

ПЕТРОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

ГИГАНТСКОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ ЗОЛОТА СУХОЙ ЛОГ (Сибирь)

Б.Л. Вуд, Н.П. Попов\*

StarTechnology Systems N.L., Москва, Россия, PO Box 6325, University of NSW, Sydney, NSW 1466, Australia

\* Lenzoloto Open Joint Stock Company, Москва, Россия

Золоторудное месторождение Сухой Лог расположено в центральной части Ленского золоторудного района, приблизительно в 850 км от Иркутска, среди вмещающих пород, которые представлены верхнепротерозойскими морскими песчаниками, карбонатными сланцами и филлитами, метаморфизованными до низких степеней зеленосланцевой фации, в периферийной части главного Аkitканского складчатого пояса. Пластовое рудное тело с рассеянной пиритовой минерализацией расположено в осевой зоне наклоненной антиклинальной складки. Рудные тела не встречаются в виде обнажений, а выделяются исключительно на основании опробования. Наиболее богатые высококачественные руды (4—9 г/т Au) располагаются в пиритизированных пластах черных сланцев, особенно в местах их пересечения с осевой зоной складки, где они образуют две протяженные „цилиндрические зоны“, так называемые рудные столбы, расположенные вдоль слегка погруженного гребня антиклинали. Выступающая часть этой антиклинали, длиной более 3 км, простирается с востока на запад и затем погружается в направлении приблизительно 10° к северо-западу. Осевая плоскость и рудное тело, вскрытое до глубины 400 м, наклонены на 15° к северу.

Три фазы син- и постметаморфического складкообразования мезоуровня привели к возникновению характерных структур. Первые два типа структур ( $F_1$  и  $F_2$ ) совпадают с антиклиналью и локализованной кварц-пирит-золоторудной жильной минерализацией в  $F_1$  осевой плоскости кливажа ( $S_1$ ), в узких, разреженных осевых зонах небольших непроникающих складок (non-penetrative folds) ( $F_2$ ), в неравномерно рассредоточенных зонах в сланцах и в мелких нерегулярных „кластерах“ (скоплениях) кварц-карбонатных жил. Третья фаза привела к образованию разрозненных изогнуто-складчатых поясов ( $F_3$ ) и нерегулярных зон смятия с отсутствием минерализации. С последним событием связано формирование секущей мезотермальной кварцево-жильной минерализации и возникновение многих низкокачественных золотоносных жил, которые явились главными источниками протяженных аллювиальных россыпных месторождений золота.

Рудная минерализация представляет собой кварц-пирит-золото ± карбонатную ассоциацию с примесью полиметаллов и металлов платиновой группы. Пирит широко распространен в черных сланцах во всем объеме месторождения (между 2 и 5 %) и в меньшем количестве находится в рассеянной форме в виде ореола вокруг рудного тела. Во внешних частях этого рудного тела и в прилегающем минерализованном ореоле содержится золото высокой пробы (900—920 ‰), в то время как золото из „кластированного“ и прожилкового пирита, наиболее распространенного во внутренней продуктивной зоне, имеет более низкую пробу (840—880 ‰). Месторождение Сухой Лог интенсивно исследовалось с октября 1971 г. по декабрь 1977 г. Рудное тело с бортовым содержанием Au 1 г/т представляет собой вытянутый неоднородный плосковыпуклый пласт мощностью до 140 м, погруженный на 15—30° на ССВ, протяженностью 2,2 км. Ширина погруженной части более 500 м и, вероятно, увеличивается с глубиной. Пласт вмещает 384 млн т руды со средним содержанием Au 2,5—2,7 г/т. Дополнительные ресурсы включают 165 млн т руды с низким содержанием Au 2,0—2,3 г/т (возможно, с увеличением на глубину) и 205 млн т руды с концентрацией Au 0,8 г/т в минерализованных вмещающих породах.

Пирит-золоторудный парагенезис, текстурные особенности и структурные изменения пород, а также ограниченные изотопные данные свидетельствуют о том, что формирование четырех различных стадий минерализации происходило в результате субдукции СОХ и закрытия в рифее главного протерозойского Аkitканского складчатого пояса.

*Вкрапленный, пиритовый, синметаморфический, зеленосланцевый, золото-МПГ, Лена, Патом, Байкал, рифей, неопротерозой, поздний докембрий, хребет-субдукция, Аkitкан, Олоkit.*

THE GIANT SUKHOI LOG GOLD DEPOSIT (Siberia)

B.L. Wood and N.P. Popov

The Sukhoi Log gold deposit is centrally located in the Lena goldfield region, approximately 850 km NE from the city of Irkutsk, and is hosted in Upper Proterozoic marine sandstone, carbonaceous slate, and phyllite, metamorphosed to low greenschist facies in an outlying part of the major Akitkan Foldbelt. The disseminated

pyritic tabular orebody has no outcrop, is defined solely by assay grades, and is located in the axial zone of a large near-isoclinal reclining anticline. Highest ore grades occur in pyritic black shale beds, especially where they cross the axial zone and include two elongate higher grade (4–9 ppm gold) cylindrical zones, termed ore pillars, along the gently plunging anticlinal crest. The anticline is exposed E–W over a length of 3 km and plunges at approximately 10° NW. The axial plane and orebody dip 15° N, and the latter is open to depth beyond 400 m.

Three phases of syn- and postmetamorphic mesoscopic folding developed characteristic structures. The first two ( $F_1$  and  $F_2$ ) are congruent with the anticline and localized quartz-pyrite-gold veinlet mineralization in  $F_1$  axial plane cleavages ( $S_1$ ), in narrow spaced axial zones of small nonpenetrative folds ( $F_2$ ), in irregular disseminated zones in shale, and in small irregular clusters (stringers) of quartz-carbonate veins. A third phase generated scattered kink-fold bands ( $F_3$ ) and irregular crumpled zones without mineralization. A later episode of transgressive mesothermal quartz-vein mineralization developed many low-grade auriferous veins that have been the main sources of the extensive alluvial gold deposits.

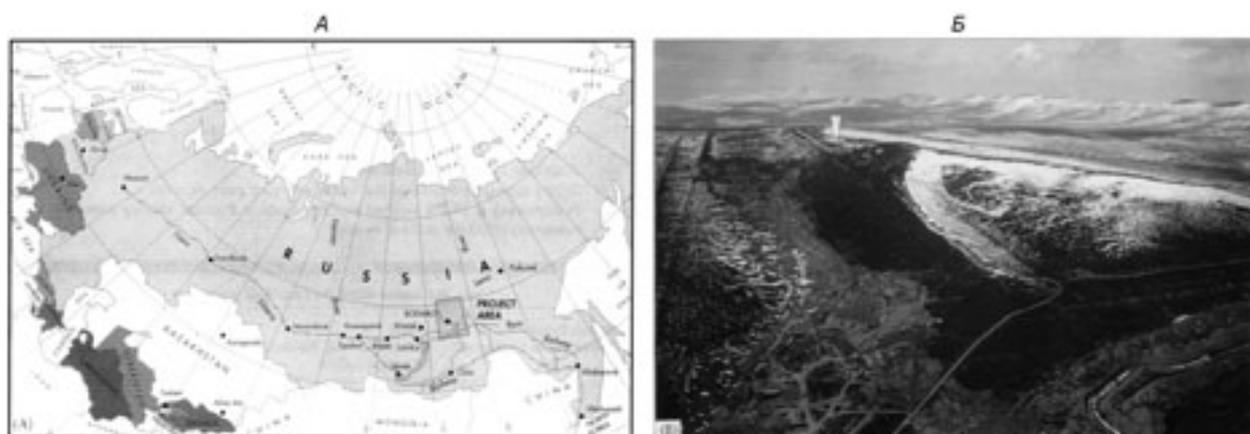
The mineralization assemblage is consistently quartz-pyrite-gold + carbonate with minor base and platinum group metals. Pyrite is widely distributed in black shale throughout the deposit, at 2–5 %, and in lesser amounts in a disseminated envelope around the orebody. In the outer parts of the orebody and in the enclosing mineralization envelope it contains gold of higher fineness (900–920 ‰), whereas clustered and veinlet pyrite is more common in the interior productive zone, with gold of lower fineness (840–880 ‰). The deposit was intensively explored from October 1971 to December 1977. The orebody at a cutoff grade of 1 ppm gold is an elongate irregular planoconvex sheet up to 140 m thick, dipping N-NE at 15 to 30°, with a length of 2.2 km, a down dip width of more than 500 m, and is probably open to depth. It contains 384 million tons with an average grade of 2.5 to 2.7 ppm. Additional resources include 165 million tons at 2.0 to 2.3 ppm in a low grade, possible pit extension, and 205 million tons at 0.8 ppm in the mineralization envelope.

Sequences of pyrite-gold paragenesis, textural and structural changes, and limited isotope data indicate that four distinct stages of mineralization occurred during MOR subduction and Riphean closure of the major Proterozoic Akitkan Foldbelt.

*Disseminated, pyritic, synmetamorphic, greenschist, gold-PGM, Lena, Patom, Baikal, Riphean, Neoproterozoic, Late Precambrian, ridge subduction, Akitkan, Olokit*

## ВВЕДЕНИЕ

Золоторудное месторождение Сухой Лог, расположенное в Сибири (рис. 1, А), было обнаружено в 1961 г. и интенсивно исследовалось в 70-е годы. Много подробных внутренних отчетов и статей были написаны и опубликованы на русском языке, но только немногие данные о месторождении известны за пределами России из-за бывших официальных ограничений. Представленные данные основаны на детальной информации, полученной из ведомственных и институтских архивов, которые были доступны авторам в течение продолжительного времени изучения месторождения (с 1993 по 1996 г.), но многие из которых еще недоступны для общего обсуждения вне России. В дополнение к геологическим материалам с нескольких сторон рассмотрено возникновение вкрапленной минерализации в осадочных толщах, как результат коллизии спрединговой зоны с позднепротерозойской зоной субдукции.



**Рис. 1. А — географическое положение Ленского золотоносного района.**

**Б — фотография месторождения Сухой Лог, западная перспектива.**

Рудные тела громадной протяженности лежат в основании хребта (стрелка), позади вершины в центре и погружаются на север в сторону хребта под снежное поле. Две чистые линии слева представляют собой будущую дорогу и крупную строительную площадку. Долина слева в центре с отработанными россыпями называется Сухой Лог и переводится на английский язык как Dry Gulch.

## ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ

Открытие и разведка золоторудного месторождения Сухой Лог явились кульминацией многолетнего изучения Ленских золотоносных полей несколькими поколениями геологов и горных инженеров. Это месторождение полностью „слепое“, т. е. не имеет выхода на поверхность, и было обнаружено не золотоискателями, использовавшими традиционные методы, а геологами, которые применили новые концепции рудообразования, оригинальные методы геохимических поисков и, в конечном счете, алмазное бурение.

История золотоносных полей в Ленском регионе начинается с 1846 г., когда в долине р. Хомолхо, в 30 км к северо-востоку от Сухого Лога, были открыты первые россыпи — аллювиальные месторождения золота. В 1860-х годах богатые аллювиальные месторождения золота были найдены на многих близко-расположенных участках, включая небольшие долины на северной и южной сторонах холма Сухой Лог, получивших название Радостный, Зоринский, Сухой Лог (или Dry Gulch) (см. рис. 1,Б). Более 30 т золота добыто из этих трех аллювиальных месторождений в период между 1863 и 1900 гг. На гребне водораздела, где были известны многочисленные выходы крупных золотосодержащих кварцевых жил, заявлены в 1886 г. рудник Сергиевский, а в 1894 г. — рудник Утесистый. Главными объектами для первых поисков золота в течение 1899—1904 гг. были эти и другие кварцевые жилы, из которых в ходе поисковых работ добыто около 1 т золота, однако его извлечение оказалось сложным, и работы часто оказывались нерентабельными.

В 1960-х годах геолог В.А. Буряк, на основании известного факта о геохимической аномалии содержания золота в образцах пород Сухого Лога, предположил существование сульфидно-золотоносных руд, обнаружение которых должно быть основной целью поисков [1, 2]. Первые же скважины, пробуренные весной и летом 1961 г., позволили обнаружить золотосодержащую сульфидную минерализацию на глубине, что подтвердило прогноз В.А. Буряка. Дальнейшее бурение и анализ экономической целесообразности освоения предпринимались вплоть до 1971 г. специалистами ИРГИредмета (г. Иркутск). Интенсивная разведка началась осенью 1971 г. и была завершена в конце 1977 г. В результате получены 209,6 км алмазного керна, извлеченного из 846 скважин; пройдены: 11,7 км подземных выработок (штольни № 1 и 2), 1,546 км из которых пройдены по руде, 110,3 км канав. Кроме того, отобраны 13 000 бороздовых проб, 3 технологические пробы по 150, 800 и 980 т, проведены многие десятки тысяч пробирных анализов на золото, а также много других анализов для различных целей. Данные сохранены в виде многотомных отчетов на русском языке в архивах Бодайбо, Москвы и других, и являются очень детальной базой данных по этому месторождению.

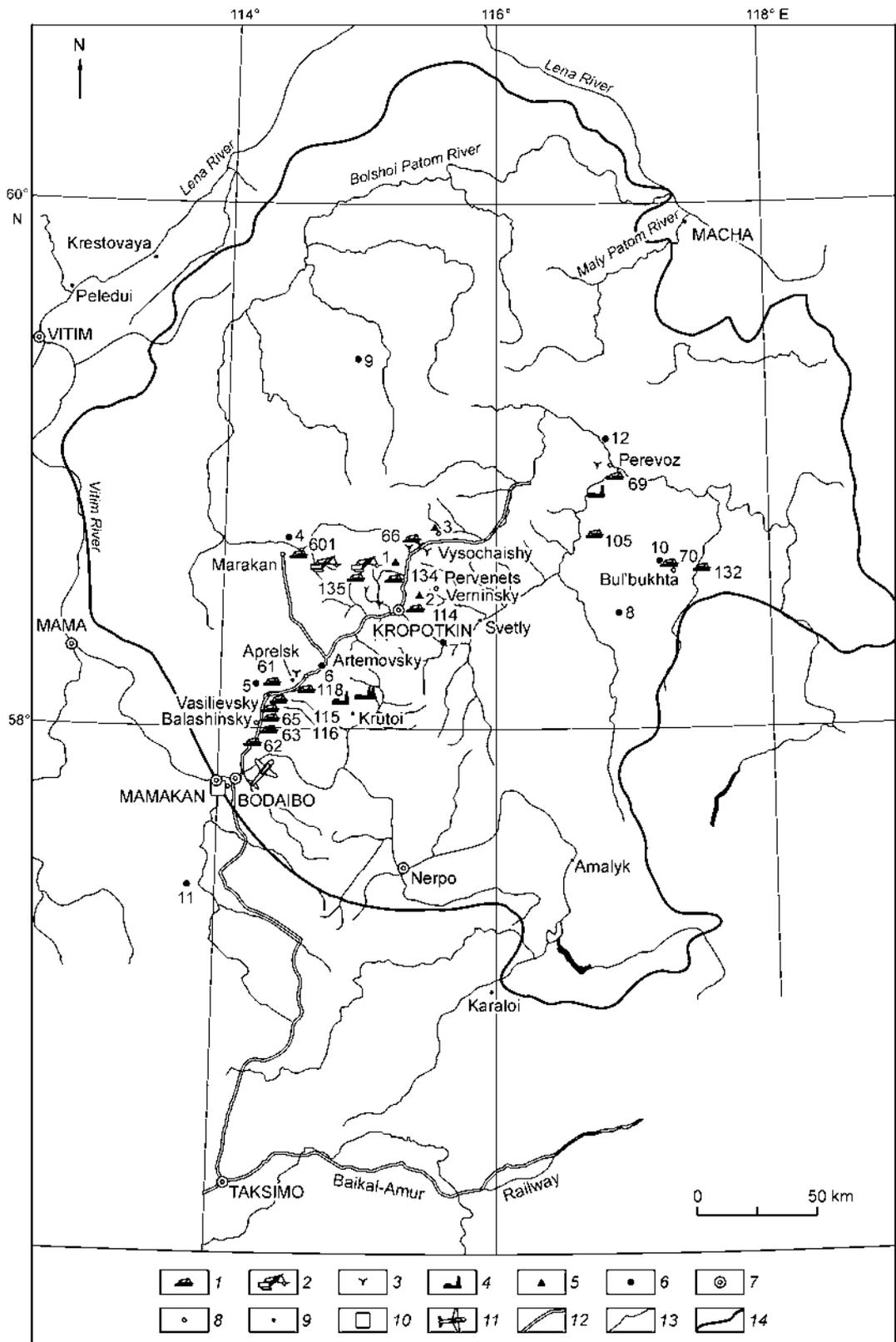
Помимо месторождения Сухой Лог в этом же регионе было обнаружено несколько менее крупных золоторудных месторождений такого же типа со значительно меньшими запасами, но тем не менее все вместе они способны поддержать горную промышленность и производство. Это Вернинское, Высочайшее, Невское и два небольших отдельных линзовидных рудных тела на склонах и нижних уровнях месторождения Сухой Лог, названных Центральное Радостное и Западное Радостное.

