



СТРОЕНИЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

553.411 : 581.192.2 (571.53/65)

Поведение органического вещества и золота в условиях складчатых деформаций

Ганжа Г. Б., Арсентьева И. В.

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва, Россия

Аннотация. В статье приведён краткий обзор опубликованной литературы, посвящённой природному органическому веществу (ОВ) и его трансформации на разных этапах преобразования осадочных толщ. Показано, что изменение состава, строения и свойств ОВ сопровождалось изменением концентрации металлов, в том числе и золота. Поведение ОВ и золота в условиях складчатых деформаций авторами рассмотрено на примере формирования зон интенсивной складчатости в крупных золоторудных регионах России (Центрально-Колымском и Байкало-Патомском). С пластическими деформациями осадочных пород сопряжена активная миграция золота в составе растворимых компонентов ОВ. Возникающие при складчатости структуры выжимания и нагнетания обеспечивали закономерное разнонаправленное перемещение ОВ наиболее пониженной вязкости в области разуплотнения осадочных пород. Результат этой миграции – аномальные концентрации золота и ОВ в замковых частях складок. Интенсивно этот процесс проявился в терригенно-сланцевой толще в пределах Декдеканской зоны складчатых дислокаций (Центрально-Колымский регион), где выделена золото-битумная минерализация, представленная крупной линзовидной залежью размером 500–800 × 2500 м. Здесь единственным концентратором металла являются нефтеподобные битумы, образующие в породе тончайшую рассеянную вкрапленность.

Ключевые слова: углеродистые толщи, складчатые деформации, области выжимания и нагнетания, золото-битумная минерализация, золото-сульфидное оруденение.

Для цитирования: Ганжа Г. Б., Арсентьева И. В. Поведение органического вещества и золота в условиях складчатых деформаций. Руды и металлы. 2024. № 1. С. 36–61. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10003.

Behavior of organic matter and gold under conditions of folding deformations

Ganzha G. B., Arsentieva I. V.

FSBI “Central Research Institute of Geological Prospecting for Base and Precious Metals”, Moscow, Russia

Annotation. The article provides a brief overview of publications on natural organic matter (OM) and its transformation at various stages of the sedimentary rocks conversion. It is demonstrated, that the changes in the composition, structure, and properties of OM were accompanied by changes in the concentration of metals, including gold. The OM and gold behavior under conditions of folding deformations was examined by the authors on the example of the formation of zones of intense folding in large gold-mining regions of Russia (Central Kolyma and Baikal-Patom). Plastic deformations of sedimentary rocks are associated with active migration of gold in the composition of soluble OM components. The squeezing and injection structures that arise during the folding ensured the natural multidirectional movement of OM of the lowest viscosity into the areas of decompaction of sedimentary rocks. This migration resulted in anomalous concentrations of gold and OM in the locking parts of the folds. This process was intensely manifested in the terrigenous-shale rock sequence within the Dekdekan zone of folded dislocations (Central Kolyma region), where gold-bitumen mineralization was identified, represented by a large lens-shaped deposit 500–800 × 2500 m in size. The only metal concentrator here is oil-like bitumen forming very fine dissemination in the rock.

Keywords: carbonaceous rock sequences, folding deformations, areas of squeezing and injection, gold-bitumen mineralization, gold-sulfide mineralization.

For citation: Ganzha G. B., Arsentieva I. V. Behavior of organic matter and gold under conditions of folding deformations. Ores and metals, 2024, № 1, pp. 36–61. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10003.



В локализации многих золоторудных месторождений в углеродистых терригенных и карбонатно-терригенных толщах трансгрессивного ряда большую роль играют складчатые структуры. Со складчатыми деформациями связаны процессы неравномерного метаморфизма осадочных пород, деструкция рассеянного органического вещества (ОВ) и миграция седиментогенного золота в составе углеводородных флюидов. Большое влияние на подвижность металлоносных углеродистых комплексов и направление их миграции оказывали геодинамические особенности развития пластических деформаций – чередование областей выжимания и нагнетания. Надёжным индикатором интенсивности дислокационного метаморфизма является ОВ, тонкорассеянное в осадочных породах. Роль его в рудообразующем процессе относится к дискуссионной проблеме. По существующим представлениям, соединения углерода либо могли быть источником металла, либо служить сорбционным барьером на пути гидротермальных флюидов, обогащённых золотом [6]. Поэтому, чтобы оценить роль ОВ в формировании золоторудных объектов, необходимо провести сравнительный анализ динамики поведения ОВ и Au на разных этапах литификации и метаморфизма осадочных пород.

Органическое вещество и золото на разных этапах формирования углеродистых осадочных формаций. Значительные по мощности углеродистые осадки формировались на стадии субмаринного рифтогенеза на разной глубине. По мере развития трансгрессии в осадок поступало всё большее количество ОВ в виде взвеси, образующего с глинистыми минералами смешанную органо-минеральную систему с высокой сорбционной ёмкостью (микстинит). Вместе с продуктами разрушения кор выветривания в морской бассейн выносилось кластогенное и хемогенное Au, растворённое в воде и сорбированное углеродисто-глинистыми частицами. В результате в бассейнах накапливались углеродистые осадки в основном с кларковым содержанием металла. Более высокие концентрации золота связаны с вулканическими металлоносными сернисты-

ми и углекислыми эксгаляциями. Об этом свидетельствуют повышенные содержания металла в современных сульфидных рудах, образующихся в результате гидротермальной деятельности в спрединговых зонах Мирового океана [1].

При дальнейшем погружении осадочной толщи происходило постепенное нарастание степени преобразования пород и трансформации ОВ. Литификация осадков сопровождалась отщеплением основной массы подвижных продуктов, в которых значительную роль играли газообразные и жидкие углеводороды: углекислота, вода, сероводород, аммиак, его гомологи и другие углеводороды. В совокупности комплекс углеводородных компонентов составляет основу микронепти. Сравнение поведения ОВ и золота в условиях додеформационного литогенеза погружения и дислокационного метаморфизма позволит оценить роль разных компонентов ОВ в формировании месторождений золото-углеродистых формаций.

В результате проведённых комплексных исследований неметаморфизованных битуминозных карбонатных пород венда и нижнего кембрия восточной части Сибирской платформы установлено присутствие золота во всех фракциях ОВ (особенно в асфальтенах и смолах) и выделена парагенетическая ассоциация Au-C_{орг.} со значимыми положительными коэффициентами корреляции: $r_{0,5} = 0,51-0,77$ [18]. В растворимой части битумов и керогене Au присутствует в двух формах: свободное ультратонкое легкоподвижное и химически связанное. Для неметаморфизованного рифей-вендского терригенно-карбонатного комплекса Лено-Тунгусской провинции выявлена зависимость содержания золота от состава нефти, что подтверждается ранговыми коэффициентами корреляции Au с сернистостью ($r_{0,5} = 0,82$), содержанием смол ($r_{0,5} = 0,94$), асфальтенов ($r_{0,5} = 0,81$). Отмечается закономерное утяжеление нефтей в направлении от палеопрогибов в сторону палеоподнятий и увеличение содержания золота. Повышенные концентрации металла обнаруживаются в тяжёлых нефтях, локализованных в карбонатных коллекторах со слабой степенью катагенетических преобразований и приуро-

Табл. 1. Растворимость золота в различных фракциях нефтей Среднеботуобинского месторождения [18]

Table 1. Solubility of gold in various fractions of oils from the Srednebotuobinskoe field [18]

Фракция нефти	Масса фракции, г	Масса золота, мг	Объём растворённого Au за год		Содержание Au во фракции, г/т
			мг	%	
Асфальтены	0,8149	29,15	0,1	0,34	122,7
Асфальтены из охлаждённой нефти	0,6286	20,88	0,16	0,77	254
Нафтено-ароматические углеводороды из битуминозного доломита	0,1988	35,89	0,04	0,11	201,2
Асфальтены из битумов доломита	1,1489	33,545	0,05	0,15	43,5

ченных к наиболее приподнятым структурам, что связано с увеличением содержания асфальтенов, асфальтеновых смол, тяжёлых металлов в нефти.

Такие же результаты получены по Западной Сибири и Туркмении. В СНИИГГиМС под руководством В. И. Бгатова [18] было экспериментально доказано, что золото интенсивно растворяется в различных фракциях нефтей, особенно в тяжёлых – фракции асфальтенов (табл. 1). В этой битумной фракции концентрация металла может достигать десятков и сотен г/т. Вывод о способности нефтей мобилизовать металлы из вмещающей углеродистой толщи и транспортировать их в концентрациях, достаточных для участия в рудообразующих процессах, подтверждён недавними экспериментами И. В. Кубраковой [11]. Установлено, что в определённых физико-химических условиях (температура > 150 °С, присутствие веществ-восстановителей) происходит восстановление молекулярных форм благородных металлов в углеводородной среде с образованием наночастиц, которые могут служить формой переноса золота природными углеводородными растворами.

Важным фактором, влияющим на концентрацию металла, является степень катагенеза осадочной толщи. В бассейнах с невысокой степенью катагенеза содержание смолисто-асфальтеновых компонентов в битумах составляет 70–80 %, а содержание золота в них выше, чем в материнских породах [18]. В более жёстких термобарических условиях отме-

чается уменьшение содержания асфальтенов, асфальтеновых смол и связанного с ними металла. Повышенные концентрации золота обнаруживаются в тяжёлых нефтях, локализованных в карбонатных коллекторах со слабой степенью катагенетических преобразований и приуроченных к наиболее приподнятым зонам.

Выделено несколько этапов постседиментационного преобразования органики, заключённой в осадочных породах [21]:

1. Первые перемещения ОВ, находящегося в состоянии истинного или коллоидного раствора, проявляются уже в диагенетическую фазу. В результате возникают вторичные концентрации ОВ в виде жильных и гнездовых скоплений, которые сохраняют основные черты материнского субстрата и состоят из вещества липидной природы и продуктов преобразования углеводно-белкового материала.

2. Основная масса подвижных битумов отщепляется от ОВ в зоне катагенеза. В эту фазу происходит обуглероживание исходного ОВ – его уплотнение, потеря функциональных периферических групп, увеличение содержания углерода, сопровождающееся новообразованиями битумов. Остаточное ОВ (кероген) образует в неметаморфизованных осадках сгустки, прожилки и корочки, обволакивающие обломочные и аутигенные минералы, и представлено битумами типа асфальтита и низшего керита.

3. Завершаются постседиментационные преобразования осадочных толщ метагенезом, который является промежуточной стадией меж-

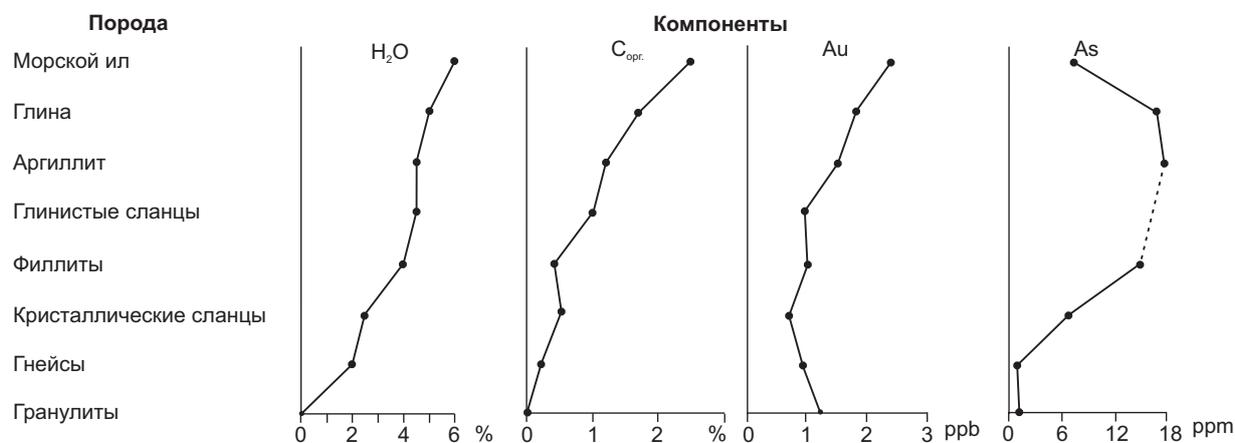


Рис. 1. Поведение $C_{орг.}$, Au, H_2O и As в процессе литификации и метаморфизма осадочных пород [24]

Fig. 1. Behavior of $C_{org.}$, Au, H_2O , and As in the course of lithification and metamorphism of sedimentary rocks [24]

ду литогенезом погружения и метаморфизмом осадочных толщ, вовлечённых в складчатые деформации. На этом этапе ОВ соответствует продуктам высшей карбонизации битумов ряда высшего керита и антраксолита.

Проблема миграции золота в условиях погружения осадочной толщи и на разных стадиях преобразования осадков изучена слабо. Но немногочисленные исследования, проведённые российскими и зарубежными геологами, свидетельствуют о высокой подвижности металла в зонах литогенеза. Интересные данные приводятся немецкими учёными, изучавшими осадочные породы, в разной степени литифицированные и метаморфизованные [24]. В результате нейтронно-активационного анализа содержаний 25 микроэлементов в образцах от морских осадков до гранулитов установлено значительное перераспределение многих элементов, которые считались малоподвижными. Из всех микроэлементов золото выделяется пространственной сопряжённостью с $C_{орг.}$, которая отчётливо прослеживается на стадиях литификации – начального регионального метаморфизма (рис. 1). В зонах метаморфизма органическое вещество графитизируется, снижается содержание золота.

