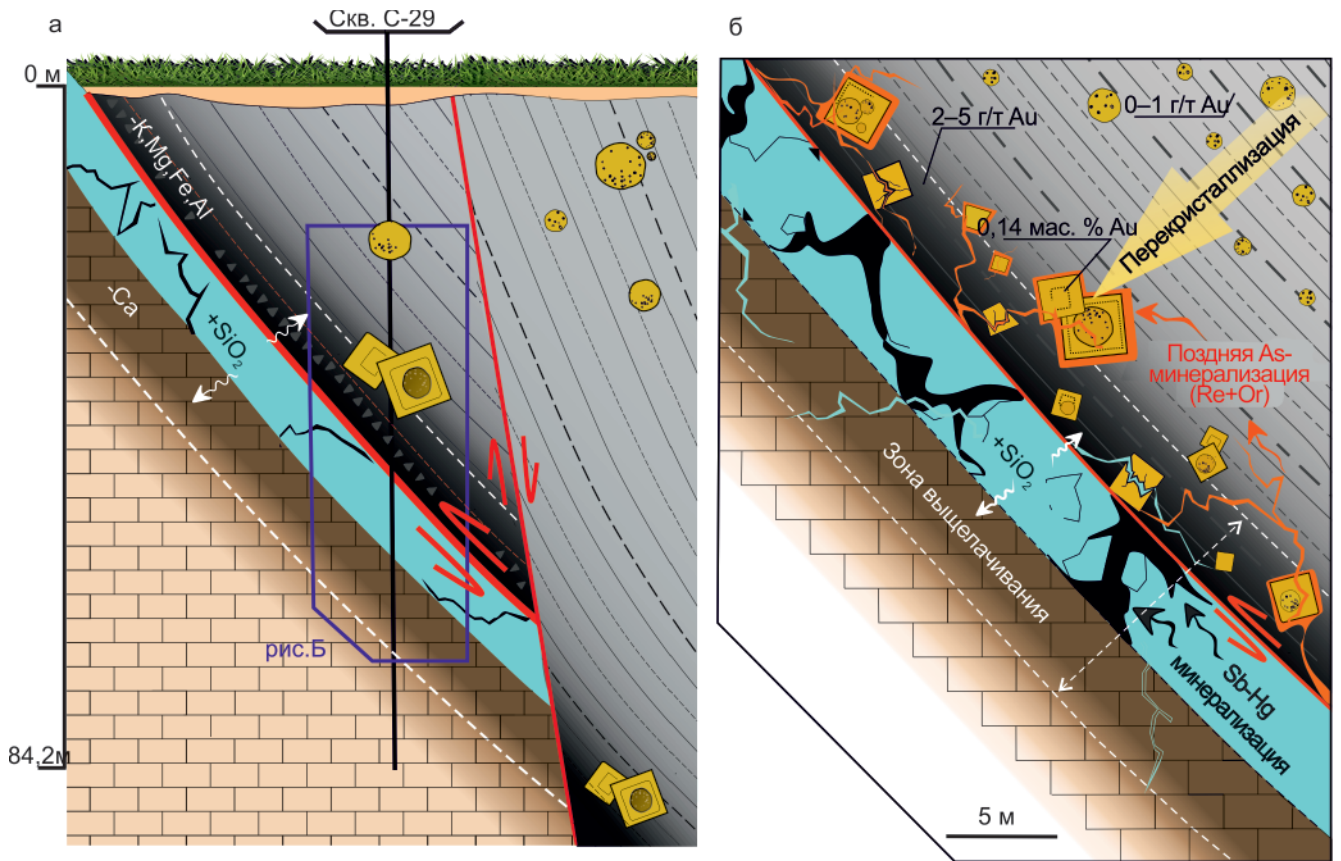
Таким образом, история формирования месторождения Чаувай и схожих с ним объектов (Хайдаркан, Кадамжай, Абшир) включает три основных этапа, охватывающих: 1 период существования Туркестанского океанического бассейна ( $E_2-C_2$ ), 2 эпоху орогенеза, 3) наложение на отдельные зоны покровно-складчатой структуры телетермальной Sb-Hg-As минерализации (от  $C_3-P_1$  до  $T_{1-2}$ ) [13].