Две главные подземные выработки (штольни № 1 и 2), пройденные в семидесятых годах, были заново вскрыты, обеспечив тем самым прямой доступ к значительной внутренней части рудного тела и возможность его наблюдения с целью изучения, которое проведено в 1993—1996 гг. компанией Star Mining Corporation (Сидней, Австралия).

## МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ, ЛАНДШАФТ И ПУТИ СООБЩЕНИЯ

Организация „Лензолото“ ведет работы на территории, расположенной между 57 и 60° с.ш., приблизительно в 900 км южнее Северного полярного круга (см. рис. 1,А) и занимает площадь 105 тыс. км<sup>2</sup> (рис. 2). Климат здесь резко-континентальный со средней температурой –21 °С в январе и +18 °С в июле, с максимальным и минимальным пределами от +30 до –50 °С. Зимние месяцы, начиная с октября по май, чаще всего сухие и безветренные с сильными снегопадами и образованием ледяного покрова. Лето в основном теплое и большей частью сухое.

Этот район включает в себя обширную, приподнятую площадь куполовидной формы, приблизительно 350 км в диаметре, называемой Патомским нагорьем, с высотами, достигающими 1650 м в центральной и более 1800 м — в юго-восточной частях нагорья. Плато частично окружено реками Витим и Лена и пересечено несколькими дополнительными речными системами (притоки Лены и рек, впадающих в нее), которые обнаруживают хорошо выраженные концентрические и радиально дивергентные тренды (см. рис. 2). Ландшафт представляет собой один протяженный „дугообразный“ высокий хребет, сложенный осадочными породами, часто с крутыми склонами и обрывами (см. рис. 1,Б). Основные высоко поднятые формы рельефа были сформированы при нескольких эпизодах плейстоценовой эрозии материкового льда, поздней фазе ствольного оледенения долин, длительных периодах околледниковой эрозии и нескольких фаз химической эрозии во время межледникового теплого климата. Глубокозале-



**Рис. 2. Географическая карта района работ.**

1 — драгирование, 2 — механические экскаваторы, 3 — промывка, 4 — шахты; 5 — первичные коренные месторождения: 1 — Сухой Лог, 2 — Первенец и Вернинское, 3 — Высочайшее; 6 — основные россыпи: 4 — Шусман, 5 — Васильевский, 6 — Артемовский, 7 — Усть-Джегдакар, 8 — Ходокан, 9 — Чертово Корыто, 10 — Бульбукhta, 11 — Мама-Витим, 12 — Дальняя Тайга. 7 — районные центры, 8 — районы добычи и ГРЭ, 9 — деревни, 10 — ГЭС, 11 — основной аэропорт, 12 — грунтовые дороги, 13 — реки, 14 — административная граница.

гающие аллювиальные и коллювиальные месторождения, находящиеся в большинстве русел и речных долин, возникают в результате долгих периодов слабого дренажа и ледниковой эрозии.

Сибирский лес (тайга), состоящий из березы, клена, сосны, кедра, ели и лиственницы, покрывает горные склоны и некоторые долины до высоты 1200 м над уровнем моря. Нагорные области и широкие гребни имеют редкое покрытие в виде субарктических кустарников или, что более распространено, состоят из обширных полей каменных осыпей иногда с перигляциальными отложениями и курумами.

Между городами Иркутск и Бодайбо (население около 40 000), расположенном в Ленском золоторудном районе, действуют регулярные воздушные перевозки. От Бодайбо до всех отдаленных деревень и разработок можно добраться по автомобильным дорогам.

## РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Геологическое строение региона, включающего Ленский золоторудный район и месторождение Сухой Лог, сложное и представляет собой Аkitканский складчатый пояс, в составе которого выделяется Олокитская зона (складчатая осадочная серия), протягивающиеся в глубь западной части золоторудного района (рис. 3).

Вдоль западного побережья оз. Байкал в Приморском хребте устанавливается юго-западное простирание на 250 км Олокитской зоны в пределах 800 км Аkitканского складчатого пояса. Геофизические данные указывают, что общая длина этого складчатого пояса, включая тот, который вскрыт к северо-востоку ниже фанерозойского платформенного покрытия, может быть более 1500 км, ширина варьирует между 50 и 250 км (см. рис. 3). Таким образом, это главный орогенный пояс протерозойского возраста внутри Сибирского континента между Алданским щитом на востоке и Маганской провинцией на западе. В Олокитской зоне Аkitканского складчатого пояса обнажены мощные толщи вдоль западной стороны Патомского нагорья между Абчадским и Виллойским разломами в районе Мамского плато (см. рис. 3). Гораздо менее мощная сжатая патомская серия (см. рис. 3) залегает над архейскими высокометаморфизованными гнейсами и чарскими метасадками Алданского щита на юго-восточной стороне плато.

**Стратиграфия.** В пределах Патомского нагорья распространены сильноскладчатые породы в основном протерозойского возраста, окруженные с трех сторон горизонтально залегающими отложениями палеозойского и более молодого возраста Сибирской платформы (см. рис. 3). Стратиграфическая последовательность верхнего протерозоя хорошо проявлена и представлена отложениями морского шельфа, склона и фациями эвксинных бассейнов [3].

Таким образом, можно сказать, что докембрийские образования изученного региона (см. рис. 3 и 4) представлены в следующем виде.

1. Архейские высокометаморфизованные породы (чарская свита) Алданского щита, локально обнаженные на юго-востоке, — это гнейсы, мигматиты, сланцы, кварциты.

2. Раннепротерозойская серия играет подчиненную роль, несогласно залегает на высокометаморфизованных породах Алданского щита, состоит из сланцев и кварцитов (неруканская свита) и в меньшей мере из нижне- и среднепротерозойских отложений, представленных спилитами, кератофирами, хлоритовыми сланцами и основными вулканитами (медвежевская свита), распространенными в западной части нагорья.

3. Верхний протерозой; патомская серия разделена на три основные подгруппы:

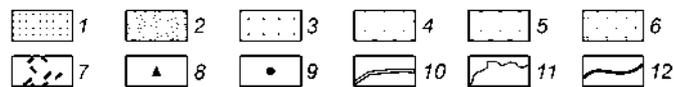
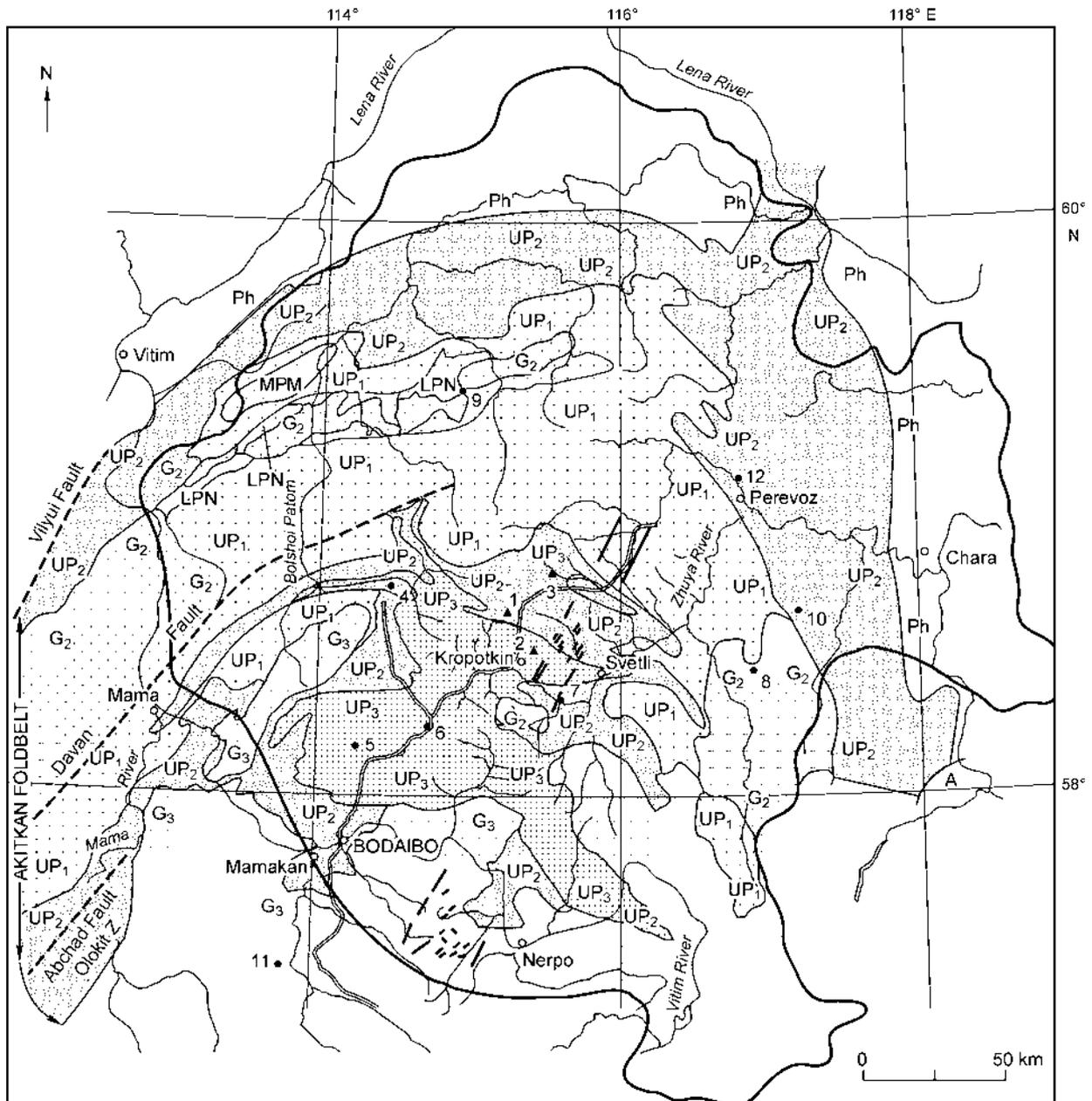
— нижняя баланганская подсерия с такими важными образованиями, как конгломераты и гравелиты;

— средняя кадаликская подсерия с преобладанием карбонатных пород, содержащих остатки водорослей, вмещает главные кварцево-жильные золоторудные месторождения этого региона и мелкокрапленое пирит-золоторудное месторождение Сухой Лог в углеродистых сланцах;

— верхняя бодайбинская подсерия — это мелкозернистые известковые и темные карбонатные породы, которые вмещают золоторудные месторождения с мелкокрапленным пиритом, чередующиеся с вулканогенной молассой с конгломератами и обломками риолитов.

4. Многочисленные интрузивные комплексы представлены несколькими разновидностями гранитов, а также дайками основного состава, которые слагают региональный дайковый пояс, имеющий СВ—ЮЗ направление [3], находящийся в 20 км восточнее месторождений Сухой Лог, Высочайшее, а также Первенец и Вернинское (см. рис. 3). Лампрофиры имеют возраст  $313 \pm 59$  млн лет, по Sm-Nd датировкам [4]. Часть гранитов имеют ранне- и среднепротерозойский возраст (байкальский этап), другие — палеозойский и датированы от 354 до 322 млн лет (герцинский этап) [5]. Ближайшая к Сухому Логу гранитная интрузия — это Малый Константиновский штوك в 6 км на ЮЗ, который датирован  $290 \pm 20$  млн лет [5].

В Патомском нагорье отложения бодайбинской (эпипротерозойской) подсерии [6] залегают без какого-либо выраженного несогласия на породах неопротерозойской кадаликской подсерии (см. рис. 4). Ее разрез значительно увеличивается по мощности в северном направлении от района Бодайбо до низовьев р. Бол. Патом и в Сухоложско-Кропоткинской области содержит толщу, сложенную песчаниками,



**Рис. 3. Геологическая карта Лено-Бодайбинского золотоносного района, по [6, 12, 27] (с частичными изменениями).**

Ph — фанерозой (платформенный чехол); UP — верхний протерозой (патомская серия): 1 — мелкообломочные карбонаты и известняки, верхний патом (бодайбинские подразделения), UP<sub>3</sub>; 2 — мраморы, углистые песчаники и сланцы, средний патом (кадаликские подразделения), UP<sub>2</sub>; 3 — конгломераты, кварциты, сланцы, нижний патом (баланганахские подразделения), UP<sub>1</sub>; 4 — МР — мезопротерозой, МРМ — медвежинская свита — вулканические и осадочные породы. LP — нижний протерозой, LPN — неруканская свита — кварцитовые сланцы; А — архей (чарские подразделения): высокометаморфизованные гнейсы, кварциты, сланцы. Магматические породы: 5 — палеозойские граниты, пироксеновые граниты, гранодиориты, G<sub>3</sub> — верхний протерозой до Ео; 6 — недифференцированные ниже- и среднепротерозойские породы: граниты, гнейсы, диабазы, мигматиты, местные вулканыты, G<sub>2</sub>; 7 — региональный дайковый пояс с указанными основными и лампрофировыми дайками. 8 — первичные россыпные месторождения золота: 1 — Сухой Лог, 2 — Первенец—Вернинское, 3 — Высочайшее. 9 — первичные жильные месторождения золота: 4 — Шусман, 5 — Васильевское, 6 — Артемовское, 7 — Усть-Джегдакар, 8 — Ходокан, 9 — Чертово Кoryто, 10 — Бульбухта, 11 — Мама-Витим, 12 — Дальняя Тайга; 10 — дороги; 11 — реки; 12 — административная граница.

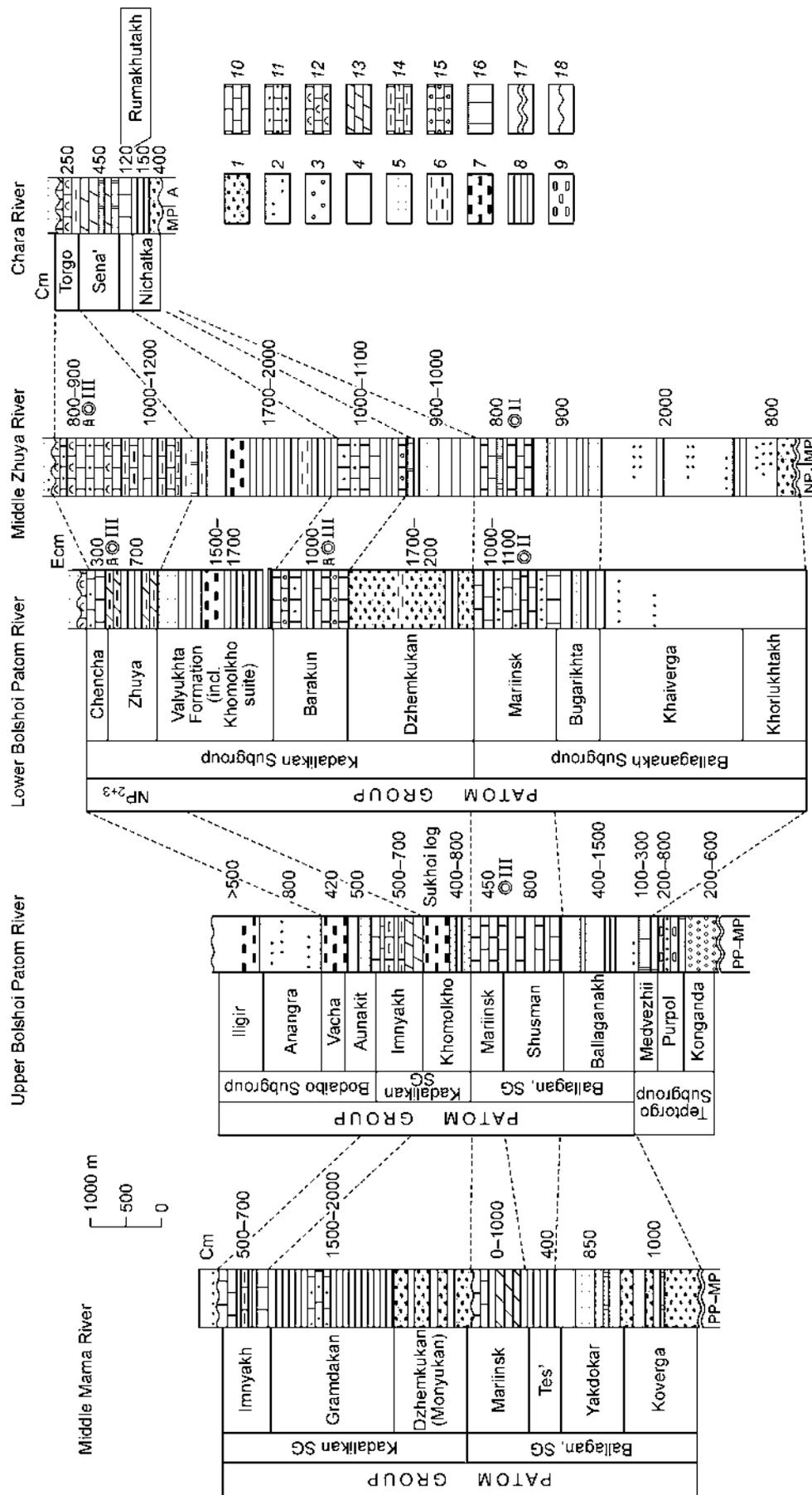


Рис. 4. Схема корреляции неопротерозойских отложений в различных зонах Ленского золотоносного района [6].