Примером высокой подвижности золота в углеродистых осадочных толщах могут быть терригенные комплексы Южного и Западного

Верхоянья, подвергшиеся поздним катагенетическим, метагенетическим и раннеметаморфическим преобразованиям [10]. Нейтронно-активационным методом (Уральское ТГУ) определено содержание золота в 654 пробах карбона, перми и триаса Верхоянского терригенного комплекса. Пробы отбирались вне рудных полей и в породах, не содержащих эпигенетических сульфидов и прожилков. В результате проведённых исследований установлено, что углеродистые осадочные породы, претерпевшие изменения в интервале катагенез – метагенез – зеленосланцевый метаморфизм, в среднем теряют до 44 % золота, а их глинистые разности – до 64 %. Максимальные потери металла фиксируются в глинистых породах на стадии позднего метагенеза – начального метаморфизма (около 80 %). Важную роль в преобразовании осадочных пород верхоянского терригенного комплекса играли дислокационные процессы [20]. Слагающие его осадочные толщи смяты в линейные и брахиформные складки и надвинуты на структуры Сибирской платформы. Характерно широкое развитие сложнопостроенных чешуйчато-надвиговых структур. В современном строении складчато-надвигового Верхоянского пояса отмечается чередование антиклинорных и синклинорных зон. С направлением складчатых и разрывных структур согласу-

ется метаморфическая зональность и распространение основных золото-кварцевых месторождений.

В предлагаемой статье рассматриваются особенности поведения ОВ и Au в зонах интенсивных складчатых деформаций углеродистых терригенных и карбонатно-терригенных комплексов. Исследования проводились в различных по геологическому строению и возрасту складчатых областях, являющихся крупными золоторудными регионами России (Центрально-Колымский (ЦКР) и Байкало-Патомский (БПР)). Приведённые материалы и выводы основаны на большом объёме работ по определению содержаний Au и $C_{орг.}$ и связи их с текстурно-структурными особенностями строения складчатых структур. Это позволило установить общие закономерности дислокационного метаморфизма углеродистой толщи и влияние его на направление миграции золотоносных водно-углеводородных флюидных потоков. Миграция золота в составе растворимых компонентов ОВ может быть продемонстрирована на примере золото-битумной минерализации, приуроченной к участкам интенсивной складчатости сланцевой толщи ЦКР.

Центрально-Колымский регион – один из крупнейших регионов россыпного и рудного золота России. В его углеродисто-терригенных толщах распространены и достаточно хорошо изучены месторождения золото-кварцевой, золото-сурьмяной, золото-редкометалльной и другой минерализации. Установлено, что основная часть золота известных рудных объектов имеет наложенный характер, тесно связана с жильной и прожилковой кварцевой минерализацией и отлагалась из гидротермальных растворов с поздними сульфидами. В одной из структур региона выявлен новый тип оруденения, локализованный в углеродистых сланцах и не связанный ни с золотоносными кварцевыми жилами, ни с сульфидными рудопоявлениями. В зонах интенсивной складчатости установлены повышенные концентрации Au в составе битумоидов [3].

В тектоническом отношении ЦКР охватывает юго-восточную часть Яно-Колымской складчатой системы. Разрез осадочных пород,

слагающих структуру, в целом непрерывный и представлен мощными, преимущественно терригенными углеродистыми отложениями Верхоянского комплекса пермского, триасового и юрского возрастов, испытавшими преобразование от позднего катагенеза до слабого регионального метаморфизма хлоритовой, реже биотитовой фации [5, 22]. Наибольшим распространением пользуются пермские и юрские стратифицированные осадочные комплексы. В позднепермское–раннемеловое время толща была дислоцирована и собрана в крупные линейные складки северо-западного простирания. Здесь выделяются две крупные линейные структуры – Аян-Юряхский антиклинорий, сложенный преимущественно триасовыми и пермскими отложениями, и Иньяли-Дебинский синклинорий, сложенный отложениями триас-юрского возраста (рис. 2). С завершающей фазой формирования этой структуры связано внедрение интрузивных тел и даек, относящихся к позднемезозойской гранодиорит-гранитовой и гранитовой формациям.

Район проведённых исследований расположен в пределах Аян-Юряхского антиклинория, представленного тремя сопряжёнными складками северо-западного простирания – Колымской и Тенькинской антиклиналями и разделяющей их Таяхтахской синклиналью. Основная структура района – фрагмент северо-западного фланга Тенькинской антиклинали, вдоль оси которой протягивается одноимённый разлом, контролирующий распределение золото-кварцевой минерализации. Выделенная площадь расположена в бассейнах рек Дегдекан и Токичан – левых притоков р. Неручи и входит в состав Тенькинской металлогенической зоны (рис. 3). В геологическом отношении она представляет собой область развития морских терригенных отложений пермского возраста. Осадки плохо стратифицированы, характеризуются литологической монотонностью разрезов и отсутствием маркирующих горизонтов. В составе осадочных пород преобладают глинистые сланцы, алевролиты и диамиктиты.

Более 50 % рассматриваемой площади занимают верхнепермские отложения пионер-

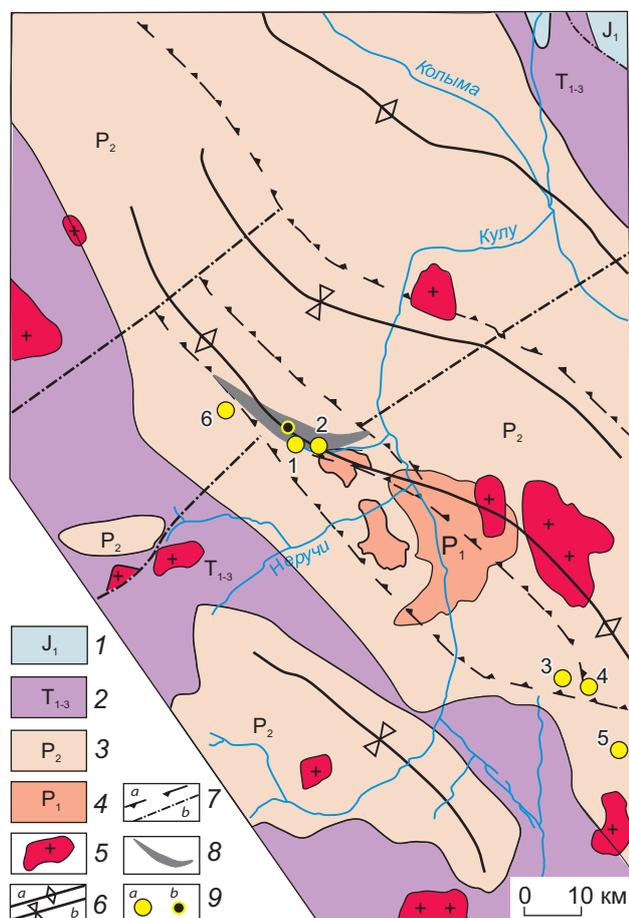


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Аян-Юряхского антиклинория (составлена по материалам [14]):

1 – нижнеюрские отложения: песчаники, алевролиты, аргиллиты, туфы андезитов, базальты; 2 – триасовые отложения: аргиллиты, алевролиты, песчаники, линзы известняков; 3 – верхнепермские отложения: алевролиты, аргиллиты, песчаники, диамиктиты, конгломераты; 4 – нижнепермские отложения: алевролиты, аргиллиты, песчаники; 5 – меловые граниты, гранит-порфиры, гранодиориты; 6 – оси складок (*a* – антиклиналей, *b* – синклиналей); 7 – тектонические нарушения (*a* – надвиги, *b* – разломы); 8 – Дегдеканская зона складчатых дислокаций; 9 – *a* – золото-кварцевые месторождения (1 – Верное, 2 – Дегдекан, 3 – Наталка, 4 – Омчак, 5 – Павлик, 6 – Боец), *b* – золото-битумное проявление

Fig. 2. Schematic geological map of the Ayan-Yuryakh anticlinorium (compiled based on materials from [14]):

1 – Lower Jurassic formations: sandstones, siltstones, mudstones, andesite tuffs, basalts; 2 – Triassic formations: mudstones, siltstones, sandstones, limestone lenses; 3 – Upper Permian formations: siltstones, mudstones, sandstones, diamictites, conglomerates; 4 – Lower Permian formations: siltstones, mudstones, sandstones; 5 – Cretaceous granites, granite porphyries, granodiorites; 6 – axes of folds (*a* – anticlines, *b* – synclines); 7 – tectonic disturbances (*a* – thrusts, *b* – faults); 8 – Degdekan zone of folded dislocations; 9 – (*a*) gold-quartz deposits (1 – Verное, 2 – Degdekan, 3 – Natalka, 4 – Omchak, 5 – Pavlik, 6 – Boets), (*b*) – gold-bitumen occurrence

ской свиты. Свита является наиболее монотонной глинистой частью пермского разреза и имеет мощность до 2000 м. Детальное изучение толщи позволило выделить в ней несколько разновидностей углеродсодержащих сланцев – глинистые, кремнисто-глинистые, доломитисто-глинистые и пиритсодержащие глинистые сланцы, которые образуют три пачки ритмичного переслаивания мощностью от 200 до 700 м. Выше по разрезу их сменяют глинисто-алевролитовые отложения мощностью около 200–250 м. Необычным литологическим составом выделяется атканская свита, которая протягивается двумя удлинёнными, с отдельными раздувами, полосами северо-западного простирания. В ней преобладают диамиктиты, представляющие собой глинистые сланцы с примесью песчаного и гравий-

но-галечного материала и редкими валунами. Среднее содержание $C_{орг}$ в сланцах пионерской свиты – 1,52 %, в диамиктитах атканской свиты – 0,45 % [2].

По результатам литогеохимической съёмки в пионерской свите, являющейся рудовещающей для золото-кварцевых месторождений (Дегдекан и Верное), на основе анализа 470 проб углеродистых сланцев, не содержащих сульфидов и кварцевых прожилков, обнаружена высококонтрастная аномалия Au, развитая на фоне ореола выноса металла ($< 1 \text{ мг/т}$)¹ (чувствительность определения 1 мг/т). Для определения концентрации золота использовал-

¹ Содержание золота определялось в отделении экспериментальных исследований в г. Тула (ЦНИГРИ).

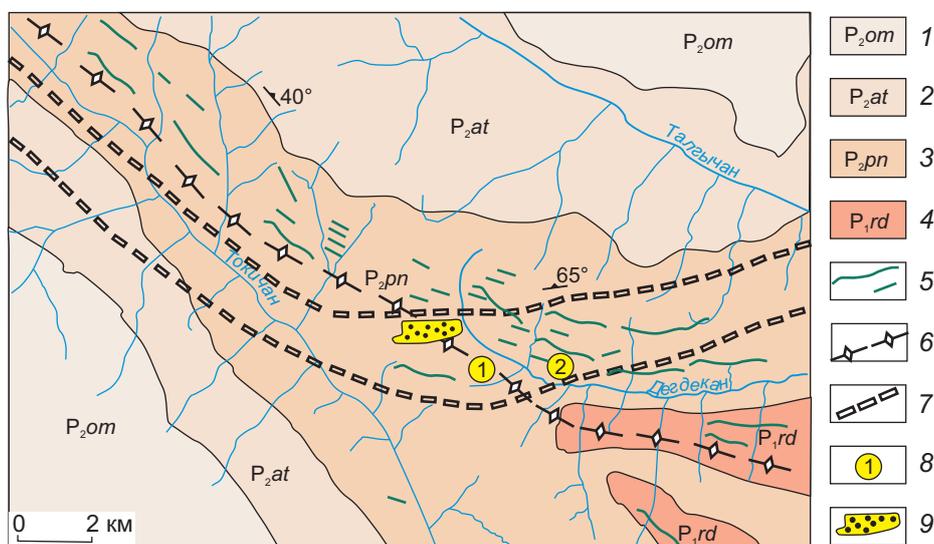


Рис. 3. Геолого-структурная схема северо-западного участка Тенькинского рудного района (составлена по материалам (Ю. П. Карелин и др., 1990)):

верхнепермские свиты: 1 – омчакская (алевролиты, глинистые сланцы, прослой диамиктитов), 2 – атканская (диамиктиты, алевролиты, песчаники, когломораты), 3 – пионерская (глинистые сланцы, алевролиты, песчаники); 4 – нижнепермская родионовская свита (алевролиты, алевролитовые глинистые сланцы с прослоями алевролитов и песчаников); 5 – позднемерловые и позднеюрские дайки; 6 – ось Тенькинской антиклинали; 7 – контуры Дегдеканской зоны складчатых дислокаций; 8 – золото-кварцевые месторождения: 1 – Верное, 2 – Дегдекан; 9 – площадь распространения золото-битумной минерализации

Fig. 3. Schematic geological-structural map of the northwestern Tenkinsky ore region (compiled based on materials from Yu. P. Karelin et al., 1990):

Upper Permian formations: 1 – Omchak (siltstones, shales, diamictite interlayers), 2 – Atkan (diamictites, siltstones, sandstones, conglomerates), 3 – Pioneer (shales, siltstones, sandstones); 4 – Lower Permian formation: Rodionovskaya (siltstones, silty shales with interlayers of siltstones and sandstones); 5 – Late Cretaceous and Late Jurassic dikes; 6 – axis of the Tenkinsky anticline; 7 – outlines of the Degdekan zone of folded dislocations; 8 – gold-quartz ore deposits: 1 – Vernoe, 2 – Degdekan; 9 – area of distribution of gold-bitumen mineralization

ся пробирно-спектральный анализ с исходными навесками материала 50–100 г. Было установлено, что повышенные концентрации золота связаны с перераспределением ОВ и битуминизацией осадочных пород в пределах Дегдеканской зоны складчатых дислокаций. Это явилось основанием для выделения золото-битумного типа оруденения в составе золото-углеродистой формации, в котором единственным концентратором золота являются нефтеподобные битумы. Для определения контура распространения золото-битумной минерализации использовались пробы слабыветрелых пород с содержаниями металла около 1 г/т и более, а также более интенсивно изме-

нённые породы с содержаниями до десятых долей г/т. Во всех случаях использовались пробы с содержанием $C_{орг.} > 1,5 \%$. Выделенная золото-битумная залежь в плане имеет линзовидную форму размером 800×2500 м со средним содержанием металла 2,94 г/т.