При подведении итогов возникает вопрос: почему на месторождении Чаувай в отличие от эталонных месторождений Карлин-типа золото проявлено спорадически? Характеристика Carlin-like подразумевает ряд схожих с классическими представителями особенностей этого типа.

**1. Геологическая позиция.** Месторождения Карлин-типа приурочены к фронтальным частям крупных надвигов, где вдоль плоскости сместителя концентрируется золото-сульфидное оруденение. Отличительной чертой является то, что на месторождении Чаувай залежи сульфидных вкрапленных руд залегают выше плоскости надвига и их мощность не превышает первых десятков метров, а на классических месторождениях руды сконцентрированы в верхних 250–600 м, экранированных поверхностью регионального надвига Роберт Маунтинс.

**2. Трендовое расположение.** Месторождения Невады располагаются линейными группами (трендами), которые контролируются глубинными рудоподводящими разломами, наложенными на надвиговую структуру и обуславливающими блоковое строение рудных полей [16]. Месторождение Чаувай также не единственный представитель Карлин-типа в Южной Киргизии: родственные ему месторождения (Хайдаркан, Кадамжай, Абшир, Северный Акташ, Обдилля) залегают в аналогичных породах и приурочены к одним и тем же покровно-складчатым структурам [18, 29].

**3. Схожий геохимический профиль.** На месторождениях Карлин-типа участки богатых золото-сульфидных руд наиболее обогащены As, Sb, Hg, Tl, Ag и Zn в пределах ореола обеднения Ca, Mg, Ba и Sr [17]. Схожая корреляция наблюдается и на месторождении Чаувай, где повышенные содержания золота в толще сопровождаются положительными аномалиями таллия, мышьяка, сурьмы (см. рис. 10, в).



**Рис. 11.** Идеализированная генетическая модель месторождения Чаувай: а – положение скв. С-29 на идеализированном разрезе месторождения; б – строение скв. С-29 с отражением метасоматической зональности пород; в – поведение некоторых породообразующих и рудных элементов в зависимости от степени преобразования пород 1 – неизменные терригенные породы ( $C_2tl$ ); 2 – брекчированные и частично окварцованные терригенные породы; 3 – неизменные известняки ( $D(?) - C_2$ ); 4 – брекчированные и частично окварцованные известняки; 5 – джаспероидная брекчия; 6 – Sb-Hg руды; 7 – тектоническая брекчия; 8 – фрамбоидальный пирит; 9 – идиоморфный (гидротермальный) пирит

4. Специфика минерализации. Самый распространенный минерал и основной концентратор золота на эталонных месторождениях Карлин-типа – фрамбоидальный и мышьяковистый пирит [19, 22,

23, 25], который образует тонкую вкрапленность в толщах карбонатно-терригенных пород, обогащенных углеродистым и битуминозным веществом. Мышьяковистый пирит, помимо идиоморфных кри-



сталлов, часто слагает каймы и наросты на ранее образовавшемся диагенетическом пирите [17]. На месторождении Чаувай химический состав пирита близок к теоретическому (стехиометричному), хотя в ходе наших исследований установлены и высокомышьяковистые разновидности.

5. *Изменение вмещающих пород.* Одной из ярко выраженных черт Карлинских месторождений являются специфически измененные вмещающие породы, подверженные декарбонатизации, джаспероидизации и сульфидизации.

6. *Амагматичность золото-сульфидной минерализации.* Наиболее распространенная генетическая модель, применимая к классическим месторождениям Карлин-типа, основана на концепции амагматического происхождения золотого оруденения. Эта модель подразумевает сингенетичное накопление золота в толще океанического осадка и его дальнейшее перераспределение вследствие тектонических и гидротермальных преобразований [23]. Данные по изучению в рудах изотопов свинца [24] водорода, кислорода и серы [25] согласуются с амагматическими моделями, которые приводятся разными авторами. Как правило, подразумевается циркуляция флюидов через изначально обогащенные Au, S, As и другими элементами терригенно-осадочные породы, выщелачивание и мобилизацию полезных компонентов в процессе декарбонатизации и переотложение металлов в зонах экранирования в ходе джаспероидизации пород. Золото и другие элементы, по мнению авторов, осаждались на таких химически активных барьерах, как Fe-доломит с образованием золотосодержащего пирита и сорбировались углеродистым веществом. Изотопные характеристики водорода и кислорода ( $\delta\text{H} = -135\text{‰}$ ,  $\delta^{18}\text{O} = -5\text{‰}$ ) указывают на то, что гидротермальные растворы имели метеорное происхождение, а изотопия серы гидротермальных пиритов аналогична диагенетическому пириту из нижней части палеозойского разреза, что, в свою очередь, указывает на осадочный источник серы [19, 20, 22, 25]. Аналогичная картина наблюдается на месторождениях ЮФРСР, где также не прослеживается какая-либо пространственная и генетическая связь рудных узлов с интрузивными породами, а все типы оруденения (золото-сульфидное и сурьмяно-ртутное) носят самостоятельный и амагматичный характер.