1 — конгломераты, 2 — крупнозернистые песчаники, 3 — аркозы, 4 — олигомиктовые и полимиктовые песчаники (кварциты), 6 — алевролиты, 7 — углистые сланцы и кварциты, 8 — глинистые сланцы (сланцы, филлиты), частично алевролиты, 9 — хлоритовые сланцы, 10 — известняки, 11 — онколитовые известняки, 12 — строматолитовые известняки и доломиты, 13 — доломиты, 14 — мергели, известковые сланцы, 15 — карбонатные брекчии и конгломераты, 16 — хлоритовые сланцы, основные вулканические породы, 17 — угловые несогласия, 18 — перерывы. А — архей, РР — палеопротерозой, МР — мезопротерозой, NP1 — нижний неопротерозой, ЕР — эппротерозой, Есм — эокембрий, Ссм — кембрий.

углеродистыми сланцами и филлитами, названную хомолхинской свитой, представляющую собой часть валюхтинской формации, мощностью 1500 м (см. рис. 4). Эти отложения вмещают золотоносную пиритовую минерализацию на месторождениях Сухой Лог и Высочайшее.

Самая верхняя серия (формация) (кадаликская, имняхская свиты, мощность 500—700 м) состоит из известковых сланцев, алевролитов, кварцевых и слюдисто-кварцевых песчаников и прослоев известняков. Верхняя аунакитская свита (200—1200 м) (бодайбинская подсерия) представлена полимиктовыми песчаниками, серицит-кварцевыми и углеродистыми сланцами, которые вмещают сульфидно-золоторудную минерализацию месторождений Первенец и Вернинское, расположенных в 250 км друг от друга. Выше пород аунакитской свиты залегают еще три свиты, сложенные осадками от тонко- до грубозернистых мощностью до 3700 м.

**Структура.** Патомское нагорье имеет характерные особенности региональной структуры, выраженной в том, что верхнепротерозойские метаосадки смяты в складки, оси которых систематически варьируют от СВ направления на западе до ЮВ — на востоке. В плане они формируют полукруг, с Мараканско-Тунгусской котловиной на севере и Бодайбинским синклиналием на юге. В пределах последнего находятся главные жильно-золоторудные тела. Месторождение Сухой Лог располагается в антиклинории между ними.

Породы Патомской серии были сильно сжаты во время главной деформационной фазы и сопровождалась низкой степенью регионального метаморфизма зеленосланцевой фации. Эти изменения в локальных участках на юге площади выразились как метаморфические ареолы палеозойских гранитов. Фрагменты складок обращены выпуклостью к северу по направлению к Сибирской платформе (см. рис. 3). В северном близплатформенном крае Патомского нагорья осадки имеют большую мощность, небольшую складчатость с легким отклонением к платформе и с очень низкой степенью зеленосланцевого метаморфизма. Зоны смятия встречаются на юге Бодайбинского синклинория, где мощность слоев уменьшается, породы сильно сжаты в складки и метаморфизованы при низкой и средней степени зеленосланцевой фации. Породы смяты в асимметричные, почти изоклиальные наклонные складки с вергентностью осей на юг по направлению к Мамо-Витимской зоне. Внутри нее две нижние подсерии снова приобретают большую мощность, с частыми ритмичными чередованиями флишоидного типа и простираются за район р. Лена как часть главного Ачитканского складчатого пояса, который тянется на юг к оз. Байкал (см. рис. 3). На региональной шкале последовательность деформационных событий представляется довольно простой: с первой фазой появляется складчатость типа флексур, осложненных сдвигом ( $F_1$ ), формирующей большие складки первого, второго и третьего порядков, осево-плоскостную расплюснутость, рассланцевание и кливаж. Вторая фаза меньших деформаций также широко распространена, но в основном проявляется как локально обособленные зоны малых складок изгиба ( $F_2$ ), которые придают вращением ранним  $F_1$  сплюснутым структурам. Осевые плоскости  $F_2$  обычно субвертикальные, а осевые структуры в основном непроницающие и бессистемные. И  $F_1$ , и  $F_2$  генерации проявлены на месторождении Сухой Лог и осуществляют значительный структурный контроль рудной минерализации.

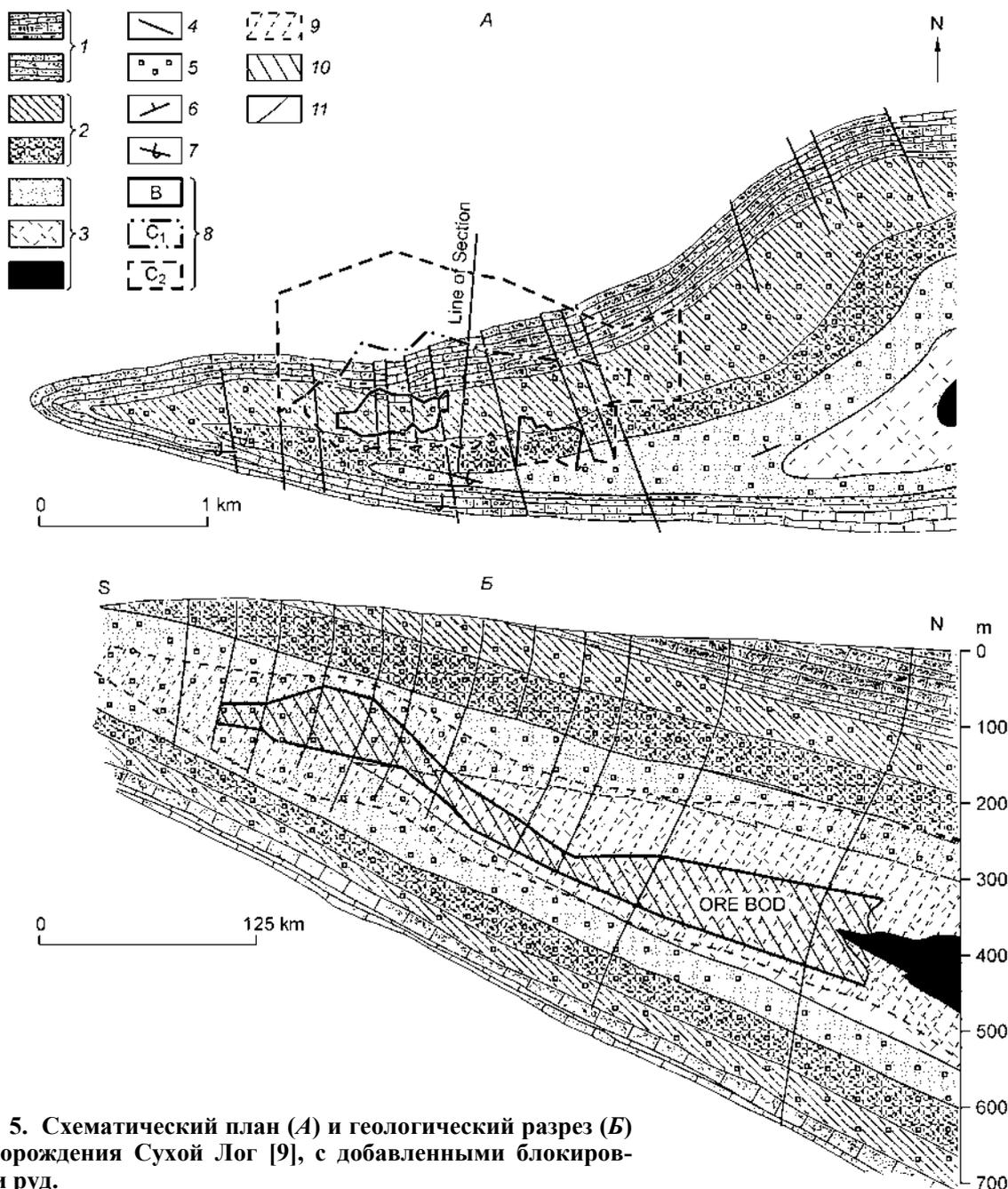
Третья деформационная фаза привела к развитию ряда непроницающих структур ( $F_3$ ), таких как складки излома, серии складок и разломно-складчатые комбинации. Вероятно, эта фаза вызвала несколько несвязанных между собой событий, по крайней мере, одно из которых привело к возникновению широко распространенных, но бедных кварцево-жильных рудопроявлений золота в Ленском золоторудном районе, включая проявления в районе Сухого Лога (см. рис. 6,А).

## ГЕОЛОГИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ

Раздел о геологии месторождения Сухой Лог базируется на обобщении данных из детальных документальных отчетов, проведенном в соавторстве с Н.П. Поповым, и на личных наблюдениях первого автора.

Предыдущие публикации содержали фондовые геологические материалы и карту м-ба 1:10 000, подготовленные В.А. Буряком и Н.К. Кочетковым (1959), и детальные данные, характеризующие породы и руды месторождения Сухой Лог, опубликованные в 1964 г. [7] и в 1969 г. [8]. Кроме того, определенные данные, геологическая карта и карта распространения золотоносных жил на месторождении Сухой Лог опубликованы в 1971 г. [3] как часть результатов регионального изучения Ленского золотоносного района. Обобщенное описание сульфидно-золотой минерализации вместе со схематической картой и разрезом были опубликованы в 1974 г. [9], где впервые были показаны уникальные качества месторождения. Более детальная статья на английском языке представлена В.А. Буряком в 1986 г. [10]. В последующей публикации в 1987 г. обсуждались условия формирования золоторудной минерализации на месторождении [11].

**Стратиграфия.** Стратиграфическая серия вмещающих пород района месторождения состоит из двух свит с согласными взаимоотношениями верхнепротерозойского возраста, названные хомолхинская (Хомолхо, hm) и имняхская (Имнях, im). Хомолхинская свита литологически подразделяется на 3 подсвиты:



**Рис. 5. Схематический план (А) и геологический разрез (Б) месторождения Сухой Лог [9], с добавленными блокировками руд.**

1 — известковые углистые алевролиты и сланцы; 2 — углистые алевролиты, филлиты; 3 — углистые филлиты, сланцы, алевролиты; 4 — разломы; 5 — вкрапленный пирит; 6 — нормальное залегание; 7 — обратное залегание; 8 — рудные блоки, выявленные бурением и подземными выработками; 9 — зона минерализации; 10 — зона промышленной добычи руды; 11 — скважины.

нижняя ( $hm_1$ ) представлена карбонатными сланцами и алевролитами с прослойками углеродистых известняков (мощностью 100—150 м); средняя ( $hm_2$ ) — серыми известняками с прослоями алевролитов и углеродистых сланцев (мощностью 110—200 м); верхняя ( $hm_3$ ) — углеродистыми сланцами, филлитами и алевролитами (мощностью 150—180 м).

Перекрывающая имняхская свита подразделяется на две подсвиты: нижняя ( $im_1$ ) — в основном известковые песчаники, сланцы и алевролиты, менее распространены известняки; верхняя ( $im_2$ ) — в основном известняки с прослойками сланцев и доломитов.

Рудосодержащая зона располагается в осадках верхней хомолхинской подсвиты ( $hm_3$ ) внутри зоны шарнира и крыльев антиклинали Сухого Лога (рис. 5).

Дальнейшее детальное стратиграфическое подразделение рудовмещающей серии верхней подсвиты хомолхинской свиты ( $hm_3$ ) основано на литологии (тип и периодичность напластования, физические

свойства, кливаж). Основываясь на этих критериях, были установлены пять элементов в этой серии, которые подробно описаны В.А. Буряком и др. [10].

**Интрузивные породы.** Небольшой гранитоидный шток — Константиновский расположен в 6 км к северо-западу от месторождения Сухой Лог и относится к конкудеро-мамаканскому комплексу. Он проявляется на поверхности в виде двух смежных выходов площадью 0,5 км<sup>2</sup> и фиксируется небольшой отрицательной гравитационной аномалией. Геофизические данные свидетельствуют о том, что тело гранитного штока имеет крутой южный и слегка наклонный северо-восточный контакты в направлении Сухого Лога. В центре штока распространены биотитовые порфиры, переходящие в тонкозернистые разновидности в контактовой зоне. Возраст его датируется  $290 \pm 20$  млн лет, т. е. пермью [12]. Шток окружен ореолом пород, измененных в процессе контактового метаморфизма, шириной 100—150 м, с большей шириной на севере, чем на юге. Несколько даек гранит-порфиров и кварцевых порфиров субширотного простирания расположены поблизости.

На значительном удалении располагаются палеозойские гранитные купола, возраст которых в южной части площади датируется как каменноугольный от  $354 \pm 12$  до  $330 \pm 10$  млн лет [4]. Дайки основных пород и лампрофиров в ЮВ части, датированные Sm-Nd методом (возраст  $313 \pm 59$  млн лет, также каменноугольный), секутся пермскими дайками гранит-порфиров с возрастом  $290 \pm 20$  млн лет [4]. Все эти интрузивы представляют собой результат главного цикла герцинской магматической активизации, последовавшей гораздо позже становления Аkitканского складчатого пояса. Однако не существует никаких доказательств, которые бы подтверждали, что были какие-то значительные воздействия герцинской магматической активизации на породы и руды месторождения Сухой Лог или на более мелкие месторождения золота, такие как Высочайшее.

**Описание вмещающих пород.** Породы, вмещающие золоторудную минерализацию, представлены хомолхинской свитой и состоят из монотонных тонкослоистых черных сланцев и алевролитов, формирование которых происходило в одном или нескольких замкнутых бескислородных бассейнах. Слоистость становится заметна при масштабе в несколько сантиметров как чередование серых алевролитов и черных сланцев, а при более мелком масштабе менее заметны тонкие слои дисперсного темного ила и аспидного сланца. Большинство слоев черных сланцев существенно гомогенные, хотя под микроскопом можно различить расслоение в результате появления тонких серицитовых чешуек. Эта слоистость на миллиметровом уровне связана с метаморфическими изменениями, но также, несомненно, отражает и дометаморфическую неоднородность слоистого осадка. В некоторых частях рудного тела встречаются небольшие участки с низким содержанием углерода и слегка отбеленным видом, которые состоят преимущественно из слюдяных или хлоритовых филлитов (названных листовитами или березитами в русской терминологии) и, видимо, являются результатом локальной, поздней стадии гидротермальной проработки пород, с небольшой, но очевидной связью с золоторудной минерализацией.

Структуры в донных отложениях, такие как отпечатки нагрузок, ранее не были найдены и описаны, также не установлено признаков кривой слоистости, знаков ряби или других характерных структур.

Независимо от исходной литологии все разнообразие осадочных пород метаморфизовано в значительной степени. Минеральный состав филлитов монотонный и содержит кварц (в значительной степени обломочный), серицит, сидерит и углеродистый материал. В подчиненном количестве встречаются анкерит, альбит, хлорит, биотит, рутил, турмалин и редко клинохлор. За исключением сидерита, все метаморфические минералы мелко- и очень мелкозернистые (до нескольких микрометров). Сидерит встречается в основном в более тонком осадке в виде отчетливых крупных порфиробластов (до 4—5 мм в длину), размеры которых более или менее постоянны внутри отдельных тонких пластов углеродистых сланцев, но заметно варьируют от одного пласта к другому. Кроме того, отдельные пласты, содержащие сидерит, часто разделены мощными интервалами углеродистых сланцев без сидерита, что указывает на их исходный (дометаморфический) карбонатный состав.

Определены три главные разновидности вмещающих пород.

1. Кварц-карбонат-серицитовые углеродистые сланцы, содержащие 12—20 % кварца, 40—70 % карбонатов, в основном сидерит-анкерита с небольшим количеством кальцита, и 10—20 % серицита. Углеродистый материал встречается в виде отдельных чешуек до 0,05 мм и составляет от 0,1 до 2,1 %, но в некоторых тонких слоях достигает 5 %. С помощью рентгеноструктурного анализа не удалось определить графит, в то же время другими методами было выявлено небольшое количество (следы) битумоидных компонентов. Установлено, что концентрат, полученный из большого объема углеродистых филлитов, подобен кеннельскому углю [7]. Предполагалось, что этот материал является преимущественно аморфным углеродом, несмотря на метаморфические преобразования отложений. Однако недавние детальные исследования микрофоссилий в образцах из месторождения Дальняя Тайга (см. рис. 3, участок 12) и из других участков Патомского нагорья определенно указывают на значительный вклад углерода биогенного происхождения (см. ниже).

2. Для сидеритовых сланцев характерно широкое распространение сидеритовых порфиробластов — до 40—60 % от объема породы. Они придают более грубую гранулярную текстуру породе и образуют узловатые (почковидные) неровности на поверхностях слоев и сланцеватости. Преимущественно слоистое (стратиграфическое) распределение карбонатных порфиробластов в сланцевых пластах и их отсутствие в промежуточных псаммитовых слоях ясно указывает на первичный осадочно-диагенетический контроль нахождения карбонатного вещества, а не на проникающий гидротермальный метасоматоз.