Дегдеканская зона складчатых дислокаций, с которой связано формирование золото-битумной минерализации, прослежена от верхнего течения р. Дегдекан вдоль долины р. Токичан до её верховьев (см. рис. 3). Видимая мощность структуры в бассейне р. Дегдекан – 2,5 км, р. Токичан – 1,5 км. Зона пересекает шарнир Тенькинской антиклинали под острым углом и представлена изоклиналь-



ми складками, запрокинутыми к югу. Общее восточно-северо-восточное простирание осей складок к западу постепенно сменяется на субширотное и северо-западное. В плане зона складчатых дислокаций имеет дугообразную форму, обращённую выпуклой стороной к югу, и по механизму формирования отвечает зоне «пластичного надвига». Надвиговые движения пластичных осадочных пород обусловили деформацию северо-восточного крыла Тенькинской антиклинали и её локальный изгиб в районе Дегдеканского рудного поля. Зона складчатых дислокаций сформировалась в поздне меловое время после внедрения позднеюрских даек и синхронных с ними золото-кварцевых руд Дегдеканского рудного поля. В зоне интенсивной складчатости дайки были будинированы, а золотоносные кварцевые жилы и прожилки – будинированы и птигматизированы.

Формирование выделенной структуры сопровождалось неравномерными метаморфическими преобразованиями рудовмещающей толщи, проявившимися в серицитизации сланцев, замещении сингенетичного пирита пиротином, раскристаллизации кремнистых пород, перераспределении и графитизации ОВ. На большей части изученной территории, где указанные признаки проявлены весьма интенсивно, установлено снижение содержания $C_{орг.}$ на 30–50 % (в графитизированных сланцах составило 1 %, в диамиктитах – 0,38 %). В пределах новообразованной складчатой структуры осадочные породы испытали в целом слабые метаморфические изменения, выраженные в незначительной перекристаллизации породообразующих минералов. Это подтверждается широким распространением в её пределах сохранившегося сингенетичного пирита и менее карбонизированных микровключений ОВ – керита, антраксолита, фрагментов углистого вещества. Дегдеканская зона складчатых дислокаций выделяется повышенным содержанием органического углерода (в среднем 1,8 % в глинистых сланцах, 0,7 % – в диамиктитах) и широким разбросом частных количественных определений $C_{орг.}$ (от 0,4 до 4,2 %).

Геологическая структура зоны изоклиальной складчатости указывает на чередование в ней областей выжимания и нагнетания разного порядка, что стало причиной перераспределения первичных концентраций рассеянной органики. В местах нагнетания (антиклинали) содержание углерода может увеличиться до 3–4 %, а выжимания (синклинали) – уменьшиться до 0,4–0,6 %. Распределение ОВ в деформированных сланцах строго подчинено рисунку складчатости (рис. 4). Наиболее интенсивно перераспределение и нагнетание углеродистого вещества, имеющего более низкую вязкость по сравнению с вмещающей средой, проявились на участке пересечения оси Тенькинской антиклинали Дегдеканской зоной складчатых дислокаций, где, кроме высокотемпературных микровключений ОВ, наблюдаются миграционные формы битумов, образующие в породе тонкие гнездовидные включения размером 0,00n–0,0n мм. Для осадочных пород этой части структуры характерно наиболее высокое содержание углерода (1,8–2,7 %).

Золото-битумная минерализация. В МГУ на кафедре горючих полезных ископаемых проведён пиролиз и битуминологический анализ битумоидов, выделенных из сланцев с содержанием $C_{орг.}$ 2,4 % и Au 0,6 г/т. В породе установлены свободные жидкие углеводороды в количестве 0,011 % и остаточные – 0,027 %. Состав этих компонентов определялся на хромато-масс-спектрометре Thermo Focus II. Полученные данные характеризуют присутствие в углеродистых сланцах алкановых и циклических нафтеновых и ароматических углеводородов. По составу углеводородов установлено, что условия накопления углеродистых осадков отвечают восстановительной геохимической обстановке в отсутствие сероводородного заражения вод бассейна. Исходным материалом для керогена послужило гумусово-сапропелевое вещество. Низкотемпературные битумы представлены ОВ сапропелевого типа, имеют миграционную природу и мигрировали из толщи, достигшей условий главной фазы нефтеобразования в интервале температур 110–250 °С. Они представлены хлорофор-

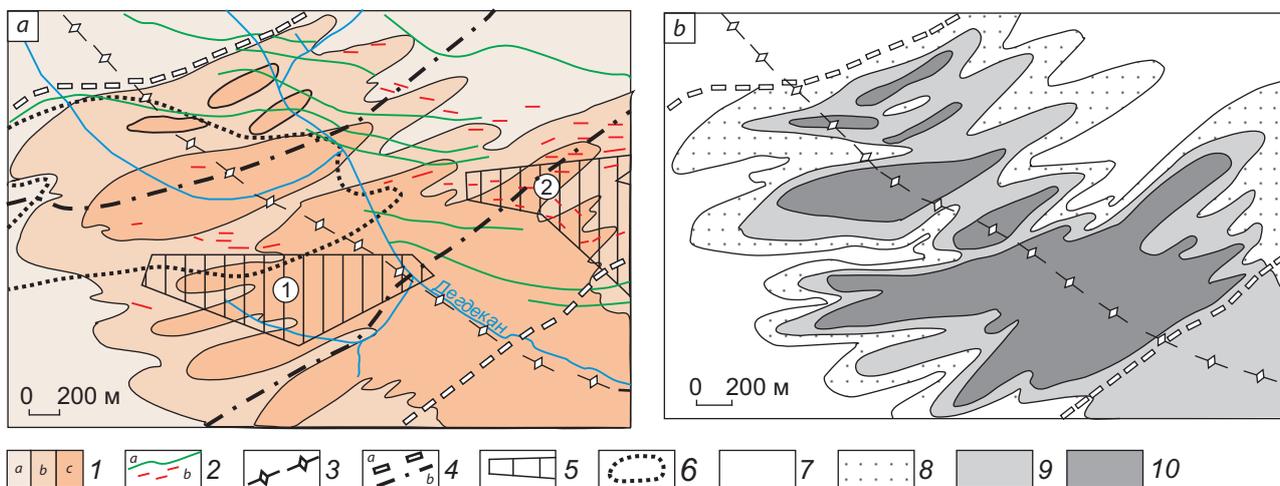


Рис. 4. Литолого-структурная схема участка пересечения Тенькинской антиклинали Дегдеканской зоной складчатых дислокаций (а) и схема распределения $C_{орг.}$ в сланцах пионерской свиты (б):

1 – ритмопачки пионерской свиты: а – верхняя, б – средняя, с – нижняя; 2 – дайки: а – поздне меловые, б – позднеюрские; 3 – ось Тенькинской антиклинали; 4 – границы Дегдеканской зоны складчатых дислокаций (а), тектонические нарушения (б); 5 – контуры золото-кварцевых месторождений: 1 – Верное, 2 – Дегдеканское; 6 – площадь распространения золото-битумной минерализации; содержания $C_{орг.}$ в %: 7 – ≤ 1 , 8 – 1–1,5, 9 – 1,5–2, 10 – > 2

Fig. 4. (a) Schematic lithological-structural map of the intersection of the Tenkinsky anticline with the Degdekan zone of folded dislocations and (b) scheme of distribution of $C_{org.}$ in shales of the Pioneer Formation:

1 – rhythmic units of the Pioneer Formation: a – upper, b – middle, c – lower; 2 – dikes: a – Late Cretaceous, b – Late Jurassic; 3 – axis of the Tenkinsky anticline; 4 – (a) boundaries of the Degdekan zone of folded dislocations and (b) faults; 5 – outlines of the gold-quartz ore deposits: 1 – Vernoye, 2 – Degdekanskoeye; 6 – area of distribution of gold-bitumen mineralization; $C_{org.}$ contents, in %: 7 – ≤ 1 , 8 – 1–1.5, 9 – 1.5–2, 10 – > 2

менными (ХБ) и спирто-бензольными (СББ) битумоидами, обогащёнными гетеросоединениями. Содержание ХБ битумоидов в породе – 0,016 %, СББ – 0,018 %. Результаты анализа выделенных битумоидов свидетельствуют о высоком содержании в них асфальтенов: в ХБ – 20,8 %, в СББ – 70,8 %. По количеству масел (37,5 %) в составе битумоидов миграционное ОВ можно отнести к асфальтам.

Учитывая, что сланцы пионерской свиты в разной степени окислены, то количество выделенных миграционных битумов является остаточным продуктом гипергенного изменения микронепфти. В результате интенсификации процессов химического выветривания происходило окисление в первую очередь битумоидов, сопровождавшееся выносом металла в составе гипергенных растворов (табл. 2). Исходя из анализа содержаний $C_{орг.}$ и Au в

разных гипергенных зонах первичная битуминозность и золотоносность в невыветрелых породах могла быть выше. Окисление органических соединений выражается в замещении атомов водорода, находящихся в химической связи с углеродом, атомами кислорода, азота и серы, в том числе атомами двухвалентной серы – сульфидной [17]. Количество углерода изменяется незначительно или увеличивается, происходит образование кислород- и серосодержащих функциональных групп. В результате асфальт, окисляясь, преобразуется в оксикерит, характеризующийся повышенным содержанием кислородных соединений, рыхлой структурой и лучшим взаимодействием с водной средой.

В битуминизированных осадочных породах концентрация золота увеличивается. Установлено, что наиболее золотоносными являются



Табл. 2. Содержания золота и органического вещества в битуминизированных сланцах в зависимости от их положения в зонах гипергенеза

Table 2. Contents of gold and organic matter in the bituminized shales, depending on their position in hypergene zones

Степень окисления пород	Число проб	Среднее содержание		Коэффициент корреляции	
		Au, г/т	C _{орг.} , %	фактический	теоретический
Слабоокисленные	23	2,1	2,15	0,764	0,381
Среднеокисленные	42	0,32	2,07	0,288	0,25
Сильноокисленные	35	0,12	2,02	0,24	0,275

сланцы с содержаниями C_{орг.}, превышающими 1,8 %. В результате анализа распределения содержаний золота и органического углерода в сланцах пионерской свиты были определены контуры развития золото-битумной минерализации. Она представлена крупной линзовидной залежью размером 500–800 × 2500 м (см. рис. 4, а), характеризующейся содержаниями Au от 0,04 до 14,2 г/т (226 проб) и незначительными концентрациями S и As.

Главным концентратом золота, как показали детальные исследования на электронном микроскопе с лазерным микроанализатором, являются низкотемпературные битумы (асфальт), в которых содержания металла составили 244–629 г/т (ИГФМ Украинской национальной академии наук). Парагенетическая связь золота с ОВ подтверждается также высоким коэффициентом корреляции Au – C_{орг.}, равным 0,76 при K_{крит.} = 0,28. Результаты сканирования по профилю битумного выделения показали зонально-концентрическое распределение золота и серебра: максимальные концентрации золота фиксируются в центральной его части, к периферии снижаются и являются значимые содержания серебра.

Золото образует в битумоидах субмикроскопические выделения размером от 1–10 до 20–25 мкм и представлено двумя морфологическими типами: 1 – преобладают комковидные изометрично-округлые формы с гладкой слабоструктурированной поверхностью, пробность 800–890 ‰; 2 – реже встречается палочковидное золото со слабобугристой поверхностью с отдельными ответвлениями, пробность 730 ‰ (рис. 5). Некоторые относи-

тельно крупные знаки были изучены с применением сканирующего электронного микроскопа JSM 5300 с энергодисперсионным анализатором Link в лаборатории электронной микроскопии ИГЕМ РАН. В изученном золоте установлены примеси Ag, Al и C, в палочковидном – до 1,5 % Fe. Элементный состав и пробность золота рассчитаны по программе SEM-Qant аналитиком М. И. Лапиной.

Таким образом, при формировании Дегдеканской зоны складчатых дислокаций углеродистые сланцы испытали неравномерный дислокационный метаморфизм. Известно, что в условиях повышения температуры и давления сапропелевый материал генерирует гамму газообразных гомологов метана, низкокипящих жидких, а также более тяжёлых углеводородов. В совокупности этот комплекс углеводородных компонентов ОВ формирует основу микронепти, многие фракции которой, особенно асфальтеновые, хорошо растворяют золото. Процессы образования подвижных форм металлосодержащих битумов, их миграция и локализация в благоприятных структурах контролируются мощной зоной складчатых деформаций. Источник металла в данном случае – осадочные породы Дегдеканского рудного поля.