Помимо общих особенностей есть ряд весомых отличий месторождения Чаувай от эталонных месторождений Карлин-типа. Прежде всего это касается узлового характера проявления золоторудной минерализации. Отсутствие на месторождении выдержанных по мощности и простирацию кондиционных золотых руд может быть обусловлено несколькими факторами.

Во-первых, на классических месторождениях гидротермально-метасоматические изменения пород проявлены более масштабно: мощность джа-

спероидов может достигать первых сотен метров, а протяженность – первых километров. Такие масштабы приконтактового изменения напрямую связаны с разломными структурами более крупного ранга. Так, если на месторождениях Карлин-типа протяженность рудоподводящих разломов достигает первых десятков километров, а рудные тела имеют среднюю мощность 250 м [20], то на месторождении Чаувай протяженность рудоконтролирующего надвига и оперяющих разломов не превышает 1 км, а мощность рудных тел весьма изменчива – от 2 до 15–20 м [18].

В соответствии с этим можно говорить о том, что контактовые изменения пород, выраженные на фоне Чаувайского надвига, не могли спровоцировать масштабную перекристаллизацию пирита и перераспределение золота в более удаленных от разлома толщах. Поэтому кондиционные содержания встречаются только на небольшом удалении (10–30 м) от разломных зон в породах, которые были максимально подвержены тектонической и гидротермальной переработке (см. рис. 11).

Во-вторых, толубайская толща лишь литифицирована и практически не подвержена метаморфизму. Логично предположить, что для наиболее выраженного перераспределения и обогащения золотом породам необходима степень преобразования на региональном уровне. Так, некоторыми авторами доказано, что наибольшее перераспределение золота без его миграции происходит на средних ступенях зеленосланцевой фации. При меньших температурах сульфиды в породах плохо подвергаются рекристаллизации, а при большем градиенте пирит переходит в пирротин и высвобождается при этом золото мигрирует с флюидной фазой [23].

И, наконец, на содержания золота могло влиять изначально плохое обогащение осадочной толщи. В богатых органикой породах толубайской свиты содержания золота выше фоновых, однако их могло быть недостаточно для образования крупного месторождения, сопоставимого с классическими представителями Карлин-типа.

*Авторы выражают благодарность компании Realgold Resources Corp. и ее работникам Александру Беккеру и Вячеславу Бандураку за добросовестную организацию геолого-разведочных работ и доступ к материалам опробования скважин. А. В. Малютина также выражает признательность П. А. Неволько и П. А. Фоминых за любезно предоставленную коллекцию каменного материала и за организацию и проведение полевых работ в районе объекта исследований.*

*Работа выполнена по Государственному заданию ИГМ СО РАН.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буртман В. С. Тянь-Шань и Высокая Азия: тектоника и геодинамика в палеозое. – М.: Геос, 2006. – 215 с.