3. Кварцитовые алевролиты или аспидные сланцы состоят из преимущественно монодисперсных зерен кварца размером 0,1 мм с примесью серицита около 10 % и анкерита до 5—10 %. Также обычно присутствуют сидеритовые порфиробласты, но в небольших количествах.

Многочисленные кварц-карбонатные включения, прожилки и жилки распространены в филлитах и сланцах и часто содержат пирит и другие сульфиды. Внутри они обеднены углеродистым веществом, которое находится в форме тонких чешуек (0,005—0,007 мм), явно концентрирующихся вдоль пограничных зон. Включения и жилки имеют мощность от 1,5 до 6—7 мм в поперечном сечении и состоят из кварца и кристаллов карбоната размером 2—0,5 мм с агрегатами кубических и пентагон-додекаэдрических кристаллов пирита.

Большое количество полных анализов пород внутри и снаружи рудной зоны свидетельствует о значительной однородности химического и минерального составов филлитов [7]. Полуколичественный спектральный анализ филлитов и кварц-карбонатных сланцев выявил особенности распределения малых и микроэлементов, таких как барий, хром, цинк, марганец, стронций, свинец, никель, кобальт, медь, ванадий, скандий и бериллий. Мышьяк и висмут присутствуют и распространены в нижних частях рудных тел.

**Структура.** Доминирующая структура этой области — это региональная антиклиналь третьего порядка Сухой Лог, в которой и заключено месторождение. Она располагается в южной части региональной второго порядка Маракан-Тунгусской впадины (синклинорий), с которой они конгруэнтны.

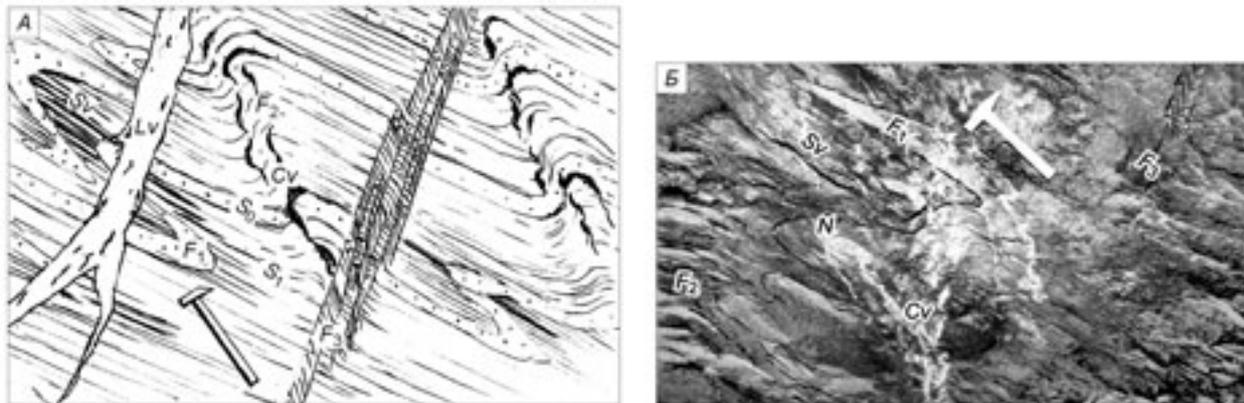
Антиклиналь Сухой Лог — это большая, наклоненная, почти изоклиальная изогнутая флексура с плоскими ветвями и резко флективным (наклоненным) шарниром (см. рис. 5). Она образовывалась одновременно с метаморфическими изменениями низкой фации прогрессивного зеленосланцевого метаморфизма и является типичной складчатой структурой первой фазы, обозначенной  $F_1$ . Эта складка и месторождение, которое она вмещает, образуют GICSIAC (Gold in Carbonaceous Shale in Anticlinal Crest; золото в углеродистых сланцах в антиклинальном гребне) по терминологии J.W. Shields [13], но отличаются от большинства известных антиклинальных типов, в которых минерализация преимущественно рассеянная. Седловидные рудные залежи почти полностью отсутствуют во внутренних пластах гребня, и проникающая осевая рассланцованность и кливаж, кажется, являются главными каналами и аккумуляторами, по которым происходит движение флюида.

Зона шарнира складки и различные структурные элементы обнаруживаются на 3,3 км вдоль гребня холма Сухой Лог (см. рис. 1,Б и 5) и немного меняют свое направление вдоль простирания. Ближе к западному концу осевая плоскость простирания на  $295^\circ$  и погружается на  $25^\circ$  к ССВ. Ось погружается приблизительно на  $8^\circ$  к ЗСЗ. Ближе к восточному концу складка менее острая, осевая плоскость простирания приблизительно на  $270^\circ$  и погружается на  $38^\circ$  к северу. Оси погружаются на  $3—5^\circ$  к ЗСЗ.

Рассеянный пирит фиксируется в обнажениях филлитов по всей длине антиклинали, но на глубине богатая минерализация развита только в центральной части. Там, где осевое погружение более значительное, чаще всего устанавливаются более высокие концентрации золота [7]. Черные сланцы по всей складке имеют проникающий кливаж осевой поверхности, определенный по ориентированным чешуйкам слюды. Также во многих местах проявлена тонкая, замкнутая в объеме, параллельная оси линейчатость, создаваемая ориентированной слюдой.

Складки второго или третьего порядка по отношению к главной антиклинали видны в стенках подземных выработок, особенно хорошо в слоистых толщах (рис. 6). Все они имеют схожие волнообразные профили и в каждом крыле складки соответствуют главной антиклинали и основной планарной сланцеватости и кливажу. В осевых кливажных зонах распространены планарные золото-кварц-пиритовые жилки с высоким содержанием золота. В некоторых местах крылья складки смещены или частично переставлены поперек нескольких ограниченных жилок. В нескольких небольших осевых складках  $F_1$  золото-кварц-пиритовые жилки также заполняют межпластовые пространства по типу седловидных (saddle-reef) структур.

Менее распространены складки меньших размеров, имеющие более заостренный симметричный профиль. В этих складках сланцеватость  $S_1$  и слоистость повернуты короткими крыльями. Также нарушение системы разломов вдоль осевой поверхности может проявляться главным образом там, где шарниры изгибаются наиболее сильно. Эти складки затушевывают более раннюю генерацию  $F_1$  складок и таким образом, появляются позже, при различных режимах температуры и давления как отдельные фазы деформации ( $F_2$ ). Многие из них пересечены или ассоциируют с небольшими золото-кварц-карбонатными жилами, с высокими концентрациями золота, разнонаправленными, миниатюрного размера и седло-



**Рис. 6. А — комбинированная структурная схема.**

Показаны взаимоотношения мелкомасштабных складок  $F_1$  со слоистостью ( $S_0$ ), сланцеватостью осевой плоскости ( $S_1$ ) и послыльными прожилками ( $Sv$ );  $F_2$  складок в сланцеватости и слоистости со скрученными прожилками ( $Cv$ );  $F_3$  складок излома в зоне смятия; поздних золото-кварцевых протяженных жил ( $Lv$ ).

**Б — фотография стенки штрека № 1.**

Показаны взаимоотношения складок  $F_1$  в слоистой пачке с послыльными прожилками ( $Sv$ ), широких  $F_2$  складок со слоистостью и сланцеватостью, крупных пиритовых нодулей, связанных со скрученными прожилками ( $Cv$ ) и зоной мелких  $F_3$  складок излома.

видной формы (см. рис. 6). Эти складки, несомненно, развивались в постметаморфических условиях, но при том температурном режиме, когда минерализующие флюиды все еще оставались подвижными.

Более поздняя генерация малых складок также представлена в виде широко разделенных узких зон перегиба ( $F_3$ ), в которых напластование и сланцеватость сильно изогнуты и изломлены без развития кварцевых жил. Зоны изгиба (или короткие ветви складок) в основном субвертикальные, с северо-западным трендом, ограничены с каждой стороны особым, имеющим разное направление, разломом параллельно осевой поверхности. Эта генерация может быть отнесена к серии малых левонаправленных субвертикальных сдвигов, показанных на рис. 5, с которыми, вероятно, связаны два типа кварцевых жил (кварцево-жильных месторождений), с простираемостью 320 и 285—290°, судя по данным Ю.П. Казакевич [3]. Складки  $F_3$  имеют явно небольшое влияние на широко распространенную минерализацию, но в то же время могут быть хрупкими предшественниками разлома, контролирующего кварцево-жильные месторождения, сформировавшиеся в позднюю низкотемпературную стадию гидротермального процесса.

**Разломы.** Ни одного крупного (главного) разлома не известно внутри месторождения Сухой Лог, но один локальный разлом лежит в основании аллювиальных отложений, непосредственно вдоль южной стороны хр. Сухой Лог (см. рис. 1,Б). Этот разлом не разделяет главные породные формации и встречается только внутри толщи патомской серии.

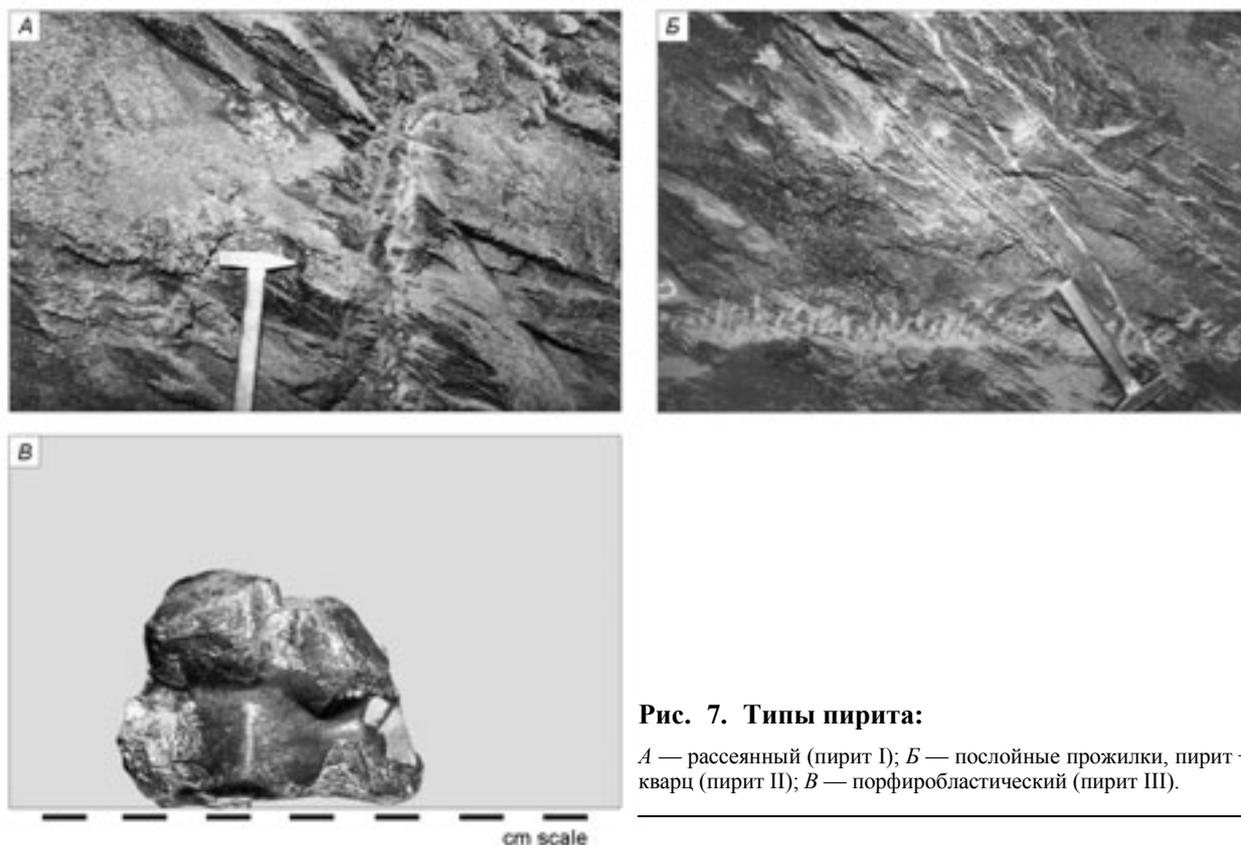
Пятнадцать или более мелких параллельных левонаправленных разломов расположены с некоторыми интервалами вдоль гребня антиклинали Сухого Лога. Они простираются на 340—350° (см. рис. 6) и погружаются на 70° на восток. Вертикальное смещение незначительно, а боковое ответвление в основном менее 3 м.

**Поздние кварцево-жильные месторождения.** Два небольших кварцево-жильных золоторудных проявления были вскрыты в 1886 г. и 1894 г. на возвышенности Сухой Лог, но золотосульфидное рудное тело, расположенное на глубине, не было достигнуто (обнаружено). Короткий отчет о результатах этих работ в районе Сухого Лога был дан Ю.П. Казакевич [3].

Другие исследователи [7, 8] обращали внимание на то, что большие малопродуктивные кварцевые жилы пересекающегося типа более многочисленны в центре антиклинали Сухой Лог и выполняют диагональные трещины мощностью до 3,5 м на верхних уровнях минерализованной зоны. Несколько иных типов жил наблюдаются в подземных выработках в других частях рудного тела и, несомненно, являются более поздними и наложенными (см. рис. 6,А).

#### ФОРМА РУДНОГО ТЕЛА

Рудное тело располагается среди пород, содержащих мелкокрапленный (рассеянный) пирит (пиритовая оболочка) (см. рис. 5 и 12), и имеет форму вытянутой линзы с неправильным плосковыпуклым поперечным разрезом. Тело погружено в северном направлении на 15—30°, имеет неровный, крутой висячий и почти плоский лежащий бок. Мощность руд (при 1 г/т Au) неравномерная и варьирует в пределах от 15 м во вскрытой по восстанию южной периферии до 140 м во внутренних частях. Верхний край



**Рис. 7. Типы пирита:**

*A* — рассеянный (пирит I); *B* — послойные прожилки, пирит + кварц (пирит II); *B* — порфиробластический (пирит III).

рудного тела на 40 км ниже поверхности вблизи западного края и на 60 м — у восточного (см. рис. 11). Рудное тело простирается вниз на глубину более 400 м и, возможно, может быть обнаружено на больших глубинах, а также может иметь значительное продолжение в углеродистых сланцах вдоль  $13^\circ$  СЗ погружения оси антиклинали.

На 2,2 км вдоль распространения рудных тел, оцененных по категории запасов  $C_1$ , где маломощные слои пересекают шарнир антиклинали, развиты две протяженные зоны плотных черных сланцев. Они более 100 м мощностью, с внутренними вытянутыми плоскими линзами (названные рудными столбами), содержащими от 4 до 9,6 г/т Au (см. рис. 12). Узкая южная зона на глубине 100—200 м имеет длину 1,8 км и ширину 300—400 км. В монографии М.М. Константинова и др. [14] приведена блок-диаграмма рудной зоны, иллюстрирующая качество руд в виде изолиний содержания золота (см. [14] рис. 6), а также детальный геологический разрез и график распределения золота в поперечном сечении рудной залежи на уровне штольни 2 (см. [14] рис. 7).

#### МИНЕРАЛОГИЯ

Пирит распространен в виде трех главных типов: мелковкрапленный (рассеянный), пластинчатый и прожилково-вкрапленный и порфиробластовый [5]. Первый тип широко распространен внутри и снаружи рудной зоны с размерами кристаллов, варьирующими от микроскопических до 1 см в углеродистых филлитах (см. рис. 7,А). Второй тип встречается в жилах в основном небольшого размера, а также широко распространен по всему рудному телу, в то время как сплошные массивные жилки (см. рис. 7,Б) локально развиты там, где пласты филлитовых сланцев пересекают крыло антиклинали  $F_1$ . Эти жилки фиксируются через одинаковые промежутки в соответствии со строго проникающим осевоплоскостным кливажем. Сульфидно-кварцевые сплошные жилки, обычно 0,3—0,8 мм толщиной, с интервалами между ними 1—4 см, развиты на протяжении не более нескольких метров. Порфиробластовый пирит встречается в виде больших отдельных кристаллов или субидiomорфных скоплений в отдельных слоях или пластах черных сланцев (см. рис. 7,В). Их размеры могут достигать 2—3 см, а содержание золота в них значительно меньше, чем в других разновидностях.

Еще один наиболее редкий вид представлен почковидным кристаллическим пиритом, встречающимся в виде скоплений 1—2 см — „глазков“, имеющих удлиненные тени кварцевого давления, формирующих „углы глазков“ или, что гораздо реже, в виде линзовидных агрегатов до 5 см длиной, состоящих из ядер кристаллического пирита, окруженного фрамбоидальными сфероидальными 1—2 мм в кон-



**Рис. 8. Зональные конкреции:**

*A* — крупная, сложенная кристаллическим пиритом и окруженная фрамбоидальным пиритом; *B* — сложенная кристаллическим пиритом с кварц-пирит-карбонатной жилкой; *B* — частично перемещенная в сланце в слою.