Приведённый фактический материал показывает тесную связь становления золото-битумного рудопроявления, выделенного в чёрных сланцах Центральной Колымы, со складчатыми дислокациями углеродистых толщ. Также известны пространственная связь многих золото-сульфидных месторождений с областями развития углеродистых формаций, подвергшихся интенсивной складчатости, и

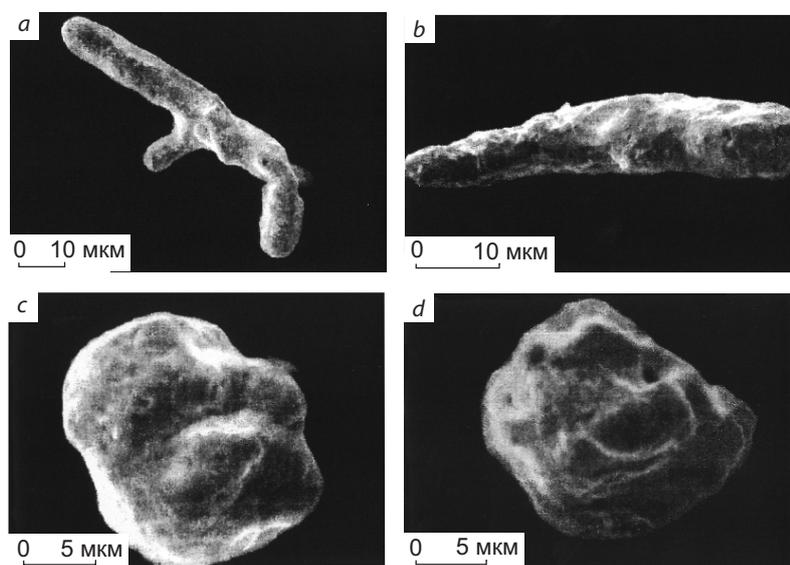


Рис. 5. Морфология выделений самородного золота в черносланцевых породах с золото-битумной минерализацией. Проба У-62 из расчистки № 1: *a, b* – палочковидные выделения; *c, d* – комковидные изометрично-округлые выделения

Fig. 5. Morphology of native gold segregations in black shale rocks with gold-bitumen mineralization. Sample U-62 from Cutting No. 1:

a, b – stick-shaped segregations; *c, d* – lump-shaped isometric-rounded segregations

присутствие в рудах битумов и углеводородных соединений в газовой и жидкой формах. Примером могут быть месторождения Байкало-Патомской провинции (Сухой Лог, Вернинское и др.), приуроченные к замковым частям антиклинальных складок и сосредоточенные в локальных зонах углеродистой толщи с аномальными концентрациями $C_{орг.}$.

Байкало-Патомская провинция – один из основных источников золота в Восточной Сибири. Она расположена в пределах одноимённой складчатой системы, которая, в свою очередь, является частью Саяно-Байкальской складчатой области, обрамляющей Сибирскую платформу, и приурочена к её северной части. Основная золотоносная структура Байкало-Патомской провинции – Бодайбинский синклиний, в пределах которого сосредоточены основные коренные месторождения золота. Большую часть площади Патомского нагорья (90 %) занимают флишеидные терригенные, терригенно-карбонатные и карбонатные формации позднего рифея и венда, сформированные в относительно глубоком Бодайбинском бассейне. Рудовмещающими породами для месторождений золота служат породы хомолхинской и аунакитской свит с повышенными исходными содержаниями металла, которые часто варьируют в пределах трёх-пятикрат-

ного и до десятикратного превышения кларковых значений. Содержания $C_{орг.}$ в породах рассматриваемой части разреза терригенной толщи также сильно изменяются: от десятых долей до 1–3,7 % в сланцах аунакитской свиты, среднее 1,23 % (194 пробы), до 5,7 % – в хомолхинской, среднее 1,36 % (83 пробы) (С. Д. Шер и др., 1984). Залегающие выше по разрезу отложения вачской свиты отличаются от рудовмещающих толщ повышенным содержанием $C_{орг.}$ – среднее 2,1 % (53 пробы), а также незначительной примесью известковистого материала (CO_2 до 2,5 %).

Важный этап в истории развития осадочных отложений Бодайбинского бассейна – покровно-складчатые деформации в венд-кембрийское время, в результате которых породы были смяты в субширотные линейные складки различной морфологии – от широких синклиналей до тесно сжатых антиклиналей [12, 23]. В этот период на месте Бодайбинского прогиба сформировался крупный одноимённый синклиний, разделённый субширотными зонами надвигов на синформы и антиформы. В Бодайбинском синклинии известные месторождения золото-сульфидной формации приурочены к зонам наиболее интенсивной складчатости, осложняющим крылья крупной синклиналиной структуры.



Вернинско-Невская зона смятия мощностью 3–4 км и протяжённостью в десятки километров контролирует распространение прожилково-вкрапленной золото-сульфидной минерализации Вернинского и Невского месторождений. Она представлена серией кулисообразно чередующихся антиклиналей и синклиналей. Самая главная из них – Вернинская антиклиналь, сильно сжатая и опрокинута на юг под углами 35–40°, осложнена более пологими антиклинальными складками, мелкой складчатостью и гофрировкой, кливажем течения и скола, а также субширотными разрывами, сопровождающимися серией оперяющих трещин. В центральной части антиклинали, сложенной осадочными породами нижней подсвиты аунакитской свиты вендского возраста, расположено Вернинское месторождение (рис. 6, 7). Подсвета мощностью 100–400 м представлена переслаивающимися филлитовидными сланцами, алевролитами, песчаниками, известковистыми породами и известняками. В слоистых пачках этой подсвиты, вблизи контакта с известняками, в нормальном и опрокинутах крыльях антиклинали, а также в её приосевой части выделено несколько рудных залежей, согласных с напластованием пород.

Влияние пластических деформаций на концентрацию золота и ОВ в породах аунакитской свиты можно продемонстрировать на примере опорного пересечения Вернинско-Невского рудного поля (БЛ +9) протяжённостью около 4 км (рис. 8, а). По этому разрезу из керн-скважин были отобраны пробы с интервалом 10–15 м, здесь же отбирался материал для изготовления полированных и прозрачных шлифов. На основании анализа и обобщения полученных аналитических данных и микроскопических исследований составлена литолого-петрографическая характеристика пород и изучены закономерности распределения золота и ОВ в пределах складчатой структуры.

Особенностями рудовмещающей толщи являются неравномерное распределение ОВ и широкое распространение в углеродистых тонкозернистых породах сингенетичного пирита

[4]. Содержание $C_{орг.}$ в осадочных породах аунакитской свиты варьирует от десятых долей до 3,7 % и зависит как от литофациальных условий формирования осадка, так и от степени вторичных преобразований. Органическое вещество, присутствующее в рудах и вмещающих породах, имеет сложный фракционно-групповой состав и представлено тонкорассеянным нерастворимым углеродистым веществом (керогеном) и незначительным количеством битумоидов (ХБ (0,004–0,005 %) и СББ (0,001–0,009 %)). По данным В. А. Виленкина, суммарное содержание битумоидов увеличивается по направлению к рудной зоне примерно в 1,5 раза, при этом относительное содержание ХБ снижается, а СББ – возрастает в 3,5–4,5 раза. В рассеянном органическом веществе из околорудной зоны установлена концентрация ХБ 0,7 % и СББ 0,2 %, в рудной зоне соответственно 0,42–0,57 % и 0,66–0,94 % [19]. Результаты анализа показали, что в битумоиде (СББ) присутствуют две формы золота: химически связанное (фильtrat) и «свободное», которое можно представить в виде восстановленных форм коллоидных высокодисперсных частиц или ультрадисперсных кластерных частиц. Все выделенные фракции битумоида содержат золото, но наибольшей золотоносностью обладают асфальтены и асфальтеновые кислоты, на долю которых приходится соответственно 6,05 и 12,03 %. Содержание золота в этих фракциях составляет 3,5 и 0,91 г/т.

Выделения ОВ, как рассеянные, так и сегрегационные, насыщены пылевидным глобулярным пиритом, количество которого зависит от содержания $C_{орг.}$ в породе. С участками распространения глобулярного пирита в углеродистых осадочных комплексах аунакитской свиты связаны аномальные содержания золота, составляющие десятые доли г/т. Такие участки наиболее характерны для антиклинальных замыканий складчатой структуры. Степень золотоносности глобулярного пирита, определённая путём расчёта по содержанию золота и сульфидной серы во вмещающих породах, в среднем составила 26 г/т (С. Д. Шер и др., 1984). Исследование отдельных глобулей на электронном сканирующем микроскопе

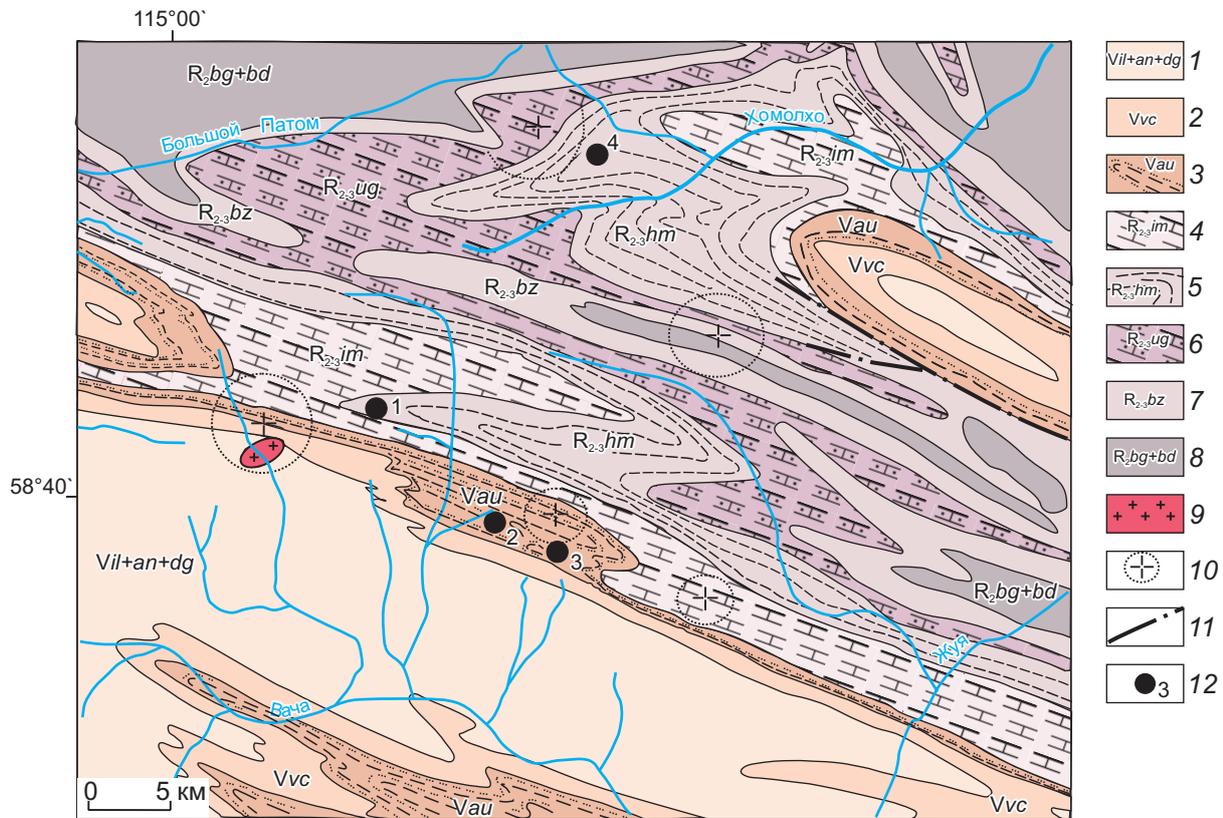


Рис. 6. Схематическая геологическая карта центральной части Патомского нагорья (составлена по материалам [8]):

вендские свиты: 1 – илигирская, догалдынская, анангрская (песчаники аркозовые, полимиктовые, реже граувакковые, прослои сланцев, гравелиты), 2 – вачская (сланцы с прослоями кварцевых песчаников), 3 – аунакитская (сланцы, алевролиты, прослои кварцевых песчаников, часто известковистых, известняки); средне-верхнерифейские свиты: 4 – имняхская (известняки, алевролиты, сланцы, песчаники), 5 – хомолхинская (сланцы, алевролиты с редкими прослоями песчаников), 6 – угаханская (известняки с редкими прослоями сланцев и песчаников), 7 – бужуихтинская (песчаники, сланцы); среднерифейские: 8 – бугорихтинская, бодайбокканская (песчаники полимиктовые с прослоями сланцев, в верхней части – известняки с прослоями сланцев); 9 – гранитоиды конкудер-мамаканского комплекса; 10 – контур невоскрытых гранитоидных массивов (по геофизическим данным); 11 – тектонические нарушения; 12 – золото-сульфидные месторождения (1 – Сухой Лог, 2 – Вернинское, 3 – Невское, 4 – Голец Высочайший)

Fig. 6. Schematic geological map of the central Patom Highlands (compiled based on materials from [8]):