2. **Вассоевич Н. Б.** Флиш и методика его изучения. – Л.: Гостоптехиздат, 1948. – 240 с.
3. **Власов В. С.** К вопросу об условиях образования Удере́йского золото-сурьмяного месторождения (Енисейский край) // Геология и минеральные ресурсы Центральной Сибири. Сб. № 4. – Красноярск: КНИИГИМС, 2003. – С. 119–121.
4. **Гамянин Г. Н., Бортников Н. С., Алпатов В. В.** Нежданнинское золоторудное месторождение – уникальное месторождение Северо-Востока России. – М.: Геос, 2000. – 222 с.
5. **Генезис** Удере́йского золото-сурьмяного месторождения в Енисейском крае / Э. Г. Дистанов, А. Т. Стеблева, А. А. Оболенский и др. // Геология и геофизика. – 1975. – № 8. – С. 19–27.
6. **Дженчураева А. В.** Стратиграфия и фораминиферы среднекаменноугольных отложений северных склонов Туркестано-Алая. – Фрунзе: Илим, 1979. – 184 с.
7. **Индолев Л. Н., Жданов Ю. А., Суплецов В. М.** Сурьмяное оруденение Верхояно-Колымской провинции. – Новосибирск: Наука, 1980. – 232 с.
8. **Малютина А. В.** Минерализация Карлин-типа ртутно-сурьмяного месторождения Чаувай (Южно-Ферганский ртутно-сурьмяный пояс, Киргизия) // XXV молодежная науч. школа «Металлогения древних и современных океанов. Четверть века достижений в изучении субмаринных месторождений». – Миасс: ИМин УрО РАН, 2019. – С. 207–211.
9. **Малютина А. В., Неволько П. А., Фоминых П. А.** Джаспероиды и их связь с формированием золоторудной и сурьмяно-ртутной минерализаций на Sb-Hg-Au месторождении Чаувай (Южно-Ферганский ртутно-сурьмяный пояс, Киргизия) // IX Рос. молодежная науч.-практ. школа «Новое в познании процессов рудообразования». – М.: ИГЕМ РАН, 2019. – С. 241–244.
10. **Неволько П. А., Борисенко А. С.** Сурьмяная минерализация на золото-сульфидных месторождениях Енисейского края // Разведка и охрана недр. – 2009. – № 2. – С. 11–14.
11. **Справочник** по систематике фораминифер палеозоя. / Д. М. Раузер-Черноусова, Ф. Бенш, М. В. Вдовенко и др. – М.: Наука, 1996. – 205 с.
12. **Угрюмов А. Н., Дворник Г. П.** Поиское значение минеральных и текстурно-структурных особенностей золотоносных джаспероидов // Геология, поиски и разведка рудных и нерудных месторождений полезных ископаемых: межвуз. науч. темат. сб. – Свердловск, 1986. – С. 13–19.
13. **Федорчук В. П.** Геология сурьмы. – М.: Недра, 1985. – 267 с.
14. **Biske Yu. S., Seltmann R.** Paleozoic Tian-Shan as a transitional region between the Rheic and Urals-Turkestan oceans // Gondwana Res. – 2010. – Vol. 17. – P. 602–613.
15. **Voima A. H.** Sedimentology of some Flysch Deposits; a graphic approach to facies interpretation. – Amsterdam, N.Y., Elsevier Pub. Co., 1962. – 168 p.
16. **Carlin-type** gold deposits in Nevada: Critical geological characteristics and viable models / J. S. Cline, A. H. Hofstra, J. L. Muntean, et al. // Econ. Geol. – 2005. – 100<sup>th</sup> Anniversary Vol. – P. 451–484.
17. **Geology** and geochemistry of the Deep Star gold deposit, Carlin trend, Nevada / D. G. Heitt, W. W. Dunbar, T. B. Thompson, R. G. Jackson // Econ. Geol. – 2003. – Vol. 98. – P. 1107–1135.
18. **Geology** and geochemistry of the Kadamzhai and Chauvai gold-antimony-mercury deposits: Implications for new province of Carlin-type gold deposits at the Southern Tien Shan (Kyrgyzstan) / P. A. Nevolko, O. M. Hnylko, V. P. Mokrushnikov, et al. // Ore Geol. Rev. – 2019. – Vol. 105. – P. 551–571.
19. **Hofstra A. H., Cline J.** Characteristics and models for Carlin-type gold deposits // Econ. Geol. – 2000. – Vol. 13. – P. 163–169.
20. **Hofstra A. H., John D. A., Theodore T. G.** A Special Issue Devoted to Gold Deposits in Northern Nevada: Part 2. Carlin-Type Deposits // Econ. Geol. – 2003. – Vol. 98. – P. 1063–1067.
21. **Jahn B. M., Wu F. Y., Chen B.** Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic // Earth Environ. Sci. Trans. R. Soc. – 2000. – Vol. 91. – P. 181–193.
22. **Evaluation** of the role of sulfidation in deposition of gold: Screamer section of the Betze-Post Carlin-type deposit, Nevada / S. E. Kesler, J. Fortuna, Z. Ye, et al. // Econ. Geol. – 2003. – Vol. 98. – P. 1137–1157.
23. **Large R. R., Bull S. W., Maslennikov V. V.** A carbonaceous sedimentary source-rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits // Econ. Geol. – 2011. – Vol. 106. – P. 331–358.
24. **Lead** in the Getchell-Turquoise Ridge Carlin-type gold deposits from the perspective of potential igneous and sedimentary rock sources in northern Nevada: Implications for fluid and metal sources / R. M. Tosdal, J. S. Cline, C. M. Fanning, J. L. Wooden // Econ. Geol. – 2003. – Vol. 98. – P. 1189–1211.
25. **Origin** of High-Grade Gold Ore, Source of Ore Fluid Components, and Genesis of the Meikle and Neighboring Carlin-Type Deposits, Northern Carlin Trend, Nevada / P. Emsbo, A. H. Hofstra, E. A. Lauha, et al. // Econ. Geol. – 2003. – Vol. 98. – P. 1069–1105.
26. **Phanerozoic** continental growth and gold metallogeny of Asia / R. J. Goldfarb, R. D. Taylor, G. S. Collinse, et al. // Gondwana Res. – 2014. – Vol. 25. – P. 48–102.
27. **Shoshonitic** lamprophyre dykes and their relation to mesothermal Au-Sb veins at Hillgrove, New South Wales, Australia / P. M. Ashley, N. D. J. Cook, R. L. Hill, A. J. R. Kent // Lithos. – 1994. – Vol. 32. – P. 249–272.
28. **Tectonic** setting, characteristics, and regional exploration criteria for gold mineralization in the Altai orogenic collage: The Tien Shan province as a key example / A. Yakubchuk, A. Cole, R. Seltmann, V. Shatov // Soc. Econ. Geol. Spec. Pub. – 2002. – Vol. 9. – P. 177–201.