центрических слоях. Структура согласуется с той, что возникает при низкотемпературном синдиогенетическом росте сульфидных образований в результате деятельности бактерий (рис. 8,А).

Кроме того, установлены рудные минералы, ассоциирующие с пиритом, но в количестве менее 2 % от всех сульфидов, которые включают: пирротин, халькопирит, скуттерудит-хлоантит, сфалерит, галенит, герсдорфит, миллерит, пентландит, виоларит, рутил, магнетит. Наиболее распространен сфалерит, достигающая местами 3 %. Встречаются редкие зерна арсенопирита, аргентита, монацита, апатита и циркона.

Золото распространено в виде отдельных зерен размером до 200 мкм в трещинах в пирите, у границ зерен пирита и вблизи пирит-кварцевых границ. Большая часть золота ассоциирует с пиритом и меньшая — с кварцем.

**Текстура сульфидов.** Кроме редких почковидных пиритов синдиогенетического бактериального происхождения, о котором упомянуто выше, выделены три главных вида мелковкрапленного (рассеянного) пирита (см. рис. 7).

Пирит I — встречается в виде рассеянных мелковкрапленных идиоморфных кубических кристаллов и агрегатов в филлитовых черных сланцах рудной зоны, а также находящихся в окружающих породах (окружающей оболочке). Размер зерен варьирует от 0,1 до 2—3 мм. Концентрация золота в пиритовом концентрате из рудной зоны — 40—50 г/т. Этот пирит также довольно широко распространен во внешнем ореоле рудной оболочки и в четвертой и пятой подсвитах хомолхинской свиты. Он имеет более высокие, чем другие разновидности, содержания Ni и Co и меньшие — As, а также широкие вариации значений  $\delta^{34}\text{S}$  — от -6 до +20 ‰, указывающие на морское происхождение в результате бактериально-сульфатной редукции в обстановке придонного осадконакопления [15]. Под микроскопом хорошо видны тонкие монодисперсные структуры с несколькими кристаллами, окружающими (захватывающие в себя) сферические ядра пирита, которые заполнены мелковкрапленными (тонкорассеянными) частицами углерода, окруженными внешней пиритовой зоной, не имеющей включений углерода, с хорошо выраженным кристаллическим контуром. Это также подтверждает диагенетическое происхождение, по крайней мере, некоторых пиритов с ядром, подобным бактериальному шарикку первоначально аморфного сульфида и углерода, диагенетически раскристаллизованного и затем окруженного (обросшего) идиоморфным пиритом.

Пирит II заполняет трещины кливажа в виде сплошных или слоистых (чешуйчатых, пластинчатых) жилок и трещин, где он формирует небольшие неровные прожилки. Пирит II содержит вкрапления такого же вещества, как и пирит I, но меньшего размера. Среднее содержание золота — 53 г/т (варьирует от 27

до 203 г/т), а содержание серебра варьирует от 5 до 23 г/т. Этот пирит имеет более высокое содержание As и более однородные значения  $\sigma^{34}\text{S}$  — от +6 до +11 ‰, указывающие на гомогенный источник [15], такой как метаморфогенные флюиды, возникшие в процессе зеленосланцевого метаморфизма.

Пирит III представлен в форме одиночных порфириобластовых хорошо сформированных кристаллов до 1—2 см или в виде скоплений больших сросшихся кристаллов (см. рис. 1,В). Содержание золота низкое — от 0,1 до 5 г/т. Пирит III сформирован позже, чем пирит I и пирит II, что доказывается заключенными в нем существовавшими ранее минеральными образованиями, более низкими температурами его формирования и составом внутренних включений. В пирите III более высокое, чем в других типах пирита, содержание As и низкое — Ni, при полном отсутствии Cu.

Редкие деформированные (тектонизированные) конкреции пирита встречаются в виде линзочек с переслаивающимися песчаниками и филлитами. Пиритовые линзочки имеют более высокие содержания золота, чем вмещающая руда, — от 22 до 113 г/т.

Пирротин встречается в сланцах, кварц-пиритовых жилах и в пиритах I и II в изометричной, неровной, каплеобразной форме. Ассоциации пирротина с золотом редки.

Халькопирит формирует небольшие агрегаты в кварцевых жилах. В сланцах и пирите I и II он находится вместе с пирротинном в виде кристаллов размером от сотен до десятков миллиметров. Полуколичественный спектральный анализ показывает, что халькопирит содержит серебро. Сфалерит представлен в виде отдельных зерен в ассоциации с галенитом и халькопиритом в кварцевых и кварц-сульфидных жилах.

Галенит встречается редко и находится в форме одиночных зерен до 0,2 мм в кварце и пирите. Другие сульфиды также редки и находятся в форме небольших одиночных зерен. Аргентит очень редко встречается и ассоциирует с халькопиритом.

#### ФОРМЫ НАХОЖДЕНИЯ БЛАГОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

**Золото** в месторождении Сухой Лог встречается только в пирите или кварц-пирит-карбонатных жилах. Его концентрация достигает наивысших значений в сплошных сульфидных жилах (50—200 г/т в пирите) и имеет суммарные низкие значения в пирите III (около 5 г/т). В черных сланцах, не содержащих пирита, золото в рудных или геохимических аномальных концентрациях отсутствует.

Определены два генетических типа золота, различающихся по пробности. Высокопробное золото (900—920 ‰) находится в виде каплеобразных частиц внутри пиритовых кристаллов, ассоциирующих с другими сульфидами или кварцем. Предполагается, что такое золото внутри метаморфогенного пирита является сингенетичным и сформировано преимущественно в результате увеличения капель первоначально очень тонкодисперсного золота внутри прежде сингенетичного пирита [15], а также в углеродистых сферолитовых ядрах некоторых кристаллов пирита I. Золото с пробностью 840—880 ‰ было

Таблица 1.

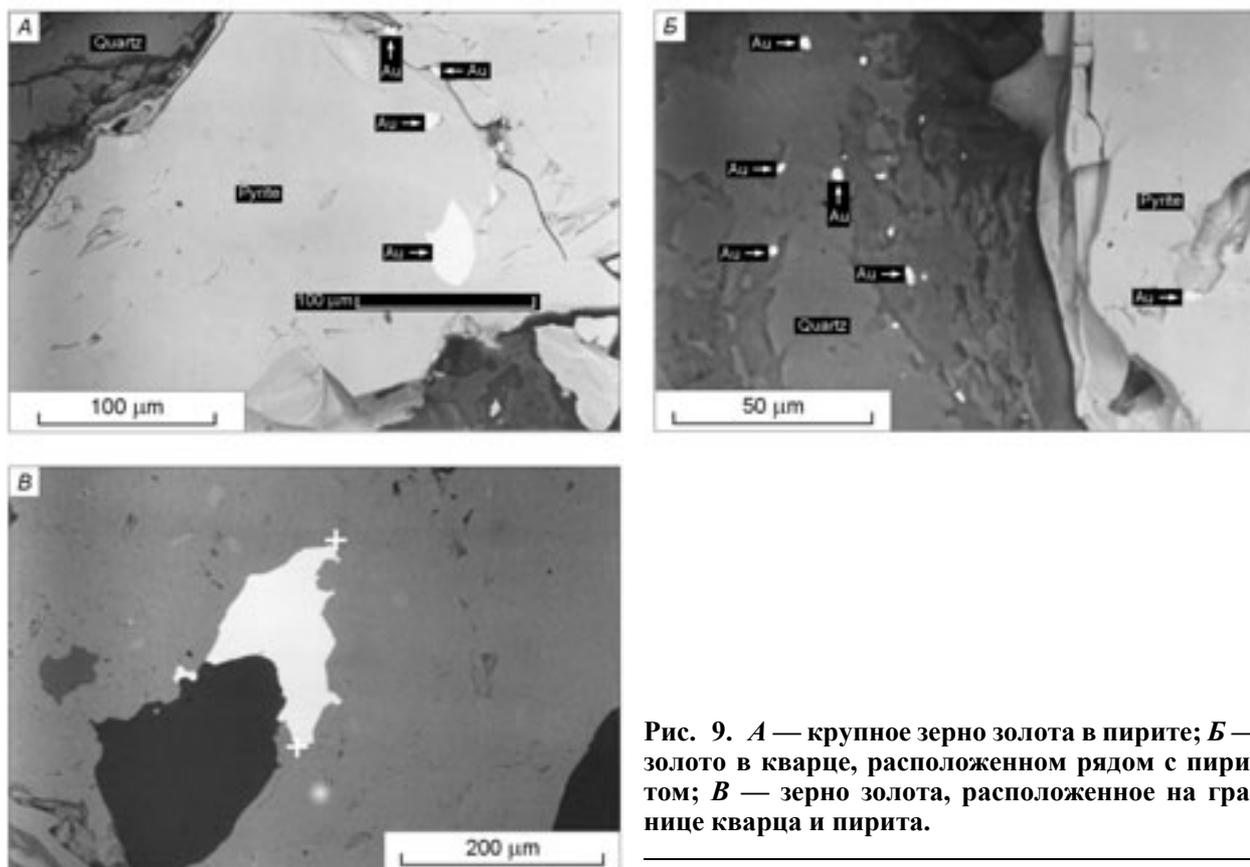
Формы встречаемости золота

Ассоциация*	Образец					
	M2	M3	M8	Среднее	Гравитационный концентрат	Флотационный концентрат
Включения в пирите	95,7	87,8	66,0	83,2	9,4	12,0
Включения в жильном минерале	—	—	2,4	0,8	—	—
Границы зерна	4,3	12,2	31,6	16,1	14,4	9,4
Выделено	—	—	—	—	76,2	78,6

Гранулометрическое распределение золота

Размер зерна, мкм	Включения в пирите	Включения в жильном минерале	В интерстициях между зернами пирита
	93,3 %	5,6 %	1,2 %
<10	5,8	73,2	100
10—20	17,1	26,8	—
20—30	16,0	—	—
30—40	16,5	—	—
40—50	44,6	—	—

\* В относительных процентах по объему.



**Рис. 9.** *А* — крупное зерно золота в пирите; *Б* — золото в кварце, расположенном рядом с пиритом; *В* — зерно золота, расположенное на границе кварца и пирита.

отложено позже в виде грубых зерен в жилах и сплошных жилках совместно с пиритом I, пиритом II, кварцем, имеет признаки гидротермального переноса и загрязнение другими металлами. Относительные содержания этих трех видов типичных форм нахождения золота показаны на рис. 9 и в табл. 1.

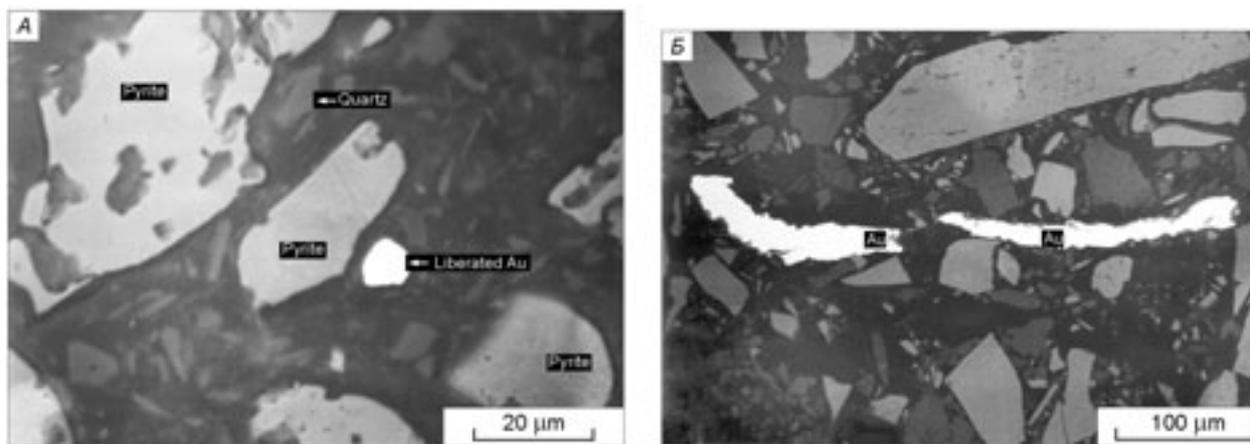
Данные о гранулометрии золота в гравитационных и флотационных концентратах показывают, что значительное количество частиц самородного золота имеют диаметр более 40 мкм и только небольшая часть — менее 10 мкм (см. табл. 1).

Внутри пирита I и II некоторые зерна золота расположены внутри или вблизи небольших зерен кварца, пирротина, халькопирита, галенита и сфалерита. В малораспространенных минералах зерна золота находятся как в свободном состоянии, так и в ассоциации с вышеупомянутыми сульфидами. Золото отлагалось из рудоносных флюидов с редкими сульфидами и, таким образом, перекрывало позднюю стадию пирита I и пирита II и почти завершило формирование первой стадией пирита III, где его содержание высокое. Внутри сплошных (пластовых) жилков и в мелкокрапленном пирите золото в основном ассоциирует с пиритом I, а в кварц-пиритовых жилах — с пиритом II. Раннее золото в пирите и вмещающей породе имеет тенденцию быть компактным по форме; поздние зерна — вытянутые, плоские или проволочковидные, как если бы они сформировались в трещинах и на контактах зерен полностью раскристаллизованных вмещающих минералов (рис. 10,Б).

**Серебро** встречается в переменных количествах в виде аргентита в других сульфидах и как соединение с золотом. Содержания серебра, по некоторым данным, выше, чем золота, но прямой корреляции между ними нет и валовое отношение золота к серебру порядка 7:1, что эквивалентно пробыности золота около 880 ‰.

**Платина и минералы платиновой группы.** Ограниченные предварительные аналитические данные, полученные в 1996 г. как часть проводимых исследований по Сухому Логу, подтвердили присутствие платины и других МПГ, так же как и в публикациях по другим подобным местоположениям России [16]. Последние исследования [17, 18] имеют значительно расширившуюся минералогическую и парагенетическую базу данных об этих и других металлах.

**Последовательность кристаллизации.** К настоящему времени установлено существование раннего синдиagenетического нодулярного пирита (что подтверждается находками нескольких больших нодулей), что, вероятно сопровождалось широким распространением и развитием предшественника диагенетических сульфидных фаз, таких как грейгит и маккиновит. Последующее уплотнение осадка и кристаллизация предшественников сульфидов в микрокристаллический пирит [19], рассеянных карбонатов железа



**Рис. 10. Морфология самородного золота.**

*А* — свободное золото во флотационном концентрате; *Б* — крупные частицы золота в гравитационном концентрате.

в сидерит были вызваны каталитическим автоокислением биогенного осадочного углерода [20], а также процессами регионального метаморфизма, развитием деформаций и складкообразования. Таким образом возникли сидеритовые порфиробласты (во всяком случае часть из них) во вмещающих сланцах и филлиты с тонкодисперсной ориентированной слюдой (серицитом).

Первая генерация мелковкрапленного пирита (пирит I) начала кристаллизоваться после появления сидеритовых порфиробластов, о чем свидетельствует тот факт, что некоторые пириты окружали существующие кристаллы сидерита. Теперь они сохранены как остаточные фрагменты внутри пиритовых кристаллов и показывают их первоначальное кристаллическое единство одновременным погасанием под микроскопом. Высокая пробность золота в пиритах первой генерации означает, что металл должен был находиться в рассеянной форме в матрице черных сланцев с начала кристаллизации пирита [21], как это происходит с другими самородными акцессорными элементами, такими как МПГ, Cu, Fe, Cr, W, Ti [22]. Эта фаза развития пирита I была, таким образом, синметаморфической до позднеметаморфической и ко времени, когда начали проявляться деформационные процессы, выраженные в возникновении осевлопоскостного рассланцевания в антиклинали Сухого Лога, начали формироваться ламеллы пирита II. Возможно, что и появление сплошных (пластовых) жилков в осевых трещинах кливажа также происходило в это время.

С продолжением этого процесса сокращается количество кварца и карбонатов, анкерита и доломита, а пирит II начинает преобладать в жильных скоплениях и формировать скопления и изолированные золото-кварц-карбонатные и золото-кварцевые жилы (см. рис. 8,Б). Сидеритовые порфиробласты расщечены прожилками пирита II, что указывает на его более молодой возраст. В течение этой стадии примеси металлов и элементы платиновой группы существовали в условиях возросшей активности серы [22] и при этом часть элементов соединялась с золотом, тем самым снижая пробность золота в пирите II.

Последовательность формирования сульфидной минерализации завершилась кристаллизацией пирита III в основном в виде одиночных крупных порфиробластов в черных сланцах или, в меньшей степени, в виде кристаллических агрегатов (см. рис. 7,В) с небольшим количеством кварца или вообще без него и с признаками деформированности. Они пересекают все другие структуры с пиритом и связанные с ними кварцевые жилы. Также отмечается соответственно снижение концентраций в них золота (<10 г/т, по сравнению с >10 г/т для пирита I и II) и повышение содержания As, а также отсутствие Cu.