Vendian formations: 1 – Iligir, Dogaldyn, Anangra (arkosic, polymictic, less often greywacke sandstones; shale interlayers; gravelites), 2 – Vacha (shales with interlayers of quartz sandstones), 3 – Aunakit (shales; siltstones; interlayers of quartz sandstones, often calcareous; limestones); Middle-Upper Riphean formations: 4 – Imnyakhskaya (limestones, siltstones, shales, sandstones), 5 – Khomolkha (shales, siltstones with rare interlayers of sandstones), 6 – Ugakhanskaya (limestones with rare interlayers of shales and sandstones), 7 – Buzhuikhtinskaya (sandstones, slates); Middle Riphean: 8 – Bugorikhtinskaya, Bodaibokanskaya (polymictic sandstones with shale interlayers; in the upper section, limestones with shale interlayers); 9 – granitoids of the Konkuder-Mamakan suite; 10 – outlines of unexposed granitoid massifs (according to geophysical data); 11 – faults; 12 – gold-sulfide ore deposits (1 – Sukhoi Log, 2 – Verninskoye, 3 – Nevskoye, 4 – Golets Vysochaishy)

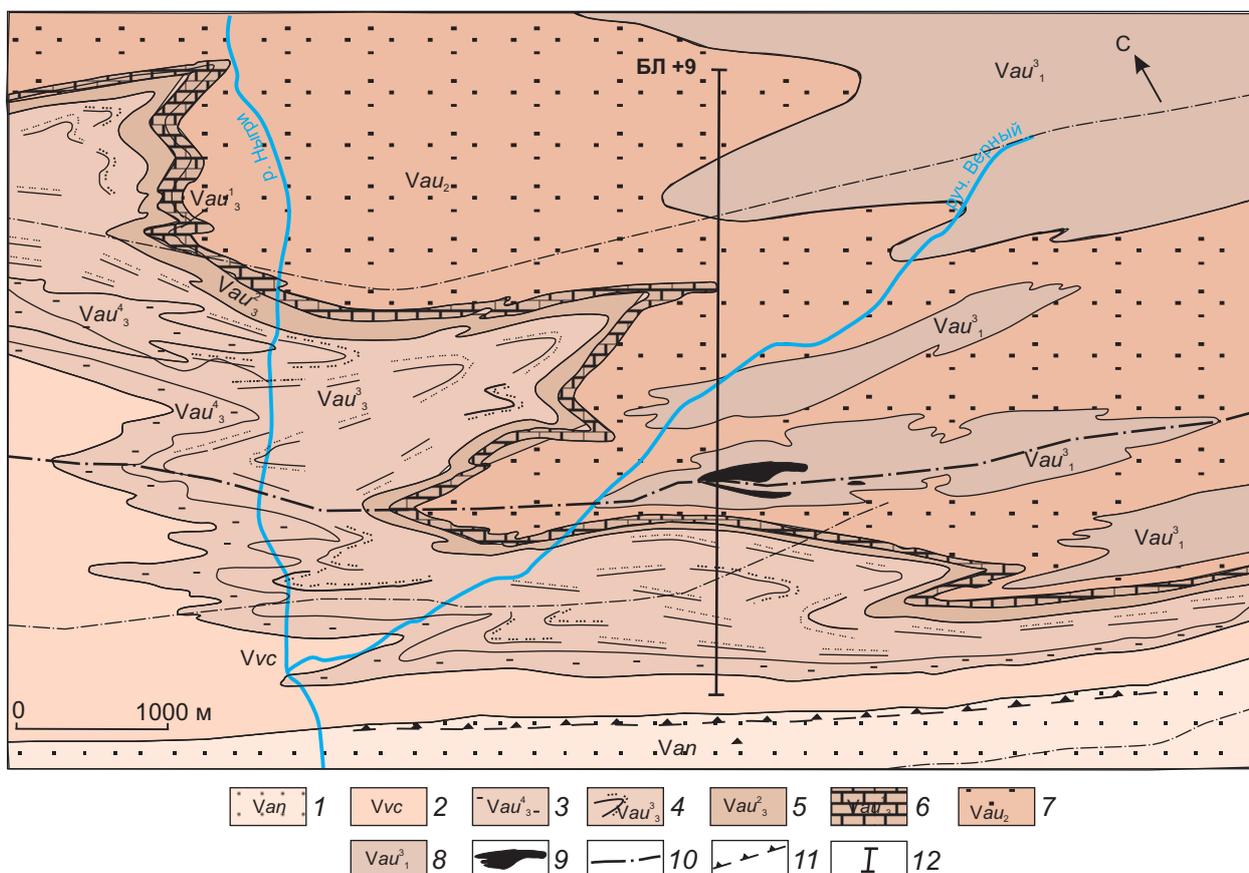


Рис. 7. Геологическая карта западного фланга Вернинско-Невского рудного поля (составлена по материалам (А. Д. Баранов и др., 1981)):

вендские свиты: 1 – илигирская, догалдынская, анангрская (песчаники полимиктовые и аркозовые, прослой сланцев), 2 – вачская (сланцы, прослой песчаников), аунакитская свита: пакки верхней подсвиты: 3 – четвёртая (слабоизвестковистые сланцы, алевролиты, тонкие прослой песчаников), 4 – третья (грубое переслаивание кварцевых песчаников, известковистых сланцев и алевролитов), 5 – вторая (известковистые сланцы с редкими прослоями песчаников), 6 – первая (известняки, известковистые сланцы, реже песчаники), 7 – средняя подсвита (сланцы, алевролиты, тонкие прослой известковистых песчаников), 8 – нижняя подсвита (переслаивание сланцев, алевролитов, песчаников, известняков); 9 – рудные залежи; 10 – тектонические нарушения; 11 – надвиг; 12 – линия разреза

Fig. 7. Geological map of the western flank of the Verninsko-Nevsky ore field (compiled based on materials from A. D. Baranov et al., 1981):

Vendian formations: 1 – Iligir, Dogaldy, Anangra (polymictic and arkosic sandstones, shale interlayers), 2 – Vacha (shales, sandstone interlayers); Aunakit formation: members of the upper subformation: 3 – fourth (weakly calcareous shales, siltstones, thin sandstone interlayers), 4 – third (coarse interlayering of quartz sandstones, calcareous shales, and siltstones), 5 – second (calcareous shales with rare sandstone interlayers), 6 – first (limestones, calcareous shales, less often sandstones); 7 – middle subformation (shales, siltstones, thin layers of calcareous sandstones), 8 – lower subformation (interlayering of shales, siltstones, sandstones, limestones); 9 – ore deposits; 10 – faults; 11 – thrust; 12 – section line

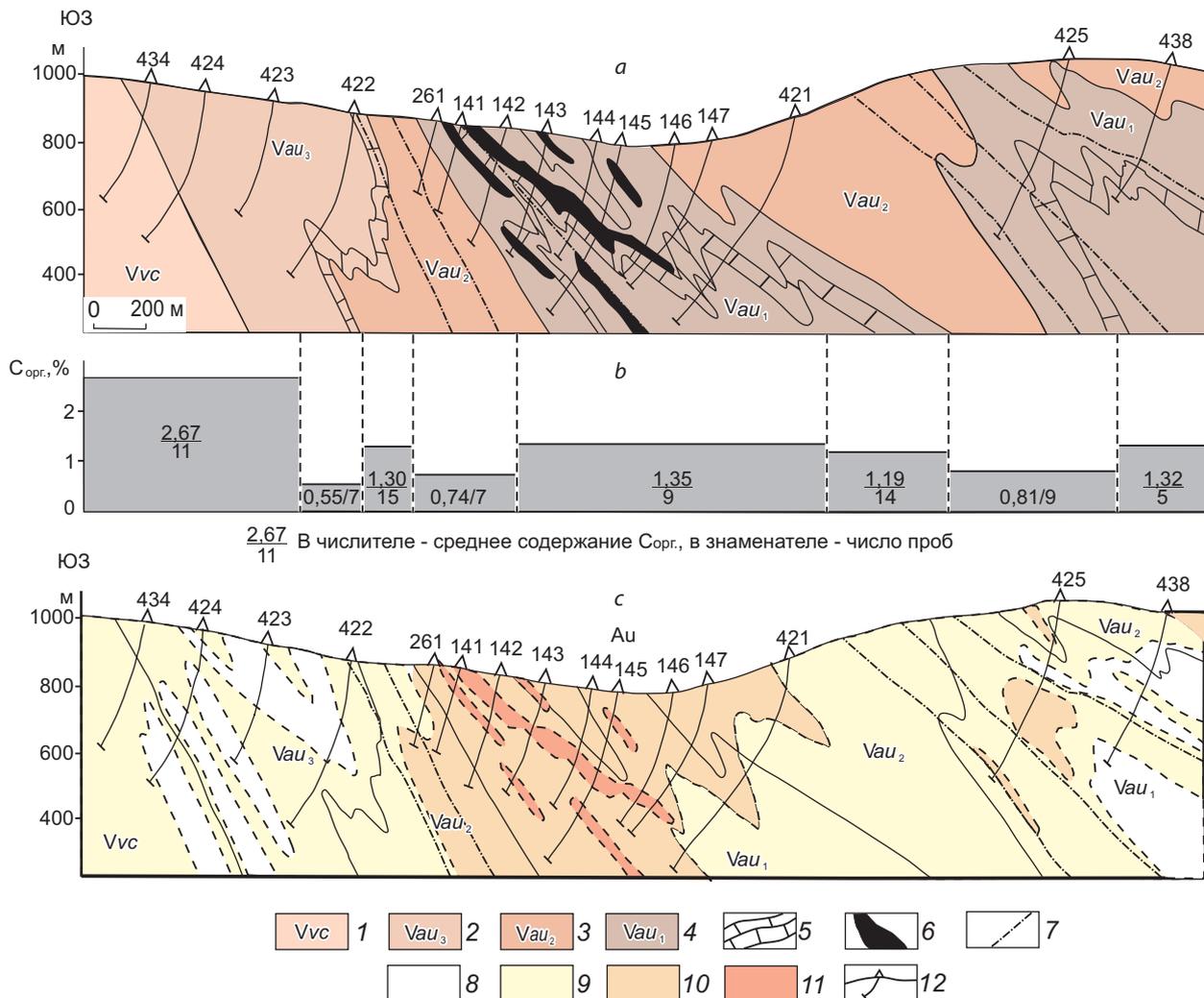


Рис. 8. Геологический разрез по линии БЛ +9 (а), распределение содержаний $C_{орг.}$ (b) и золота (c) в сланцах аунакитской свиты:

1 – вачская свита (сланцы, прослои песчаников); аунакитская свита: 2 – верхняя подсвита (сланцы, алевролиты, кварцевые песчаники, известковистые сланцы и песчаники, известняки), 3 – средняя подсвита (сланцы и алевролиты с тонкими прослоями песчаников), 4 – нижняя подсвита (сланцы, алевролиты, песчаники, известняки), 5 – известняки с тонкими прослоями известковистых сланцев; 6 – рудные залежи; 7 – тектонические нарушения; содержание золота, г/т: 8 – 0,001–0,01, 9 – 0,01–0,1, 10 – 0,1–1, 11 – ≥ 1 ; 12 – буровые скважины и их номера

Fig. 8. Geological section along line БЛ +9 (a) and the distribution of (b) $C_{орг.}$ and (c) gold in shales of the Aunakit Formation:

1 – Vacha Formation (shales, sandstone interlayers); Aunakit formation: 2 – upper subformation (shales, siltstones, quartz sandstones, calcareous shales and sandstones, limestones), 3 – middle subformation (shales and siltstones with thin sandstone interlayers), 4 – lower subformation (shales, siltstones, sandstones, limestones), 5 – limestones with thin interlayers of calcareous shales; 6 – ore deposits; 7 – faults; gold content in g/t: 8 – 0.001–0.01, 9 – 0.01–0.1, 10 – 0.1–1, 11 – ≥ 1 ; 12 – boreholes and their numbers



Табл. 3. Элементный состав сингенетических сульфидов аунакитской свиты и содержание в них основных элементов-примесей

Table 3. Elemental composition of syngenetic sulfides in the Aunakit Formation and their contents of major trace elements

Сульфиды		Число анализов	Fe	S	Au	Ag	As	Ni	Co
			%		г/т		%		
Пирит глобулярный	ядро	3	47,4	53	698	< 1	0,0753	0,044	< 0,0001
	оболочка	3	45,6	53,5	< 1	221	0,2534	0,077	< 0,0001
Пирит линзовидный		4	46,8	52,9	< 1	< 1	0,0207	0,06	< 0,0001
Пирротин		5	59,5	38,4	< 1	< 1	< 0,0001	0,26	0,01

подтвердили его высокую золотоносность² (табл. 3), сопоставимую с содержанием золота в пиритах современных субмаринных колчеданных построек [1]. Послойный характер распределения в рудовмещающей толще и тесная ассоциация с ОВ свидетельствуют о формировании тонкозернистого пирита из гидротермальных растворов на стадии седиментации. Образование фрамбоидального пирита в морских осадках связывается с деятельностью сульфатредуцирующих бактерий. Рядом исследований доказана способность микроорганизмов концентрировать металлы, особенно велика роль бактериальных сообществ в накоплении золота. В позднерифейском бассейне БПР установлено развитие разных типов водорослей и бактерий. Судя по морфологии и размерам микрофоссилий, основной объём ОВ поставлялся бентосом бактериальных сообществ [16].