29. **The Carlin-type Hg, Sb, As, Au, F, Tl deposits of the southwest Kyrgyz Republic / D. J. Kirwin, A. Becker, I. Banduruk, B. Lueck // SEG Newsl. – 2017. – Vol. 110, iss. 6. – P. 14–17.**

30. **Vos J. M. A., Bierlein F. P.** Characteristics of orogenic-gold deposits in the Northcote district, Hodgkinson Province, North Queensland: implications for tectonic evolution // *Australian Journal of Earth Science*. – 2006. – Vol. 53, iss. 3. – P. 469–484.

31. **Vos J. M. A., Bierlein F. P., Teale G. S.** Genesis of orogenic-gold deposits in the Broken River Province, northeast Queensland // *Australian Journal of Earth Sciences*. – 2005. – Vol. 52. – P. 941–958.

32. **Zhang J., Lu J., Zhai J., Fan Y.** Simulating experiments on enrichment of gold by bacteria and their geochemical significance // *Chinese Journal of Geochemistry*. – 1997. – Vol. 16, iss. 4. – P. 369–373.

## REFERENCES

1. Burtman V.S. *Tyan-Shan i Vysokaya Aziya: tektonika i geodinamika v paleozoye* [Tien-Shan and High Asia: tectonics and geodynamics in the Cenozoic]. Moscow, Geos Publ., 2006. 215 p. (In Russ.).

2. Vassoevich N.B. *Flysch i metodika ego izucheniya* [Flysch and methodology for its study]. Leningrad, Gosoptekhizdat Publ., 1948. 240 p. (In Russ.).

3. Vlasov V.S. [Revisiting the conditions of formation of the Uderei gold-antimony deposit (Yenisei Ridge)]. *Geologiya i mineralnyye resursy Tsentralnoy Sibiri* [Geology and Mineral Resources of the Central Siberia]. Krasnoyarsk, KNIIGiMS Publ., 2003, no. 4, pp. 119–121. (In Russ.).