Необходимо отметить, что пирит III в нашем случае является более поздней генерацией, чем это описано у А.Ф. Коробейникова и др. [18, с. 437—438], по их данным этот пирит относится к пириту II и формирует прожилково-вкрапленный тип оруденения.

#### ЗАПАСЫ И РЕСУРСЫ

Геологические ограничения минерализованных вмещающих пород и границ продуктивных зон полностью зависят от интенсивности сульфидной минерализации. Во время предварительной разведки в 1970-х годах была заложена основа для определения и опробования руд в кернах скважин и был обоснован надежный критерий выделения руд, а также проведены многие систематические проверки тех результатов, которые были получены различными российскими исследователями во время оценочных работ.

Таблица 2. Запасы и ресурсы первичного золота на Лено-Бодайбинских приисках

Месторождение	Категория минерализации	Млн т	Содержание, г/т	Золото <i>in situ</i> , млн унций	Коэффициент вскрыши (потери на тонну руды)
<b>Сухой Лог</b> в шахте	B	52	2,5—2,7	4,2—4,5	3,7
	C <sub>1</sub>	199	2,5—2,7	16,0—17,3	3,7
	C <sub>2</sub>	133	2,5—2,7	10,7—11,5	3,7
	—	384	2,5—2,7	30,9—33,3	3,7
Всего в шахте	—	384	2,5—2,7	30,9—33,3	3,7
В ответвлении шахты	Низкое качество	205	0,8	5,3	0
	C <sub>2</sub>	162	2,0—2,3	10,6—12,2	7,0
Итого	—	754	1,9—2,1	46,8—50,8	3,4
<b>Радостное*</b>	C <sub>2</sub> +P <sub>1</sub>	2,0	6,3	0,42	6,0
<b>Центральное</b>	P <sub>1</sub>	8,0	4,5	1,20	—
<b>Радостное</b>	P <sub>1</sub>	4,6	5,0	0,74	—
<b>Западное</b>	C <sub>2</sub> +P <sub>1</sub>	5,3	3,5	0,60	8,0
Итого+по месторождению Сухой Лог	—	14,6	4,9	2,4	—
<b>Вернинское</b>	C <sub>1</sub> +C <sub>2</sub>	21	2,9	2,0	3,0
	—	10—20	0,5—1,6	0,5	0
<b>Первенец</b>	C <sub>1</sub>	0,8	5,3	0,1	16
<b>Высочайшее</b>	C <sub>2</sub>	15	3,0	1,5	2,5
Всего	—	820	2,0—2,2	53,3—57,3	—

\* Разрабатывается вместе с месторождением Сухой Лог.

Российская система оценки рудных запасов и ресурсов была основана на установленных, хорошо определенных правилах и предписаниях, с большим количеством сопоставлений и проверок. Она широко применялась по всему бывшему Советскому Союзу и, начиная с основания в 1927 г., была подвергнута шести главным проверкам [23].

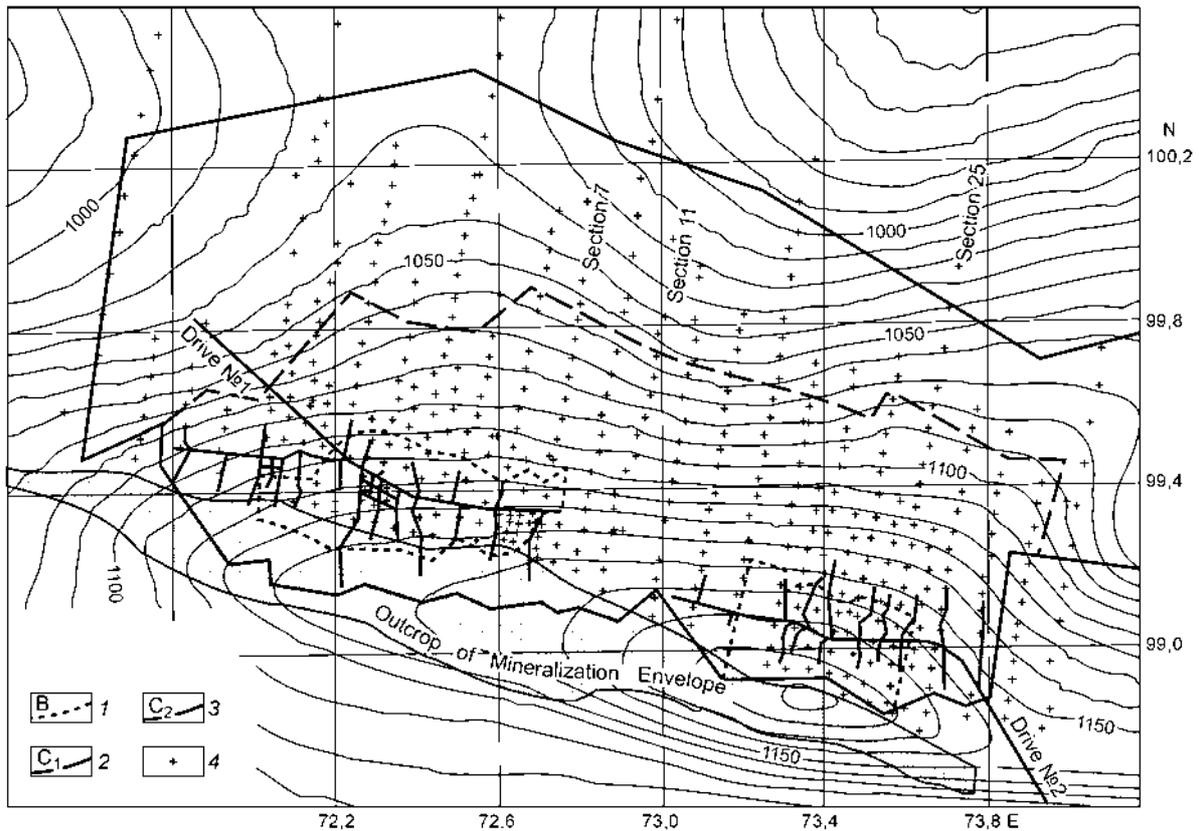
В контексте российской системы определений запасов и ресурсов, категории, показанные в табл. 2 и на рис. 11, примерно совпадают [23] с доказанными/вероятными запасами (B), измеренными/исчисленными ресурсам (C<sub>1</sub> и C<sub>2</sub>), предположительными ресурсами (P) австралийской системы оценки JORC (1996). В единицах американской системы они эквивалентны измеренным/доказанным запасам (B), исчисленным/вероятным запасам (C<sub>1</sub>), предположительным/вероятным ресурсам (часть C<sub>2</sub> и P<sub>1</sub>).

В дополнение к данным по Сухому Логу в табл. 2 представлены два небольших месторождения-спутника: Радостное Центральное и Западное, и три более удаленных месторождения такого же типа (местоположение см. на рис. 2). Подсчеты запасов руд на месторождении Сухой Лог, проведенные горными инженерами группы проектирования шахт ВНИИПромтехнологии (All-Russian Designing and Research Institute of Production Engineering) и ИРГИредмет также дают близкие оценки. Информация о пяти меньших месторождениях основана на изучении архивов, находящихся в Бодайбинской геологической экспедиции, которая проделала большую часть разведочных работ в предыдущие годы.

#### ТИП И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ

Хотя мелковкрапленная золото-МПП минерализация в черных сланцах давно известна во многих районах, таких как Любин (Польша) [20], Юго-Восточный Китай, Канада и США [21], многие из известных вмещающих оруденение пород являются маломощными платформенными осадками с ограниченной возможностью их разработки. В последнее время сообщается об аномальных уровнях МПП в большом числе месторождений золота, связанных с морскими флишоидными углеродистыми отложениями — это месторождения черносланцевой формации России, Украины, Казахстана [16—18, 24, 25], битумы из шахты Босс, Невада [26] и из шахты Магдала в Виктории, Австралия (см. ниже).

Сухой Лог может быть одним из крупнейших и, вероятно, первым главным мелковкрапленным золото-МПП месторождением, которое обнаружено в морских углеродистых сланцах, и некоторая дискуссия о типе его происхождения может дать модель для других открытий такого же типа.



**Рис. 11. План месторождения Сухой Лог с рудными телами.**

Показано расположение штреков (drives) № 1 и 2, буровых скважин и обнажения пород со слабозолотоносной минерализацией в окружающей „оболочке“. 1—3 — рудные блоки, 4 — скважины.

Как было подчеркнуто выше, региональное геологическое строение месторождения Сухой Лог и пяти меньших месторождений рассеянного золота в черносланцевых отложениях Ленского золоторудного района характеризуется распространением комплекса складчатой осадочной серии, вскрытой на северо-восточной окраине Аkitканского складчатого пояса, вмещающего Олокитскую зону, части которых простираются на запад района золоторудного поля, как показано на рис. 3 [12, 27].

Складчатый пояс является единственным террейном внутри Сибирского кратона, который не подстилается архейским основанием [27, с. 413]. Как интерпретируется в [28], это серия океанического бассейна нижне- и среднепротерозойского возраста (1800—1600 млн лет), которая после закрытия бассейна подверглась метаморфизму в позднем докембрии—рифее (650—570 млн лет) во время Алдан-Манганской коллизии в конце байкальского тектономагматического цикла [5, с. 8]. Последние достижения в микропалеонтологии [29—31] и региональное картирование дали возможность скоррелировать стратиграфическую серию Патомского нагорья с сериями, находящимися гораздо южнее — в Муйском районе (рядом с Таксимо, см. рис. 2), океанического и островодужного происхождения [32—35] и подтвердили многообразие и докембрийское единство на всем протяжении Аkitканского складчатого пояса.

В Муйском районе складчатый пояс представляет собой погранично-морскую аккреционную ассоциацию, включающую океанические островные вулканы, офиолиты (т. е. океаническая кора) [36, 37] и связанные с субдукцией интрузивы и изверженные породы нижне-, среднепротерозойского возраста. Внутри молодой (20—25 км шириной) Олокитской зоны, вдоль юго-восточной стороны более древнего аккреционного комплекса, часть серии имеет сходство с Патомским нагорьем, но также содержит дифференцированные вулканические серии до 2 км мощностью. Графитовые флишевые черные сланцы вмещают крупное Холоднинское стратиформное сульфидное месторождение, в котором, согласно данным по изотопам свинца, первоначальное синосадочно-гидротермальное (sedex) происхождение руд с возрастом как и у вмещающих пород ( $740 \pm 10$  млн лет), сопровождается метаморфической ремобилизацией в рифее 600—550 млн лет [12].

Несколько мелких месторождений также известны в Олокитской зоне. Они представляют собой барит-полиметаллические типы в карбонатных породах, медно-никелевую минерализацию в расслоенных

Довыренских интрузиях и метасоматически измененных ультрамафитах Авкитской зоны. Их окружают отложения тыйских кремнисто-железистых формаций и зеленых сланцев медвежьей свиты (см. рис. 3), которые имеют признаки формирования в бассейне рифтового происхождения, в интервале 1050—700 млн лет [12]. Так же как и часть Аkitканского аккреционного ансамбля, породы Олокитской зоны подверглись нескольким эпизодам смятия, кианит-силлиманитовому метаморфизму и изменениям регрессивной стадии, наложенным надвигам и обратному смещению.

Схожесть рифейской осадочной серии в Патомском нагорье с сериями Олокитской зоны и других частей Аkitканского складчатого пояса усиливает прямую корреляцию и намечаемую неразрывность (см. рис. 3) между золотосодержащими складчатыми формациями Патомского нагорья, формировавшимися при метаморфизме низкой степени, и Pb- и Zn-содержащими, интенсивно деформированными, метаморфизованными в более высокой степени (кианит-силлиманитовая зона) Олокитскими метаморфитами аккреционного Аkitканского складчатого пояса.

Распространенные в этой структурной обстановке, но менее деформированные метавулканыты и метаосадки Патомского нагорья интерпретируются как отложения Олокитского морского рифтового бассейна, смежного с Аkitканским морем, но также частично налегающего на эпикратонный шельф в западной части Алданского щита, представленного в юго-восточном поднятии сжатой серией, лежащей на архейских образованиях чарской свиты (см. рис. 3, 4 и 14,Б). Эта интерпретация далее подразумевает, что рифейская зона субдукции и аккреция аkitкан-олокитских океанических осадков была западнее и происходила либо в Вилуйском разломе (см. рис. 3), либо в главной геофизически определенной, но скрытой зоне Ленского разлома [27].

**Тектоническая серия.** Возраст многих вышеприведенных событий хорошо установлен по множеству изотопных данных, часть из которых также имеет большое значение для понимания происхождения золоторудных месторождений сухоложского типа.

Эти определения характеризуют следующее: 1) образования главного Аkitканского складчатого пояса — 1800—1600 млн лет, нижний протерозой (PR<sub>1</sub>) [28]; 2) метапорфиры в основании Олокитской серии Аkitканского складчатого пояса —  $1863 \pm 5$  млн лет [4]; 3) модельный Pb-изотопный возраст Холоднинского Pb-Zn гидротермально-осадочного месторождения —  $740 \pm 10$  млн лет, верхний протерозой (PR<sub>3</sub>) [12]; 4) Довыренская слоистая интрузия в средней части серии по трем различным методам —  $700 \pm 20$  млн лет [38]; 5) метапорфиры из верхней части серии —  $700 \pm 20$  млн лет, верхний протерозой (PR<sub>3</sub>) [39]. Все они имеют возраст от нижнего протерозоя до верхнего рифея (поздний докембрий) и все предшествуют финальной коллизии и закрытию Аkitканского океана. Последующий после закрытия региональный метаморфизм происходил в период 600—550 млн лет, по данным Rb-Sr метода по вмещающим метапелитам и Sm-Nd метода по гранатовым амфиболитам Холоднинского месторождения [12].

Геология и данные изотопного анализа пород Холоднинского и нескольких меньших гидротермально-осадочных полиметаллических месторождений в Олокитской группе были проинтерпретированы несколькими исследовательскими группами. Установлено, что обстановка рифтового бассейна сейчас сохранилась в виде аккрецированного Олокит-Мамского палеорифтового прогиба [40]. Похожие интерпретации, хотя и с меньшими доказательствами, но с различными акцентами на метаморфические, гидротермальные и эпитептермальные аспекты, также были предложены многими исследователями, чтобы объяснить происхождение месторождения Сухой Лог и других золоторудных месторождений этого типа в Патомском нагорье. Однако исчерпывающие изотопные данные Pb [12, рис. 148] указывают, что все разновидности золота в Ленском золоторудном районе (от мелкокрапленных до жильных и россыпных типов) имеют одинаковые изотопные составы Pb. Это может свидетельствовать только о том, что первоначальный источник золота для всех типов месторождений один, самый ранний из которых в Сухом Логе был дометаморфическим и синосадочным.

Недавние находки металлов платиновой группы в сухоложской золоторудной зоне говорят об одновременном участии и мантийного источника металлов [18, с. 437], который совмещен с источником золота и последующим их осаждением.

Таким образом, в более поздний период развития Аkitканского складчатого пояса произошли изменения главной коллизивно-субдукционной системы до ее присоединения в виде протяженного рифтового бассейна вдоль восточной окраины пояса (см. рис. 13). Как показывают данные стратиграфии (см. рис. 4), внутри регионального бассейна терригенно-молассовые конгломераты, песчаники и известняки чередовались с углеродистыми осадками, что свидетельствует о существовании эфемерных локально глубоких бескислородных бассейнов, аналогичных впадине Atlantis-II современного Красного моря. В настоящее время главный рифтовый бассейн представляет собой аккреционную Олокит-Мамскую зону с ее гидротермально-осадочной (sedimentary-exhalative) Pb-Zn минерализацией, а эпикратонное продолжение зоны включает Патомскую группу океанических гидротермально-осадочных (seafloor sedimentary-exhalative) Au-МПГ месторождений в Патомском нагорье. Вероятно, смена началась около 1350 млн лет (средний протерозой), но была, несомненно, очень долгим процессом.

**Происхождение рифтового бассейна.** В настоящее время эксгалиационное (exhalative) отложение металлов известно в различных геологических обстановках современного морского дна [41] и включает срединно-океанические хребты, осевые и внеосевые симаунты, задуговые зоны спрединга и межкратонные рифты. Примерами последнего типа являются: а) впадина Atlantis-II в Красном море, в которой стратифицированные по плотности, обогащенные металлами рассолы залегают над минерализованными осадками, со средними концентрациями золота от 0,6 до 5,6 г/т; б) Калифорнийский залив, к северу от которого зона спрединга Восточно-Тихоокеанского поднятия пересекает и раскалывает край континента. В пределах залива морские осадки бассейна Guaymas минерализованы и содержат невысокие концентрации золота, но ураганные — серебра (до 350 г/т Ag); в) Средняя Долина и впадина Escanaba в северном конце Восточно-Тихоокеанского поднятия, где активно формируются сульфидные осадки с содержанием золота в основном от <0,2 до 2 г/т, за пределами которого зона спрединга погружается под край Северо-Американского континента. Эти примеры свидетельствуют о том, что океанический спрединговый хребет имеет ресурсы эксгалиационного золота и других металлов, которые могут быть мобилизованы в процессах, происходящих в субдукционно-коллизивной обстановке при взаимодействии океанической коры (рифтовой зоны) с континентальной окраиной.