Комплексное изучение керна скважин, проведённое на опорном пересечении Вернинского рудного поля (БЛ +9) длиной около 4 км, позволило установить ряд закономерностей, связанных со складчатыми структурами. Рудовмещающая толща при формировании Вернинско-Невской зоны смятия испытала неравномерные метаморфические преобразования. Структурные изменения наиболее отчётливо прослеживаются в прослоях и горизонтах пес-

чаников аунакитской свиты. Псаммитовые мелко-среднезернистые кварцевые песчаники с кварц-карбонатным контактовым, поровым, иногда базальным типом цементации распространены в осевой части антиклинали; на крыльях складки они сменяются кварцито-песчаниками, а за пределами складчатой структуры – кварцитами. В этом же направлении усиливается степень мраморизации известняков от мелкозернистых, местами с реликтами оолитовой структуры, до мраморов.

Сульфидная минерализация представлена почти исключительно пиритом, образующим по форме разнообразные выделения. Сингенетические сульфиды, широко распространённые в углеродистых сланцах, образуют последовательный морфогенетический ряд от оси антиклинали к флангам зоны: рассеянная и послойная пылевидная вкрапленность глобулярного пирита в осевой зоне → линзовидные выделения («глазковые») и прослой тонкокристаллического пирита на крыльях складки → мелколинзовидные выделения и прослой пирротина на флангах складчатой структуры и за её пределами. Перекристаллизация сингенетического пирита сопровождалась значительным снижением концентрации золота. Глобулярный пирит образует рассеянную вкрапленность, сгустки и послойные скопления, присутствует в рудных зонах и часто встречается в образовавшихся позже метакристаллах пирита и арсенипирита. Перекристаллизация сингенетического пирита сопровождалась снижением концентрации золота, серебра, серы

² Исследования выполнялись на электронном микроанализаторе СХА-773 в лаборатории импортного оборудования ИГФМ Украинской национальной АН (оператор А. С. Иванов).

и мышьяка в мелколинзовидных и послойных выделениях пирита и пирротина (см. табл. 3) и появлением рассеянной вкрапленности метакристаллов кубического пирита размером от n мм до 2–3 см.

Неравномерный динамометаморфизм углеродистой толщи, связанный с чередованием областей пластического выжимания и нагнетания разных размерных порядков, сопровождался изменением состава и содержания ОВ. В осевой, наименее метаморфизованной части антиклинали, углеродистая фракция представлена преимущественно керитом и антраксолитом, на крыльях складки – шунгитом [7]. Изотопные исследования ОВ вмещающих пород и руд подтверждают, что выделенный битумный ряд керит – антраксолит – шунгит наследует осадочную природу морской органики (С. Г. Кряжев и др., 2012). За пределами зоны смятия в породах, метаморфизованных в зеленосланцевой фации, примесь углеродистого материала, по данным рентгеноструктурных и термографических исследований, преобразована до графита слабоупорядоченной формы.

В замковой части Вернинской антиклинали, представляющей мощную зону нагнетания, широко проявлены гофрировка, будинаж, кливаж течения, которые сопровождалась локальным перераспределением тонкорассеянного ОВ и породообразующих минералов с образованием сегрегаций углеродистого и кварцуглеродистого состава в виде гнёзд, линз и прожилков. С этими деформациями связана высокая дисперсия содержаний $C_{орг.}$ от 0,4 до 3,7 % в сланцах, от 0,2 до 1,1 % в песчаниках. С глубиной в осадочных породах антиклинали отмечаются тенденция снижения эффективной пористости пород, содержания $C_{орг.}$ и появление шунгита в составе керогена, что свидетельствует о нарастании напряжения в этой части складчатой структуры сверху вниз. В результате складчатых деформаций в замковой части антиклинали реализуются условия растяжения, а ниже – условия сжатия. Судя по интенсивности преобразования осадочных пород, наибольшее сжатие испытали синклинали и крылья складок, которые вы-

деляются равномерным распределением ОВ и уменьшением концентрации $C_{орг.}$ в 1,5–2 раза (см. рис. 8, *b*). Слабый дислокационный метаморфизм также проявлен на юго-западе представленного разреза в породах вачской свиты и верхней части аунакитской, по-видимому, оказавшихся в зоне влияния надвига. В пределах зоны складчатых дислокаций прослеживается вполне очевидная связь уровня золотоносности толщи с областями разуплотнения пород. Наиболее высокие содержания металла приурочены к замковым частям антиклиналей и пространственно совпадают с аномальными концентрациями органического углерода (см. рис. 8, *c*).

Как показали исследования, проведённые в пределах изученного разреза протяжённостью около 4 км (см. рис. 8), рудовмещающая углеродистая толща в дорудный этап покровно-складчатых деформаций испытала неравномерные термодинамические преобразования. Надёжным индикатором этого процесса, наряду со структурно-вещественными признаками, является ОВ. Присутствие керита, антраксолита и шунгита в осадочных породах складчатой структуры свидетельствует, что степень их преобразования не превышала метагенеза [21].

Деструкция ОВ в зонах повышенных стрессовых напряжений (зоны выжимания) сопровождалась генерацией газообразных и жидких углеводородов, гетерогенных комплексов, H_2O , H_2S и выносом золота в составе этих углеводородных флюидов в области нагнетания. Дальнейшее увеличение стрессовых напряжений на более глубоких горизонтах, на флангах складчатой структуры, а также за её пределами завершилось выносом из рудовмещающей толщи, учитывая масштабы распространения пирротина, значительного количества серы. Высокая сорбционная способность серы позволяет предположить её большую роль в формировании золото-сульфидных месторождений.

Со следующим этапом палеозойской тектоно-магматической активизации связаны гидротермально-метасоматические преобразования осадочных толщ, которые начались с появления метакристаллов магнезиально-же-



лезистых карбонатов и последующего образования прожилково-вкрапленных золото-сульфидных руд. Разгрузка рудоносных растворов и формирование стратиформных залежей происходили в замковой части складки, сложенной породами с повышенной эффективной пористостью. Рудные тела имеют линзовидную форму и представлены гнездовидными скоплениями крупнокристаллических золотосодержащих пирита и арсенопирита, реже арсенопиритовыми прожилками. Ориентировка кристаллов, секущих слоистость и сланцеватость вмещающих пород, а также недеформированные порфиробласты карбонатов с равномерным распределением тонкодисперсного керогена свидетельствуют о формировании их в условиях отсутствия тектонических напряжений. Сульфидные агрегаты пересекают продукты дислокационного метаморфизма – углеродсодержащие минеральные комплексы, а присутствие органического вещества в рудовмещающих породах не оказывает существенного влияния на распределение сульфидов. Наиболее благоприятными для развития прожилково-вкрапленной золото-сульфидной минерализации во флишоидной карбонатно-терригенной толще являются наименее углеродистые и наиболее проницаемые прослойки и горизонты псаммитовых песчаников. Для вкрапленных метакристаллов сульфидов характерны видимые выделения золота (сотые доли миллиметра). Кроме свободного золота в рудах присутствует трудноизвлекаемое, связанное с гидротермально-осадочным пиритом, и незначительное количество – с реликтами битумоидов.

Сухоложская антиклиналь – наиболее яркий структурный элемент Бодайбинского золоторудного района. Она расположена севернее Вернинско-Невской зоны смятия и сложена терригенными и терригенно-карбонатными породами хомолхинской и имняхской свит средне-познерифейского возраста (рис. 9). Месторождение Сухой Лог локализовано в породах верхней подсвиты хомолхинской свиты, в которой преобладают углеродистые филлитовидные сланцы и алевролиты. Важнейшим рудо-локализирующим элементом структуры рудного

поля является зона смятия северо-западного простирания, пересекающая ось антиклинали под углом 8–10°. Она, хотя не имеет резких геологических границ, достаточно отчетливо маркируется по совокупности структурных элементов. Максимальная мощность зоны смятия отмечается в центральной части рудного поля и составляет 200–250 м. Зона имеет сложное строение как по падению, так и по простиранию и характеризуется широким развитием пластических деформаций, сочетающихся с хрупкими разрывами. В ней широко проявлены мелкая складчатость сложной формы и гофрировка, осложняющие плоскости кливажных трещин, и многочисленные зоны повышенного рассланцевания, ориентированные под острым углом к трещинам приосевого кливажа. Структурным элементам выделенной зоны смятия подчинены распределение и морфология проявлений кварцевой и пиритовой минерализации. По характеру деформаций и особенностям внутреннего строения зона была отнесена к разрывным структурам сдвига-надвиговой природы с незначительными амплитудами перемещений и широкими проявлениями пластических деформаций [13]. Решение вопроса о возрастных соотношениях антиклинали и зоны смятия имеет большое значение для понимания генезиса золото-сульфидной минерализации месторождения.

После завершения складчатости рудовмещающие породы месторождения испытали гидротермально-метасоматические преобразования, более интенсивные по сравнению с Вернинским месторождением. Характерными для метасоматитов месторождения являются порфиробласты магнезиально-железистых карбонатов линзовидной, ромбоидальной и изометрической формы размером до 2,5 × 3,5 мм и кварца размером 0,7–1 мм с тонкой рассеянной вкрапленностью сульфидов. Во вмещающих породах широко проявлены мелколинзовидные (глазковые) выделения и метакристаллы пирита разного размера. Арсенопирит в виде тонкоигольчатых выделений известен только на глубоких горизонтах западного фланга месторождения. Рудная зона представлена зо-

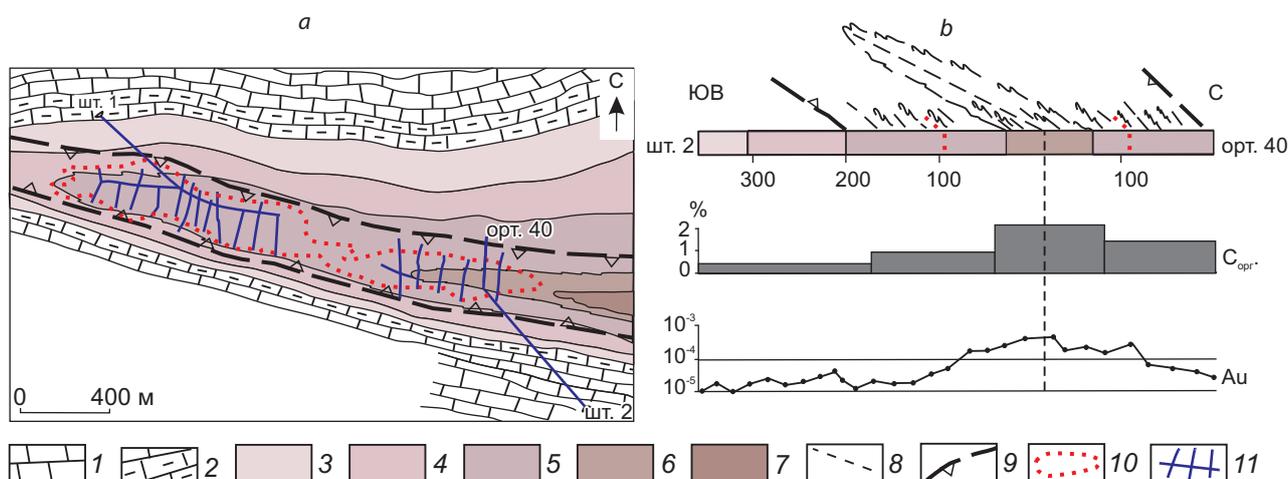


Рис. 9. Геолого-структурный план месторождения Сухой Лог (а), штольневый горизонт, и распределение $C_{орг.}$ и Au в филлитовидных сланцах сечения шт. 2 – орт. 40 (b) (составлен по материалам (С. Д. Шер и др., 1977)):

средне-верхнерифейские свиты: имняхская свита: 1 – известняки, 2 – известково-сланцевые сланцы, известковистые песчаники и алевролиты; хомолхинская свита, верхняя подсвита: 3 – пятая пачка (алевритистые и филлитовидные сланцы, прослой мелкозернистых песчаников), 4 – четвертая пачка (тонкое переслаивание филлитов и алевролитов), 5 – третья пачка (алевритистые сланцы, прослой известковистых песчаников и алевролитов), 6 – вторая пачка (филлиты с тонкими прослоями песчаников и алевролитов), 7 – первая пачка (филлиты, известковистые сланцы с прослоями песчаников и алевролитов); 8 – ось антиклинали; 9 – границы рудовмещающей зоны складчато-разрывных деформаций; 10 – контуры рудной залежи; 11 – подземные выработки

Fig. 9. Geological and structural plan of the Sukhoi Log deposit, adit horizon (a); (b) distribution of $C_{org.}$ and Au in phyllitic shales of section Drift 2 – Ort 40 (based on materials from S. D. Sher et al., 1977):

Middle-Upper Riphean formations: Imnyakh Formation: 1 – limestones, 2 – calcareous-micaceous shales, calcareous sandstones and siltstones; Khomolkha Formation, upper subformation: 3 – fifth member (silty and phyllitic shales, interlayers of fine-grained sandstones), 4 – fourth member (thin interbedded phyllites and siltstones), 5 – third member (silty shales, interlayers of calcareous sandstones and siltstones), 6 – second member (phyllites with thin interlayers of sandstones and siltstones), 7 – first member (phyllites, calcareous shales with interlayers of sandstones and siltstones); 8 – axis of the anticline, 9 – boundaries of the ore-hosting zone of fold-fault deformations; 10 – contours of the ore deposit; 11 – underground workings

лотосодержащей кварц-пиритовой и кварц-карбонатно-пиритовой минерализацией разной интенсивности. Основной тип минерализации – линзовидно-прожилковый и прожилково-вкрапленный, обусловленный сочетанием структур разрывной тектоники и пластического течения. Прямой связи между масштабом рудной минерализации и содержанием ОВ в породах не наблюдается.