4. Gamyarin G.N., Bortnikov N.S., Alpatov V.V. *Nezhdaninskoye zolotorudnoye mestorozhdeniye – unikalnoye mestorozhdeniye Severo-Vostoka Rossii* [The Nezhdaninskoye gold ore deposit – a unique deposit of the Northeastern Russia]. Moscow, GEOS Publ., 2000. 222 p. (In Russ.).

5. Distanov E.G., Stebleva A.T., Obolenskiy A.A., et al. [Genesis of the Udereiskoye gold-antimony field in the Yenisei Ridge]. *Geologiya i geofizika*, 1975, no. 8, pp. 19–27. (In Russ.).

6. Dzhenchuraeva A.V. *Stratigrafiya i foraminifery srednekamennougolnykh otlozheniy severnykh sklonov Turkestan-Alaya* [Stratigraphy and foraminifera of the Middle Carboniferous deposits of northern slopes of the Turkestan-Alai]. Frunze, Ilim Publ., 1979. 184 p. (In Russ.).

7. Indolev L.N., Zhdanov Yu.A., Supletsov V.M. *Surmyanoye orudneniye Verkhoyano-Kolymskoy provintsii* [Antimony mineralization of the Verkhoyansk-Kolyma Province]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 232 p. (In Russ.).

8. Malyutina A.V. [Carlin-type mineralization of the mercury-antimony Chauvai deposit (South Fergana mercury-antimony belt, Kirghizia)] *XXV molodezhnaya nauchnaya shkola "Metallogeniya drevnykh i sovremennykh okeanov. Chetvert veka dostizheniy v izuchenii submarinnykh mestorozhdeniy* [25<sup>th</sup> Youth Scientific school

“Metallogeny of Ancient and Modern Oceans – 2020. A quarter of the century of achievements in the study of submarine deposits”]. Miass, IMin UrB RAS Publ., 2019, pp. 207–211. (In Russ.).

9. Malyutina A.V., Nevolko P.A., Fominykh P.A. [Jasperoids and their relation to the formation of gold and antimony-mercury mineralizations at the Chauvai Sb-Hg-Au deposit (South Fergana mercury-antimony belt, Kyrgyzstan)]. *IX Rossiiskaya molodezhnaya nauchno-prakticheskaya shkola "Novoye v poznanii protsessov rudoobrazovaniya"* [9<sup>th</sup> Russian Youth Scientific and Practical School “New in the knowledge of ore formation processes”]. Moscow, IGEM RAS Publ., 2019, pp. 241–244. (In Russ.).

10. Nevolko P.A., Borisenko A.S. [Antimony mineralization at 11 gold-sulphide fields of the Yenisei Ridge]. *Razvedka i okhrana nedr – Prospect and protection of mineral resources*, 2009, no. 2, pp. 11–14. (In Russ.).

11. Rauzer-Chernousova D.M., Bensch F., Vdovenko M.V., et al. *Spravochnik po sistematike foraminifer paleozoya* [Reference-book on the systematics of Paleozoic foraminifera]. Moscow, Nauka Publ., 1996. 205 p. (In Russ.).

12. Ugryumov A.N., Dvornik G.P. [Search value of mineral and textural-structural features of gold-bearing jasperoids]. *Geologiya, poiski i razvedka rudnykh i nerudnykh mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Geology, exploration of ore and non-metallic deposits of minerals]. Sverdlovsk, 1986, pp. 13–19. (In Russ.).

13. Fedorchuk V.P. *Geologiya surmy* [Antimony's geology]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 267 p. (In Russ.).

14. Biske Yu.S., Seltmann R. Paleozoic Tian-Shan as a transitional region between the Rheic and Urals-Turkestan oceans. *Gondwana Res.*, 2010, vol. 17, pp. 602–613.

15. Bouma A.H. *Sedimentology of some Flysch Deposits; a graphic approach to facies interpretation*. Amsterdam, N.Y., Elsevier Pub. Co., 1962. 168 p.

16. Cline J.S., Hofstra A.H., Muntean J.L., et al. Carlin-type gold deposits in Nevada: Critical geological characteristics and viable models. *Econ. Geol.*, 2005, 100<sup>th</sup> Anniversary Vol, pp. 451–484.