Таким образом, появление Олокинского рифтового бассейна вдоль восточной окраины гораздо более древнего Ачитканского пояса является результатом коллизии срединного океанического спредингового хребта с обращенной на восток Ачитканской субдукционной зоной. На ранней стадии субдукции СОХ передовая часть хребта должна была испытать компрессионные воздействия, но во время погружения центральной части образовалось „окно“ (slab window), которое привело в соприкосновение горячую астеносферу с породами холодной водонасыщенной аккреционной призмы [42]. Термальный эффект способствовал возникновению поднятия и локально проявленного, высокотемпературного, с низкими давлениями метаморфизма, а также локальных интрузий изверженных пород и, возможно, золото-кварцевых жильных месторождений в перекрывающих верхних частях. На поздней стадии гораздо более медленное перемещение крыла (limb) с множеством перпендикулярных разломов вниз изогнутой литосферы [43], вероятно, испытывало объемные действия растяжения слэба [42, с. 48], с возникновением глубокого окраинно-бассейнового рифта среди океанической коры во фронте зоны субдукции. Эта гораздо более долгоживущая фаза субдукции, вероятно, привела к появлению коровых и мантийных комагматов или более глубоких гидротермальных флюидов (не обязательно вулканических), переносящих золото и МПГ непосредственно в морскую обстановку, вдоль протяженной впадины и возникшей зоны спрединга поперек бассейна. Связь между субдукцией хребта (СОХ) и золоторудной минерализацией описана на примере Аляски [44]. Другой возможный пример, где золото и, по имеющимся сообщениям, элементы платиновой группы (в незначительных количествах) могут встречаться — это шахта Магдала в Ставелле (Западная Виктория в Австралии) [45].

В геологическом прошлом субдукция хребта (СОХ) происходила, вероятно, гораздо чаще, чем признано сейчас, по той причине, что почти каждое бывшее океаническое закрытие приводило либо к закрытию (смерти) срединно-океанической зоны спрединга, либо к субдукции (захоронению) активного хребта с некоторой степенью рифтового сброса и придонной испарительной минерализацией, предшествующей закрытию. Согласно V.B. Sisson и T.L. Palvis [46, с. 913], „история любого океанического бассейна должна в некоторой точке во времени включать три типа взаимодействия плит, такие как субдукция океанических хребтов, трансформация или образование желобов. Результирующая интеракция тройного сочленения должна приводить к определенному геологическому событию перед дугой на границе плиты. И все же последствия этого взаимодействия остаются одним из наиболее плохо понятых геологических явлений“.

**Послерифтовое закрытие и метаморфизм.** Соединение Алданского и Маганского блоков фундамента окончательно закрыло Олокинскую рифтовую систему, что имело результатом синметаморфические деформации осадков в этой зоне (в современном Патомском нагорье) в течение рифея (600—550 млн лет). В Олокинской зоне активно проявились процессы метаморфизма и деформации с надвигами гранулитового фундамента и смятыми в изоклинальные складки метаосадками кианит-силлиманитового состава [12]. Напротив, осадки примыкающей патомской группы были метаморфизованы только до низких степеней зеленосланцевой фации и синхронно смяты в складки в пластичном состоянии. Это различие объясняется нахождением в основании шельфовой окраины устойчивого фундамента Алданского щита, на котором была отложена патомская группа осадков, тектонически перемещенная затем в процессе надвигообразования в юго-восточном направлении, во время поздних стадий закрытия Олокинского бассейна (см. рис. 14,В).

Ранние стадии метаморфизма зеленосланцевой фации, при котором глинистые осадки трансформируются до белой слюды ± хлорита, формировали значительные объемы слабоминерализованных флюидов [47], которые могли мобилизовать исходные сульфидные фазы из углеродистых осадков, такие как грейгит, маккинавит, аморфные „бактериальные“ сульфиды, и быть источником кристалличе-

ского пирита. Золото, элементы платиновой группы и многие другие металлы, которые первоначально могли находиться в виде металлоорганических соединений [20] или в виде тиоловых комплексов [41], также во время глинисто-серицитового перехода трансформировались в неорганические кристаллические фазы и самородные металлы [17]. Во время роста *P-T*-условий многие первоначальные фазы рекристаллизовались и изменили форму и состав, имитируя поздние парагенезисы.

В исходном дометаморфическом протоместорождении Сухой Лог минерализация была, вероятно, распространена в осадках, но с низкими концентрациями на большой площади бескислородного морского дна, в наиболее глубоких участках Олокитского рифтового бассейна. Углеродсодержащие осадки, содержащие термохимическую и бактериальную серу, способны извлекать золото и другие металлы из густых стратифицированных рассолов с высокими рудными концентрациями элементов [41], как это делают определенные виды бактерий [48]. Многие металлы могут изначально формировать металлоорганические соединения при таких условиях [20] и попадают в осадок в сильно рассеянной форме. При ранней стадии диагенеза эти соединения могут полимеризоваться в кероген, кристаллизоваться в виде металлоценов или превращаться в низкотемпературные сульфиды, такие как грейгит и маккиновит, обозначающие конец сингенетической стадии.

Синметаморфические деформации патомской группы вызвали возникновение двух главных синклиналией, Бодайбо-Витимского на юго-востоке и Маракан-Тунгусского на севере-западе, разделенных Кропоткинским антиклинорием, который включает современную южную часть Сухоложской антиклинали. Метаморфические процессы наиболее активно протекали здесь при температуре около 350 °C [49] ниже тектонического покрова, покрытого, вероятно, 7-километровой или более толщиной осадков Патомской серии. Из больших исходных объемов метаморфические флюиды поступали внутрь хрупковязкой переходной зоны, в крылья антиклинали и подобным же образом поступали в антиклинальную зону меньших размеров, представляющую собой месторождение Высочайшее, расположенное в 35 км к северо-востоку. Отделившиеся флюиды извлекали рассеянные металлы, золото и платину, и приводились в движение мощными градиентами тектономагматического давления [47], вызванного тектоническим утонением крыльев складок и утолщением пелитовых слоев в шарнирах (замках) складки. Развитие проникающего осевоплоскостного кливажа ( $S_1$ ) дало возможность флюидам проходить к пелитовым горизонтам через псаммитовые слои, наделенные значительной проницаемостью, и сфокусировало большие объемы рудного вещества в зоне шарнира. Углеродистый состав пелитовых слоев, несомненно, создавал восстановительную обстановку на этой стадии для металлов в растворе, и, таким образом, золото аккумулировалось в тектонически утолщенных замковых зонах, чтобы сформировать два главных „рудных столба“ вдоль оси антиклинали (рис. 12). Повышение концентраций золота также свидетельствует о предпочтительной мобилизации золота в раствор из материала крыльев и об его переотложении в осевые зоны. Подобная геологическая ситуация установлена на месторождении Хомстейк (Homestake) [50]. Кроме того, перекрывающие имняхские известняки, возможно, функционировали как слабопроницаемый структурный горизонт, т. е. экран и, таким образом, улучшали аккумуляцию металлов в верхних уровнях антиклинальной структуры. Возникновение флексуорообразного скользящего сдвига ( $F_1$ ) на антиклиналь завершило главную синметаморфическую стадию развития месторождения.

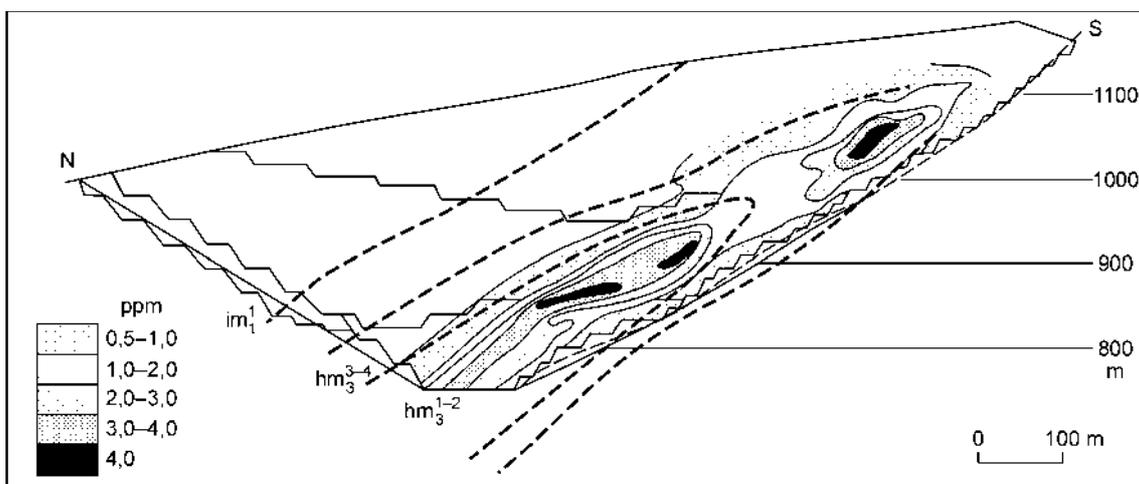
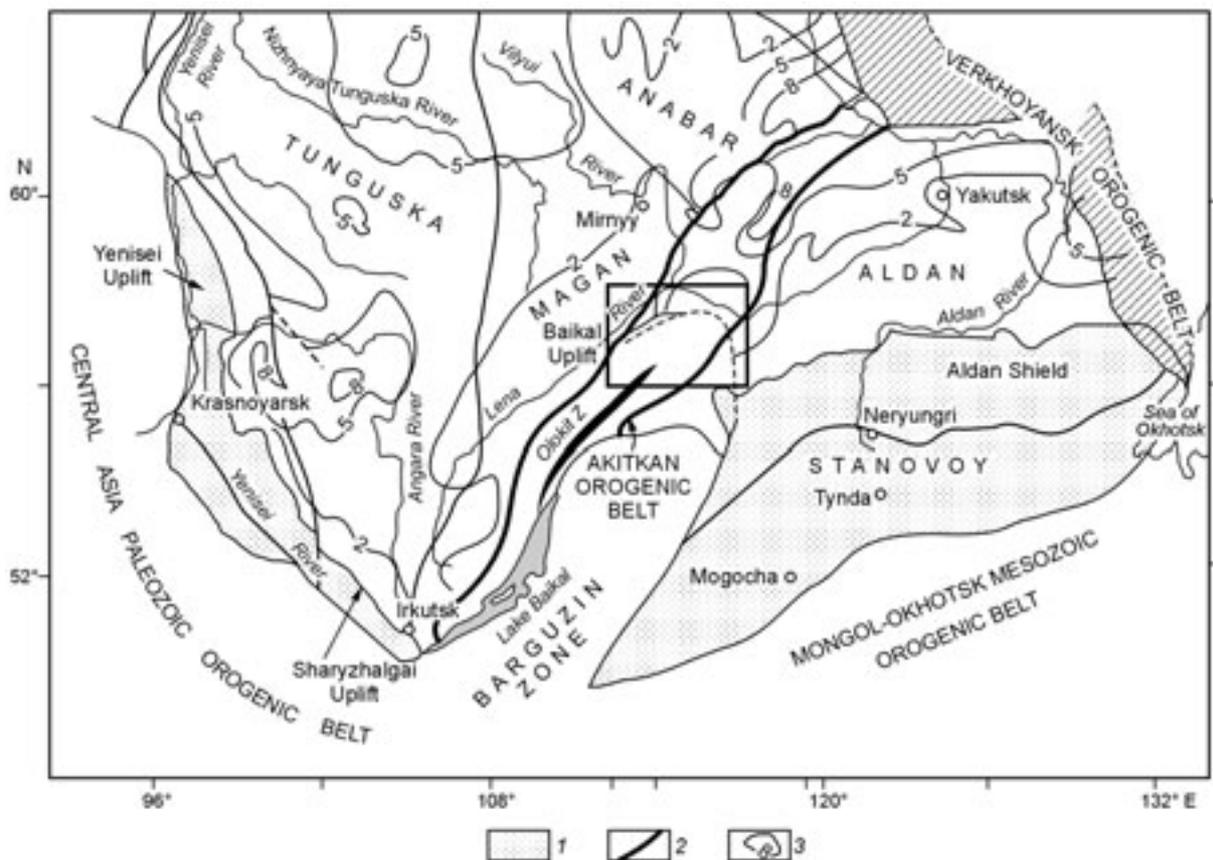


Рис. 12. Разрез через рудное тело, демонстрирующий высокопродуктивную золоторудную зону (рудные столбы).

Продолжающаяся деформация при увеличивающейся нагрузке и, вероятно, глубине вызвала появление небольших  $F_2$  непроникающих складок изгиба и ассоциирующих с ними искаженных жилков, а также возникновение постметаморфического поднятия и корового растяжения, в последующем формировавшего большие, растянутые кварцево-золотые жилы, которые при невысокой концентрации относительно крупного золота стали источником известных аллювиальных месторождений Ленского золоторудного района.

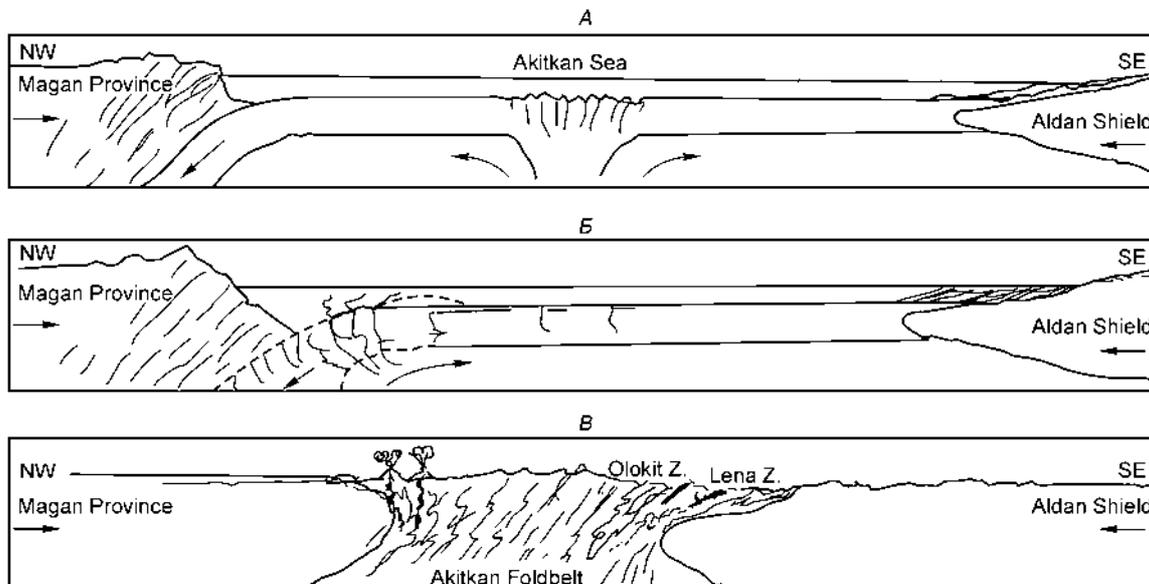
В некотором отношении ранние стадии формирования месторождения Сухой Лог кажутся подобными стадиям в недавно открытых гидротермально-осадочных (sedex-type) золоторудных месторождениях, подстилающих поле Карлин, Невада [51, 52], так как, по-видимому, оба типа были образованы благодаря коровому рифтингу.

Финальная стадия региональной деформации Патомского нагорья была, вероятно, вызвана трансдвлением южного направленного дрейфа Алданского щита, в результате которого сформировался региональный ороклин [53] с изгибанием всех основных структур в уникальную полукруглую региональную структуру, показанную на рис. 3. Это, вероятно, произошло во время деформации  $F_3$  в сухоложских сланцах с изгибанием слоев в складки и до установки северо-восточной прямолинейной зоны с дайками основного состава и лампрофиров, датированных  $313 \pm 59$  млн лет [36], т. е. между поздним рифеем и поздним каменноугольным периодами. Несмотря на то, что формирование ороклина Л.П. Зоненшайном и др. [28] связывается с югонаправленным дрейфом Алданского щита вдоль Жуинского разлома в течение позднего рифея, это может являться результатом продолжительного, сильно наклоненного (NE-SW) закрытия, а не ортогонального закрытия в результате столкновения Алданского щита с Аkitканским складчатый поясом. Если это так, то западный край Алданского щита, вероятно, простирается ниже Патомского метасадочного покрытия, по крайней мере, до зоны искривления. Локальное трансдвление такой величины (амплитуды?) требует наличия опознаваемого источника для ороклинально перемещенных к северо-востоку осадков. Как показано на рис. 13, существует геофизически определенный бассейн глубиной 5 км, в настоящее время занятый более молодыми платформенными осадками, ле-



**Рис. 13. Региональная тектоническая схема Патомского нагорья и Ленского золотоносного района с положением Аkitканского орогенного пояса и Олокитской зоны.**

Прямоугольником выделена площадь, представленная на геологической карте на рис. 3. 1 — основные обнажения, 2 — главные сутуры, 3 — мощность платформенных отложений (контуры в км).