В групповом составе рассеянного ОВ преобладает нерастворимая фракция, битумоиды составляют незначительную его часть. По содержанию углерода и водорода кероген относится к высшему антраксолиту (шунгит). Это

показывает, что ОВ руд Сухоложского месторождения более метаморфизовано по сравнению с Вернинским месторождением, но менее, чем ОВ регионально метаморфизованных пород [19]. Растворимая составляющая ОВ представлена ХБ и СББ битумоидами в количестве 0,002 % и 0,009 % [15]. Значительную долю в битумоидах составляют фракции смол и асфальтенов. Наиболее высокие концентрации золота связаны с асфальтенами и асфальтеновыми кислотами, которых в битумоидах содержится 2–35 % (табл. 4). Анализ золота в асфальтенах выявил, что часть его химически связана со структурами асфальтенов, а часть



представляет тонкодисперсные частицы размером 1–10 мкм.

Влияние складчатых деформаций на распределение ОБ и золота в породах хомолхинской свиты изучено в разрезе шт. 2 – орт. 40 протяжённостью 570 м (см. рис. 9, б), пересекающим подвёрнутое крыло и центральную часть Сухоложской антиклинали. В этом интервале по северной стенке подземных выработок через 10 м были отобраны пробы на содержание $C_{орг.}$ и золота. Исходными породами этого фрагмента складки являются алевролиты и филлитовидные сланцы хомолхинской свиты, для которых характерны многочисленные порфиробласты магнезиально-железистых карбонатов, кварца и пирита. В пределах изученного разреза отчётливо прослеживаются все стадии перекристаллизации метасоматических образований и синхронного перераспределения ОБ. Установлено увеличение содержания $C_{орг.}$ в направлении от крыльев к оси антиклинали: в филлитовидных сланцах от 0,6 до 1,8 %, в алевролитах – от 0,45 до 1,3 % (см. рис. 9, б). Особенно интенсивное перераспределение ОБ испытало в зоне смятия, которая выделяется широкими вариациями содержаний $C_{орг.}$: от десятых долей до 5,7 %. Как видно на рис. 9, б, повышенная концентрация золота пространственно совпадает с зоной аномального содержания ОБ.

За пределами зоны смятия, в породах подвёрнутого крыла антиклинали (400–420 м от устья штольни) и на контакте с зоной смятия (орт. 40) хорошо сохранились первичные структурно-текстурные особенности рудовмещающих пород: слоистость и сланцеватость, подчёркнутая равномерным распределением ОБ; изометрические и слабовытянутые формы порфиробластов карбоната с равномерным распределением ОБ и обломочного кварца. По мере приближения к рудолокализирующей структуре наблюдается деформация порфиробластов, сопровождавшаяся перераспределением породообразующих минералов. В результате появились линзовидные карбонатные выделения, вытянутые вдоль сланцеватости, с многочисленными точечными скоплениями ОБ. На контакте с зоной смятия карбонаты полностью

Табл. 4. Содержание золота во фракциях хлороформенных (числитель) и спирто-бензольных (знаменатель) битумоидов, г/т

Table 4. Gold content in fractions of chloroform (numerator) and alcohol-benzene (denominator) bitumen, g/t

№ пробы	УВ	БС	СБС	АК	АСФ
1	$\frac{не\ обн.}{0,07}$	$\frac{0,17}{не\ обн.}$	$\frac{0,4}{0,61}$	$\frac{0,16}{1,05}$	$\frac{6,71}{8,99}$
3	$\frac{0,05}{0,02}$	$\frac{0,15}{0,3}$	$\frac{0,08}{0,55}$	$\frac{0,34}{1}$	$\frac{3}{6,78}$
5	$\frac{0,02}{не\ обн.}$	$\frac{0,23}{0,51}$	$\frac{0,6}{0,43}$	$\frac{5,38}{2,15}$	$\frac{4,78}{9,11}$

Примечание. УВ – углеводороды, БС – бензольные смолы, СБС – спирто-бензольные смолы, АК – асфальтеновые кислоты, АСФ – асфальтены.

очищаются от углеродистого вещества и тонкообломочного кварца, которые образуют сегрегации по периферии порфиробластов. Наиболее интенсивно деформированы и перекристаллизованы метасоматические образования в зоне смятия. В отличие от Вернинского месторождения углеродсодержащие сегрегации в пределах Сухоложской зоны смятия имеют более сложный состав. Отмечаются многочисленные сегрегации углеродистого, углеродисто-кварцевого, углеродисто-кварц-карбонатного и углеродисто-мусковит-карбонат-кварцевого состава с реликтами пирита, которые образуют послойные линзовидные и прожилковидно-линзовидные выделения мощностью до 8–10 мм (рис. 10).

Рассмотренные выше месторождения Бодайбинского золоторудного района приурочены к зонам интенсивной складчатости и расланцевания в пределах мощного коллизионного пояса. Рудная минерализация, отчётливо контролируемая складчато-сдвиговыми деформациями, концентрируется в центральных частях антиклинальных структур. Сочетание деформационных и литологических факторов влияло на направление миграции флюидных потоков, а также на состав, распределение и степень метаморфизма ОБ в осадочных породах. Изотопный состав ОБ в алевропелитах

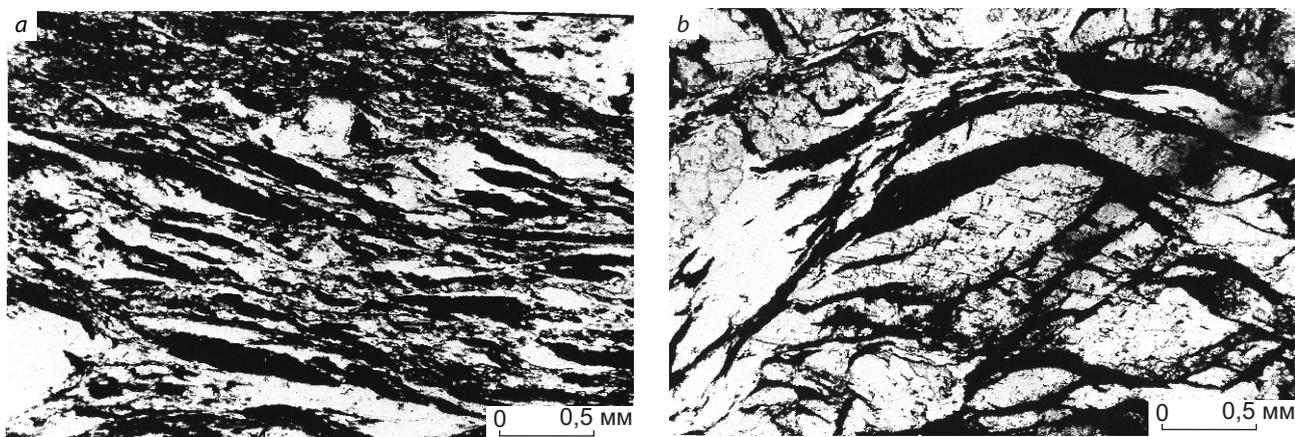


Рис. 10. Линзовидные сегрегации УВ (чёрное) в ассоциации с тонкозернистым кварцем в метаалевролитах (а); чешуйчатые, прожилковидные сегрегации УВ (чёрное), тонкозернистого кварца (белое) в перекристаллизованном карбонате (серое) (b)

Fig. 10. (a) Lenticular segregations of hydrocarbons (black) in association with fine-grained quartz in metasiltstones, (b) scaly vein-like segregations of hydrocarbons (black), fine-grained quartz (white) in recrystallized carbonate (gray)

хомолхинской свиты изменяется в узких пределах $\delta^{13}\text{C}$ от -16,6 до -18 ‰, среднее -17,1 ‰ [19]. Существенно более «лёгкая» органика содержится в породах аунакитской и вачской свит: $\delta^{13}\text{C}$ от -21,1 до -21,7 ‰.

Обсуждение результатов. Результаты проведённых исследований и анализ опубликованных материалов показывают, что битумоиды, особенно их кислые фракции – асфальтеновые, являются потенциальными концентраторами и транспортёрами металла на всех стадиях преобразования осадка. Наиболее активная миграция золота в составе растворимых углеводородных компонентов сопряжена с процессами складчатости и дислокационно-го метаморфизма углеродистых толщ.

Миграция золота совместно с продуктами деструкции ОВ продемонстрирована на примере золото-битумного проявления, приуроченного к участку пересечения приосевой части Тенькинской антиклинали Дегдеканской зоной складчатых дислокаций. Источником золота в битуминизированных сланцах являются первичные накопления металла в осадочных породах Дегдеканского рудного поля. Установленная генетическая связь золото-битумной минерализации с продуктами соскладчатого динамометаморфизма определила ряд

признаков, отражающих специфические условия её развития. Важнейшим литологическим фактором, влияющим на формирование оруденения, является наличие мощной углеродистой сланцевой толщи с невысокой степенью региональных преобразований осадка, легко поддающейся пластическим деформациям. Только в зонах катагенеза и метагенеза сапропелевое ОВ может продуцировать достаточное количество подвижных битумов, транспортирующих золото к месту разгрузки.

Значительные параметры площадного развития золотоносных битуминизированных сланцев и большая роль углеродсодержащих отложений в разрезах осадочного чехла многих регионов России увеличивает перспективы поисков нетрадиционных месторождений золота в черносланцевых толщах. А выявление в последние годы в некоторых зарубежных странах месторождений с близким минеральным составом руд подтверждает практическую значимость рассмотренного типа оруденения. Так, в Южном Китае в чехле платформы известны пласты битуминизированных углеродистых флишоидов с линзами асфальто-битумов [26]. В последних, попавших в локально инверсионные сжатые складки, отмечается тонкое золото, содержание которого



в рудах составляет от 0,5–0,7 до 5,9 г/т. Установлена положительная связь между содержанием металла и ОВ. В Неваде на месторождении карлинского типа Эль-Родео были описаны жилы пиробитума, содержащие до 100 г/т золота. Эти жилы представляют интерес, поскольку золото распределено однородно, а жилы срослись с нижележащими микропрожилками, что позволяет предположить, что они фиксируют миграцию жидких углеводородов и, в свою очередь, мобилизацию золота [25].

Выделенная золото-битумная минерализация отличается от золото-сульфидных руд Патомского нагорья более высоким содержанием в породе углеводородов, хлороформенных и спиртобензолных битумоидов, а в составе последних – асфальтенов и асфальтеновых кислот. Единственным концентратором золота в ней являются нефтеподобные битумы, образующие в сланцах тончайшую гнездовидную вкрапленность. В рудах Вернинского и Сухоложского месторождений золотосодержащие битумоиды имеют остаточный характер и являются реликтами синскладчатой золото-битумной минерализации. Учитывая высокую золотоносность глобулярного пирита и его деструкцию, синхронную с битуминизацией толщи, роль золото-битумной минерализации в формировании золото-сульфидных месторождений могла быть значительной.

Проведённые в разных регионах России исследования подтверждают полихронный характер концентрирования золота, обусловленный рядом литологических и геодинамических событий. На стадии седиментации значительная часть металла связана с сульфидами и органической частью породы. Погружение осадка на глубину сопровождалось выделением H_2O , дебитуминизацией ОВ и формированием металлоносных водно-углеводородных флюидов, в которых ионы золота образовывали с кислород-, азот- и серосодержащими компонентами ОВ комплексы.

Наиболее активная генерация, миграция и аккумуляция металлоносных битумоидов по времени сопряжена с процессами складчатости и раннего метаморфизма углеродистых отложений. Важным фактором, приводящим

в движение вещество, является термодинамическая анизотропия деформируемых осадочных пород, выраженная в чередовании областей выжимания и нагнетания в складчатых поясах. Эти области отличаются интенсивностью динамометаморфических преобразований. Наиболее благоприятные условия для притоков и разгрузки рудоносных растворов как синскладчатых с образованием золото-битумной минерализации, так и наложенных гидротермальных создаются в замках антиклиналей.

Поведение золота и ОВ в зонах складчатых деформаций рассмотренных регионов согласуется с моделью, которая базируется на принципах общекоровой складчатости земной коры в результате горизонтального сжатия [9]. Согласно этой схеме, в деформируемом слое возникают зоны сжатия и растяжения, разделённые нейтральной зоной и образующие рудогенерирующие и рудо локализирующие области. Например, при отрицательном изгибе коры ниже нейтральной поверхности реализуются условия растяжения, приводящие к разуплотнению пород, падению общего давления и мобилизации рудного вещества. В области растяжения снижается общее давление, увеличивается объём трещинно-порового пространства и накапливаются флюиды, лишённые возможности подниматься вверх. Их разгрузка возможна после снятия тектонических сил, вызванных изгибом коры. В случае положительного изгиба в верхней части слоя возникают условия растяжения, сменяющиеся ниже нейтральной зоны сжатием. Предлагаемая А. Ю. Кисиним модель горизонтального сжатия позволяет объяснить основные геологические процессы, возникающие на коллизии этапе формирования складчатых областей, закономерности миграции и отложения рудного вещества.