17. Heitt D.G., Dunbar W.W., Thompson T.B., Jackson G. Geology and geochemistry of the Deep Star gold deposit, Carlin trend, Nevada. *Econ. Geol.*, 2003, vol. 98, pp. 1107–1135.

18. Nevolko P.A., Hnylko O.M., Mokrushnikov V.P., et al. Geology and geochemistry of the Kadamzhai and Chauvai gold-antimony-mercury deposits: Implications for new province of Carlin-type gold deposits at the Southern Tien Shan (Kyrgyzstan). *Ore Geol. Rev.*, 2019, vol. 105, pp. 551–571.

19. Hofstra A.H., Cline J. Characteristics and models for Carlin-type gold deposits. *Econ. Geol.*, 2000, vol. 13, pp. 163–169.

20. Hofstra A.H., John D.A., Theodore T.G. A Special Issue Devoted to Gold Deposits in Northern Nevada: Part 2. Carlin-Type Deposits. *Econ. Geol.*, 2003, vol. 98, pp. 1063–1067.



21. Jahn B.M., Wu F.Y., Chen B. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and continental growth in the Phanerozoic. *Earth Environ. Sci. Trans. R. Soc.*, 2000, vol. 91, pp. 181–193.

22. Kesler S.E., Fortuna J., Ye Z., et al. Evaluation of the role of sulfidation in deposition of gold: Screamer section of the Betze-Post Carlin-type deposit, Nevada. *Econ. Geol.*, 2003, vol. 98, pp. 1137–1157.

23. Large R.R., Bull S.W., Maslennikov V.V. A carbonaceous sedimentary source-rock model for carlin-type and orogenic gold deposits. *Econ. Geol.*, 2011, vol. 106, pp. 331–358.

24. Tosdal R.M., Cline J.S., Fanning C.M., Wooden J.L. Lead in the Getchell-Turquoise Ridge Carlin-type gold deposits from the perspective of potential igneous and sedimentary rock sources in northern Nevada: Implications for fluid and metal sources. *Econ. Geol.*, 2003, vol. 98, pp. 1189–1211.

25. Emsbo P., Hofstra A.H., Lauha E.A., et al. Origin of High-Grade Gold Ore, Source of Ore Fluid Components, and Genesis of the Meikle and Neighboring Carlin-Type Deposits, Northern Carlin Trend, Nevada. *Econ. Geol.*, 2003, vol. 98, pp. 1069–1105.

26. Goldfarb R.J., Taylor R.D., Collinse G.S., et al. Phanerozoic continental growth and gold metallogeny of Asia. *Gondwana Res.*, 2014, vol. 25, pp. 48–102.

27. Ashley P.M., Cook N.D.J., Hill R.L., Kent A.J.R. Shoshonitic lamprophyre dykes and their relation to mesothermal Au-Sb veins at Hillgrove, New South Wales, Australia. *Lithos*, 1994, vol. 32, pp. 249–272.

28. Yakubchuk A., Cole A., Seltmann R., Shatov V. Tectonic setting, characteristics, and regional exploration criteria for gold mineralization in the Altaid orogenic collage: The Tien Shan province as a key example. *Soc. Econ. Geol. Spec. Publ.*, 2002, vol. 9, pp. 177–201.

29. Kirwin D.J., Becker A., Banduruk I., Lueck B. The Carlin-type Hg, Sb, As, Au, F, Tl deposits of the southwest Kyrgyz Republic. *SEG Newsl.*, 2017, vol. 110, iss. 6, pp. 14–17.

30. Vos J.M.A., Bierlein F.P. Characteristics of orogenic-gold deposits in the Northcote district, Hodgkinson Province, North Queensland: implications for tectonic evolution. *Australian Journal of Earth Science*, 2006, vol. 53, iss. 3, pp. 469–484.

31. Vos J.M.A., Bierlein F.P., Teale G.S. Genesis of orogenic-gold deposits in the Broken River Province, northeast Queensland. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2005, vol. 52, pp. 941–958.

32. Zhang J., Lu J., Zhai J., Fan Y. Simulating experiments on enrichment of gold by bacteria and their geochemical significance. *Chinese Journal of Geochemistry*, 1997, vol. 16, iss. 4, pp. 369–373.

© А. В. Малютина, Ю. О. Редин,  
А. С. Гибшер, В. П. Мокрушников, 2021