**Рис. 14.** Схематические разрезы через область Патомского нагорья, иллюстрирующие последовательность стадий развития Аkitканского складчатого пояса и золоторудного месторождения Сухой Лог.

*А* — схождение Маганской провинции и Алданского щита с субдукцией под Маганскую провинцию; Аkitканское море с СОХ зоной спрединга и Алданский щит вместе движутся по направлению зоны субдукции (1800—1300 млн лет). *Б* — коллизия СОХ с зоной субдукции следующая за рифтингом океанической коры, поступление гидротермальных потоков, источниками которых были кора и литосферная мантия, через протяженные разломы во фронте зоны субдукции. Это возникновение эксгалиционной Au-МПП минерализации в морских осадках бескислородного рифтового бассейна привело к возникновению месторождений в Олокит-Ленской зоне (1300—600 млн лет назад). *В* — субдукция практически закрыла Аkitканский бассейн. Олокитский бескислородный бассейн с терригенными молассовыми отложениями надвинулись на Алданскую окраину, образуя Олокитскую зону и на окраине формируя синдеформационное, синметаморфическое месторождение Сухой Лог и другие месторождения Ленского золотоносного района (600—550 млн лет).

жащими сразу к северо-востоку от Патомского нагорья. Это, несомненно, являлось первоначальным положением восточной половины патомской группы до финального закрытия Аkitканского складчатого пояса.

## ВЫВОДЫ

Четыре отличительные стадии рудного процесса могут быть идентифицированы в истории золоторудного месторождения Сухой Лог.

1. Синосадочная, синдиagenетичная минерализация морских углеродистых осадков за счет стратифицированных по плотности металлоносных рассолов, источником которых служили очень большие объемы золотосодержащих, нижнекоровых гидротермальных флюидов, и МПП-содержащие мантийные флюиды, поступающие по объемным трещинам в рифтовом бассейне; „минерализация Янцзы“, по [54, 55].

2. Мелковкрапленная (рассеянная) пирит-золоторудная минерализация (пирит I, затем пирит II), развивающаяся в течение проникающей, эластичной, синметаморфической деформации и отделения летучих с проникающим флюидным переносом золота, МПП и многих других металлов из глубины крыльев складок в область шарнира антиклинали. Более высокие концентрации золота накапливались в тектонически утолщенных зонах черносланцевых образований (рудных столбах) вдоль шарнира антиклинали.

3. Постметаморфическое непроникающее мелкомасштабное изгибовое смятие ( $F_2$ ) с локальными сегрегациями в шарнирных зонах небольших кварц-золоторудных жил. На других участках формировались непроникающие, небольшие, неправильной формы кварц-пирит-золото-карбонатные жилки, а также скопления и разрозненные пиритовые порфиробласты с кварцевыми оторочками давления (пирит II). Наконец, для поздней подчиненной стадии характерно небольшое количество или вообще отсутствие кварца и деформационных особенностей (пирит III).

4. Широкое распространение, больших и удлиненных, мезотермальных низко-продуктивных золото-кварцевых жил поздней стадии, секущих главное рудное тело, и, вероятно, происходящих из него.

Таким образом, Сухой Лог определяется как сингенетическое-метаморфическое Au-МПП месторождение и, вероятно, является одним из членов спектра месторождений, формирующихся в черных сланцах. Этот спектр включает месторождения с различными источниками рудного вещества: осадочным — Zn-Pb (sedex) месторождения; смешанным осадочным и коровым — Zn-Pb-Ba ± Au месторождения; и корово-мантийным — Au-МПП месторождения — все они встречаются в пределах Олоkitско-Патомского террейна.

В течение последних нескольких лет подобные высокие концентрации МПП в черных сланцах были обнаружены в большом числе золоторудных месторождений по всему миру. Это дает основание предположить, что этот тип минерализации может встречаться как стадия, предшествующая возникновению многих орогенных золоторудных месторождений. Таким образом, в настоящее время многие законсервированные и отработанные золоторудные месторождения черносланцевой формации могут рассматриваться как крупные объекты со значительными запасами руд с низкими концентрациями полезных компонентов, но представляющими большой экономический интерес, в связи с совместной добычей Au и МПП, которые в случае раздельной добычи малорентабельны.

Авторы выражают благодарность геологам и рабочим, которые обнаружили и оценили месторождение Сухой Лог в условиях экстремальной сложности и дискомфорта Сибири. В 1980 г. члены геотехнической группы, включая Владимира Афанасьевича Буряка (руководитель), Владимира Феофановича Дубинина, Владимира Андреевича Лисия, Николая Павловича Попова, Николая Степановича Романченко и Виктора Ефимовича Рябенко, получили престижную Ленинскую премию. Брюс Вуд также выражает признательность ныне покойному Николаю Попову за поддержку в получении разрешения и обеспечения доступа к многочисленным техническим документам. Также авторы благодарны В.В. Дистлеру и коллегами из Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и неохимии (Москва), а также Г.Л. Митрофанову с коллегами из Восточно-Сибирского научно-исследовательского института геологии, геофизики и минеральных ресурсов (Иркутск) за полезные дискуссии и замечания. Предыдущая ограниченная версия этой статьи была представлена в 1995 г. Б.Л. Вудом в Сиднее на симпозиуме „Инвестиционные возможности в России“, совместно организованном Московским государственным горным университетом и Австралийским институтом горной добычи и металлургии.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Буряк В.А.** О влиянии процессов регионального метаморфизма на развитие золото-сульфидной минерализации в центральной части Ленского золотоносного района // Физико-химические условия магматизма и метасоматоза (Материалы третьего Всесоюз. прографич. совещания). М., Наука, 1964, с. 184—191.
2. **Буряк В.А.** О генезисе сульфидной минерализации Ленского золотоносного района // Геология и геофизика, 1967 (1), с. 113—118.
3. **Казакевич Ю.П., Шер С.Д., Жаднова Т.П. и др.** Ленский золоторудный район. Стратиграфия, тектоника, магматизм и проявления коренной золотоносности, Т. 1. М., Недра, 1971, 164 с.
4. **Неймарк Л.А., Рыцк Е.Ю., Левченко О.А.** Раннепротерозойский—позднеархейский возраст олоkitского комплекса (Сев. Предбайкалье) по данным U-Pb геохронологии // Докембрийская геология и геохронология Сибирского кратона и окраин. М., Наука, 1990, с. 206—222.
5. **Rundqvist D.V. and Gillen C.** Precambrian ore deposits of the East European and Siberian cratons. Elsevier, 1997, 444 p.
6. **Salop L.J.** Geological evolution of the earth during the Precambrian. Berlin, Springer-Verlag, 1983, 439 p.
7. **Стахеев И.С., Ивойлов А.С., Ли А.Ф.** Химические анализы руд и вмещающих пород месторождения Сухой Лог. Иркутск, НИИ благородных металлов (ИРГИредмет), 1964.
8. **Попов Н.П.** Некоторые особенности геологического строения и взаимосвязи сульфидной и золото-кварцевой минерализации месторождения Сухой Лог // Вопросы геологии и золотоносности Ленского района. Иркутск, 1969, с. 199—204.
9. **Popov N.P., Lisiy V.A.** The promising type of gold deposits of Siberia // Subsoil Exploration and Protection, 1974, № 7, p. 5—7.
10. **Буряк В.А., Попов Н.П., Дорофеев Д.А. и др.** Месторождение Сухой Лог // Месторождения золота в СССР, Т. 3: Геология месторождений золота Восточной и Западной Сибири. М., ЦНИГРИ, 1986, с. 173—186.
11. **Буряк В.А.** Формирование золотого оруденения в углеродистых толщах // Изв. АН СССР, Сер. геол., 1987, № 12, с. 94—105.
12. **Larin A.M., Rytsk Ye.Yu., Sokolov Yu.M.** Baikal-Patom fold belt // Precambrian ore deposits of the east European and Siberian cratons (D.V. Rundqvist and C. Gillen, eds.). Developments in Economic Geology 30, Elsevier, 1997, p. 317—362.

13. **Shields J.W.** Gold in greywacke in anticlinal crests — GIGIACS — in the Pine Creek geosyncline // Proceedings of the Australian Institute of Mining and Metallurgy Annual Conference. Darwin, 1994, p. 68—72.
14. **Константинов М.М., Некрасов Е.М., Сидоров А.А., Стружков С.Ф.** Золоторудные гиганты России и мира. М., Научный мир, 2000, 272 с.
15. **Заири Н.М., Шер С.Д., Стрижов В.П. и др.** Изотопный состав серы из зоны золотоносной сульфидной вкрапленности // Сов. геология, 1977, № 1, с. 90—98.
16. **Полуаршинов Г.П., Константинов В.М.** Новые типы платиноидной минерализации // Минеральные ресурсы России. М., 1994, с. 20—23.
17. **Laverov N.P., Distler V.V., Mitrofanov G.L. et al.** PGE mineralization at the Sukhoi Log gold deposit, eastern Siberia, Russia // 8th International Platinum Symposium, Symposium Series S18. Johannesburg, 1998, p. 189—191.
18. **Коробейников А.Ф., Митрофанов Г.Л., Немеров В.К., Колпакова Н.А.** Нетрадиционные золото-платиновые месторождения Восточной Сибири // Геология и геофизика, 1998, т. 39, с. 432—444.
19. **Pasava J.** Anoxic sediments — an important environment for PGE: An overview // Ore Geol. Rev., 1993, v. 8, p. 425—445.
20. **Kucha H.** Platinum group metals in the Zechstein copper deposits, Poland // Economic Geology, 1982, v. 77, p. 1578—1591.
21. **Coveney R.M., Nansheng C.** Ni-Mo-PGE-Au rich ores in Chinese black shales and speculations on possible analogues in the United States // Miner. Depos., 1991, v. 26, p. 83—88.
22. **Distler V.V., Yudovskaya M.A., Prokof'ev V.Y.** Hydrothermal migration of PGE // 31 st International Geological Congress: Abstracts Sec. 11.3. Rio de Janeiro, Brazil, 2000, p. 189—191.
23. **Bejanova M.P., Piskorsky H.P.** Classification of hard economic mineral reserves and resources; principles and special features: Seminar on Modern Methods of Mineral Prospecting (Tbilisi, Georgia, 30 Oct.—10 Nov.). Tbilisi, 1989, 21 p.
24. **Subbotin A.G., Zaitseva V.M.** Gold and platinum group elements in carbonaceous formations of the Ukrainian Carpathians // 31st International Geological Congress: Abstracts Sec. 11.3. Rio de Janeiro, Brazil, 2000.
25. **Rafailovich M.S.** Large gold and platinum deposits associated with black shales in Kazakhstan // Ibid.
26. **Jedwab J., Badaut D., Beaunier P.** Discovery of a palladium-platinum-gold-mercury bitumen in the Boss Mine, Clark County, Nevada // Economic Geology, 1999, v. 94, p. 1163.
27. **Rosen O.M., Condie K.C., Natapov L.M., Nozhkin A.D.** Archean and early Proterozoic evolution of the Siberian craton: a preliminary assessment // Archean Crustal Evolution, chap. 10 / K.C. Condie (eds.). Elsevier, 1994, p. 411—450.
28. **Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Natapov L.M.** Geology of the USSR a plate-tectonic synthesis / V.M. Page (ed) // Amer. Geophys. Union, Geodynamic Series, 1990, v. 21, chap. 3, p. 17—30.
29. **Станевич А.М., Немеров В.К.** Корреляция осадочно-вулканогенных образований позднего докембрия Байкало-Патомской горной области по микрофитологическим и геохимическим данным // Геология и геофизика, 1993, т. 34 (3), с. 56—63.
30. **Файзуллин М.Ш.** Новые данные о микрофоссилиях байкалия Патомского нагорья // Геология и геофизика, 1998, т. 39, с. 328—337.
31. **Хоментовский В.В., Постников А.А., Файзуллин М.Ш.** Байкалий стратотипической местности // Геология и геофизика, 1998, т. 39, с. 1505—1517.
32. **Конников Э.Г., Гибшер А.С., Изох А.Э. и др.** Позднепротерозойская эволюция северного сегмента Палеоазиатского океана: новые радиологические, геологические и геохимические данные // Геология и геофизика, 1994, т. 35 (7—8), с. 152—168.
33. **Булгатов А.Н.** Рифейские осадочно-вулканогенные комплексы Среднего Привитимья (Забайкалье), геохимические и фациальные условия их образования // Геология и геофизика, 1995, т. 36 (7), с. 34—41.
34. **Хоментовский В.В.** Событийная основа стратиграфической шкалы неопротерозоя Сибири и Китая // Геология и геофизика, 1996, т. 37 (8), с. 43—56.
35. **Немеров В.К., Станевич А.М.** Эволюция рифей-вендских обстановок биолитогеоза Байкальской горной области // Геология и геофизика, 2001, т. 42, с. 456—470.
36. **Coleman R.G.** Ophiolites — ancient oceanic lithosphere? Berlin—Heidelberg—New York, 1977, 229 p.
37. **Кележинская К.Б., Дагис Л.А., Зоркина Л.С., Прусевич Н.А.** Химизм метавулканитов офиолитовых комплексов как индикатор различных палеотектонических обстановок // Геология и геофизика, 1984 (2), с. 11—24.

38. **Neymark L.A.** Ore Pb isotopes and the origin of deposits // Isotope geochemistry of ore-forming processes. Moscow, Nauka, 1988, p. 99—116.
39. **Neymark L.A., Larin A.M., Yakovleva S.Z.** New data on the age of the Akitkan group in the Baikal-Patom foldbelt, from results of U-Pb dating of zircons // Doklady Akad. Nauk SSSR, 1991, v. 320 (1), p. 182—186.
40. **Rundqvist D.V.** Geological evolution and metallogeny of the Baikalides // Fundamental problems in ore formation and metallurgy. Leningrad, Nauka, 1990, p. 44—65.
41. **Hannington M.D., Herzig P.M., Scott S.D.** Auriferous hydrothermal precipitates on the modern seafloor // Gold metallogeny and exploration / R.P. Foster (ed.). Glasgow, Blackie, 1991, p. 249—275.
42. **Thorkelson D.J.** Subduction of converging plates and principles of slab window formation // Tectonophysics, 1996, v. 225, p. 47—63.
43. **Hilde T.W.C.** Sediment subduction versus accretion around the Pacific. Convergence and subduction // Tectonophysics, 1983, v. 99, p. 381—397.
44. **Haeussler P.J., Bradley B., Goldfarb R. et al.** Link between ridge subduction and gold mineralization in southern Alaska // Geology, 1995, v. 23, № 11, p. 995—998.
45. **Mapani B.E.S. and Wilson C.J.L.** Evidence for externally derived vein forming and mineralising fluids: An example from the Magdala gold mine, Stawell, Victoria, Australia // Ore Geol. Rev., 1998, v. 13, p. 323—343.
46. **Sisson V.B. and Pavlis T.L.** Geological consequences of plate reorganisation: an example from the Eocene southern Alaska fore-arc // Geology, 1993, v. 21, p. 913—916.
47. **Pohl W.** Defining metamorphogenic mineral deposits — an introduction // Miner. Petrol., 1992, v. 45, p. 145—152.
48. **Beveridge T.J., Murray R.G.E.** Uptake and retention of metals by cell walls of *Bacillus subtilis* // J. Bacterial., 1976, v. 127, p. 1502—1518.
49. **McCuaig T.C., Kerrich R.** *P-T-t*-deformation-fluid characteristics of lode gold deposits: evidence from alteration systematics // Ore Geol. Res., 1998, v. 12, p. 381—453.
50. **Guilbert J.M., Park C.F.** The geology of ore deposits. New York, Freeman and Co., 1996, p. 630—659.
51. **Emsbo P., Hutchinson R.W., Hofstra A.H. et al.** Syngenetic Au on the Carlin trend: Implications for Carlin-type deposits // Geology, 1999, v. 27 (1), p. 59—62.
52. **Emsbo P.** Gold in sedex deposits // Rev. Econ. Geol., 2000, v. 13, p. 427—437.
53. **Carey S.W.** The oroclinal concept in geotectonics // Proc. Royal Soc. Tasmania, 1955, Ppr. 89, p. 255—287.
54. **Fyfe W.S.** Tectonics, fluids and ore deposits: mobilization and remobilization // Ore Geol. Rev., 1987, v. 2, p. 21—36.
55. **Fyfe W.S.** Gold transport and deposition: rules of the game // Brazil Gold'91 / E.A. Ladeira (ed.). Balkema, Rotterdam, 1991.

Рекомендована к печати 30 августа 2005 г.  
Р. Колманом

Поступила в редакцию  
29 декабря 2004 г.