Выводы. В основе предложенной модели формирования золоторудных месторождений в черносланцевых толщах лежат способность седиментогенного золота растворяться во всех фракциях ОВ и высокая подвижность металлоносных нафтидов в условиях складчатых деформаций. Так как важная роль в мигра-

ции и накоплении золота в осадочных породах принадлежит ОВ, то необходимым условием для образования золото-органических флюидов является невысокая степень преобразования осадочных пород. Приведённый фактический материал показывает тесную связь становления золото-битумного рудопоявления Центральной Колымы с процессом складчатого метаморфизма углеродистых сланцев, что позволяет рассматривать данный объект как продукт дислокационного метаморфизма.

С процессами складчатости и метаморфизма осадочных толщ Бодайбинского бассейна сопряжена активная миграция золота в составе растворимых компонентов ОВ. Главный источник металла для золото-сульфидных месторождений – осадочно-гидротермальный пирит, подвергшийся в зонах пластического выжимания перекристаллизации с образо-

ванием мелколинзовидного пирита, на флангах и за пределами зоны смятия – пирротина. Перекристаллизация сингенетического пирита сопровождалась значительным снижением концентрации золота, серебра, мышьяка и серы. С деструкцией ОВ связано образование водно-углеводородных флюидов, способных экстрагировать золото. Основной особенностью рудообразования золото-сульфидных месторождений является взаимодействие глубинных гидротермальных и метаморфогенных золото-битумных флюидов.

Пространственно-временная сопряжённость процессов сжатия–растяжения углеродистых толщ и миграция золотосодержащих битумоидов позволяют сделать вывод, что черносланцевые комплексы выступают в качестве источника металла для золото-битумных проявлений и дополнительного при формировании золоторудных месторождений.

Список литературы

1. Бортников Н. С., Кабри Л., Викентьев Л. И., Тагиров Б. Р., Мак Мэйхон Г., Богданов Ю. А., Ставрова О. О. Невидимое золото в сульфидных субмаринных колчеданных построек // Геология рудных месторождений. – 2003. – Т. 45, № 3. – С. 228–240.
2. Ведерников И. Л. Распределение органического углерода в золотоносных толщах перми Аян-Юрхского антиклинория // Тезисы докладов Всероссийской научной конференции, посвящённой памяти академика К. В. Симакова. – Магадан : СВНЦ ДВО РАН, 2009. – С. 42–43.
3. Ганжа Г. Б., Ганжа Л. М. Золото-битумная минерализация в черносланцевой толще, Центральная Колыма // Руды и металлы. – 2004. – № 1. – С. 24–32.
4. Ганжа Г. Б., Развозжаева Э. А. Органическое вещество в осадочных породах Вернинского золоторудного месторождения, Патомское нагорье // Руды и металлы. – 2014. – № 3. – С. 65–73.
5. Горячев Н. А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. – Магадан : СВКНИИ ДВО РАН, 1998. – 210 с.
6. Ермолаев Н. П., Созинов Н. А., Котина Р. П., Пашкова Е. А. Механизмы концентрирования благородных металлов в терригенно-углеродистых отложениях. – М. : Научный мир, 1999. – 121 с.
7. Иншин П. В., Абаулина Л. И., Фридман И. Д., Иншина В. М. [и др.]. Изучение углеродистого вещества золоторудных месторождений прожилково-вкрапленного типа с целью совершенствования поисковых критериев. – Тула : ЦНИГРИ ; ОЭИ, 1982. – 173 с.
8. Казакевич Ю. П., Шер С. Д., Жаднова Т. П., Стороженко А. А., Кондратенко А. К., Николаева Л. А., Аминев В. Б. Ленский золотоносный район. Т. 1. Стратиграфия, тектоника, магматизм и проявления коренной золотоносности. – М. : Недра, 1971. – 163 с.
9. Кисин А. Ю., Коротеев В. А. Блоковая складчатость и рудогенез. – Екатеринбург : ИГГ УрО РАН, 2017. – 349 с.
10. Коробицын А. В., Волкодав И. Г., Ивенсен В. Ю. Золото в породах Верхоянского комплекса // Тезисы докладов IV Якутской региональной геологической конференции по золоту «Геология месторождений Якутии. Критерии и методы их поисков и оценки». – Якутск : ЯТГУ, 1979. – С. 89–92.
11. Кубракова И. В., Набиуллина С. Н., Пряжников Д. В., Киселева М. С. Органическое вещество как формирующий и транспортирующий агент в процессах переноса ЭПГ и золота // Геохимия. – 2022. – Т. 67, № 8. – С. 41–49.
12. Кузьмин М. И., Ярмолюк В. В., Спиридонов А. И., Немеров В. К., Иванов А. И., Митрофанов Г. Л.



- Геодинамические условия преобразования золоторудных месторождений Бодайбинского неопротерозойского прогиба // Доклады Российской академии наук. – 2006. – Т. 407, № 6. – С. 793–797.
13. Лобанов М. П., Радченко К. М., Чернецкая И. И., Охотников И. А., Номоконова Ю. А., Новикова Э. Ф. Рудоносные углистые пелитоиды линейных зон смятия Патомского нагорья // Геология и геофизика. – 1976. – № 9. – С. 34–44.
 14. Маннафов Н. Г. Металлогеническая карта Охотско-Колымского региона м-ба 1 : 500 000. Объяснительная записка. – Магадан : Магадангеология ГГП, 2000.
 15. Немеров В. К., Спиридонов А. М., Развозжаева Э. А., Матель Н. Л., Будяк А. Е., Станевич А. М. Основные факторы онтогенеза месторождений благородных металлов суходожского типа // Отечественная геология. – 2005. – № 3. – С. 17–24.
 16. Немеров В. К., Станевич А. М., Развозжаева Э. А., Будяк А. Е., Корнилова Т. А. Биогенно-седиментационные факторы рудообразования в неопротерозойских толщах Байкало-Патомского региона // Геология и геофизика. – 2010. – Т. 51, № 5. – С. 729–747.
 17. Пеньков В. Ф. Генетическая минералогия углеродистых веществ. – М. : Недра, 1996. – 221 с.
 18. Попова М. В., Шаламов И. В. Золото в нефтях и нефтематеринских породах (на примере Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции) // Природные битумы и тяжёлые нефти : материалы Международной научно-практической конференции к столетию со дня рождения В. А. Успенского. – СПб. : Недра, 2006. – С. 458–472.
 19. Русинов В. Л., Русинова О. В., Кряжев С. Г., Щегольков Ю. В., Альшеева Э. И., Борисовский С. Е. Околорудный метасоматизм терригенных углеродистых пород в Ленском золоторудном районе // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50, № 1. – С. 3–45.
 20. Татаринев А. В., Яловик Л. И. Динамометаморфизм – главный фактор формирования коллизионных месторождений золота // Золоторудные месторождения Востока России: труды III Всероссийского симпозиума «Золото Сибири и Дальнего Востока: геология, геохимия, технология, экономика, экология», Улан-Удэ, 21–25 сентября 2004. – Магадан : БНЦ СО РАН, 2006. – С. 32–49.
 21. Успенский В. А., Неручев С. Г., Радченко О. А. [и др.]. Формирование основных типов ископаемого органического вещества и их эволюция на последовательных стадиях литогенеза // Природа органического вещества современных и ископаемых осадков. – М. : Наука, 1973. – С. 68–78.
 22. Фридовский В. Ю., Соловьев Э. Ю., Полуфунтикова Е. И. Динамика формирования и структуры юго-восточного сектора Адыча-Нерской металлогенической зоны // Отечественная геология. – 2003. – № 3. – С. 16–21.
 23. Шашорин Б. Н., Толкачев А. Е., Афанасьева Р. Н. Покровно-складчатые деформации и золотоносность Ходоканского рудного поля // Отечественная геология. – 2004. – № 6. – С. 17–22.
 24. Beuge P., Rosler H. J. u. a. Untersuchungen zur Geohemie der Metamorphose mit Hilfe der zerstörungsreien Neutronenaktivierungsanalyse // Zeitschrift für angewandte Geologie. Bd. 24. – 1978. – Heft 7/8. – P. 334–339.
 25. Emsbo P., Koenig A. E. Transport of Au in petroleum: evidence from the northern Carlin trend, Nevada // Proceedings of the 9th Biennial SGA Meeting / eds. Andrew C. J. [et. al.]. – Dublin : Millpress, 2007. – P. 695–698.
 26. Li Jianming, Ying Hanlong, Ye Jie Chen Xurui. Sediment-hosted micro-disseminated gold deposits in China // The 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, August 6–17, 2000. Congress Program. – Rio de Janeiro : Geological Survey of Brazil.

References

1. Bortnikov N. S., Kabri L., Vikent'ev L. I., Tagirov B. R., Mak Meikhon G., Bogdanov Yu. A., Stavrova O. O. Nevidimoe zoloto v sul'fidakh submarinnykh kolchedannykh postroek [Invisible gold in sulfides from seafloor massive sulfide edifices], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 2003, V. 45, No 3, pp. 228–240. (In Russ.).
2. Vedernikov I. L. Raspredelenie organicheskogo ugleroda v zolotonosnykh tolshchakh permi Ayan-Yuryakhsogo antiklinoriya [Distribution of organic carbon in the Permian gold-bearing strata of the Ayan-Yuryakh anticlinorium], *Tezisy dokladov Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii, posvyashchennoi pamyati akademika K. V. Simakova* [Abstracts of the All-Russian scientific conference dedicated to the memory of Academician K. V. Simakov], Magadan, SVNTs DVO RAN Publ., 2009, pp. 42–43.
3. Ganzha G. B., Ganzha L. M. Zoloto-bitumnaya mineralizatsiya v chernoslantsevoi tolshche, Tsentral'naya Kolyma [Gold-bitumen mineralization in the black shale strata, Central Kolyma], *Rudy i metallurgiya* [Ores and Metals], 2004, No 1, pp. 24–32. (In Russ.).

4. Ganzha G. B., Razvozzhaeva E. A. Organicheskoe veshchestvo v osadochnykh porodakh Verninskogo zolotorudnogo mestorozhdeniya, Patomskoe nagor'e [Organic substance in sedimentary rocks of Verninskoye gold deposit, Patom uplands], *Rudy i metally* [Ores and Metals], 2014, No 3, pp. 65–73. (In Russ.).
5. Goryachev N. A. Geologiya mezozoiskikh zolotokvartsevykh zhil'nykh poyasov Severo-Vostoka Azii [Geology of the Mesozoic gold-quartz vein belts of Northeast Asia], Magadan, SVKNII DVO RAN Publ., 1998, 210 p.
6. Ermolaev N. P., Sozinov N. A., Kotina R. P., Pashkova E. A. Mekhanizmy kontsentrirvaniya blagorodnykh metallov v terrigenno-uglerodistykh otlozheniyakh [Mechanisms of concentration of precious metals in terrigenous-carbonaceous deposits], Moscow, Nauchnyi mir Publ., 1999, 121 p.
7. Inshin P. V., Abaulina L. I., Fridman I. D., Inshina V. M. [et al.]. Izuchenie uglerodistogo veshchestva zolotorudnykh mestorozhdenii prozhilkovokraplennogo tipa s tsel'yu sovershenstvovaniya poiskovykh kriteriev [Study of carbonaceous matter of streaked-interspersed gold deposits in order to improve search criteria], Tula, TsNIGRI and OEI Publ., 1982, 173 p.
8. Kazakevich Yu. P., Sher S. D., Zhadnova T. P., Storozhenko A. A., Kondratenko A. K., Nikolaeva L. A., Aminev V. B. Lenskii zolotonosnyi raion. T. 1. Stratigrafiya, tektonika, magmatizm i proyavleniya korennoi zolotonosnosti [Lensky gold-bearing area. Vol. 1. Stratigraphy, tectonics, magmatism and manifestations of indigenous gold content], Moscow, Nedra Publ., 1971, 163 p.
9. Kisin A. Yu., Koroteev V. A. Blokovaya skladchatost' i rudogenez [Block folding and oreogenesis], Ekaterinburg, IGG UrO RAN Publ., 2017, 349 p.
10. Korobitsyn A. V., Volkodav I. G., Ivensen V. Yu. Zoloto v porodakh Verkhoyanskogo kompleksa [Gold in rocks of the Verkhoyansk complex], Tezisy dokladov IV Yakutskoi regional'noi geologicheskoi konferentsii po zolotu "Geologiya mestorozhdenii Yakutii. Kriterii i metody ikh poiskov i otsenki" [Abstracts of the IV Yakut regional geological conference on gold "Geology of deposits of Yakutia. Criteria and methods of their search and evaluation"], Yakutsk, YaTGU Publ., 1979, pp. 89–92.
11. Kubrakova I. V., Nabiullina S. N., Pryazhnikov D. V., Kiseleva M. S. Organicheskoe veshchestvo kak formiruyushchii i transportiruyushchii agent v protsessakh perenosa EPG i zolota [Organic matter as a forming and transporting agent in transfer processes PGE and gold], *Geokhimiya* [Geochemistry International], 2022, V. 67, No 8, pp. 41–49. (In Russ.).
12. Kuz'min M. I., Yarmolyuk V. V., Spiridonov A. I., Nemerov V. K., Ivanov A. I., Mitrofanov G. L. Geodinamicheskie usloviya preobrazovaniya zolotorudnykh mestorozhdenii Bodaibinskogo neoproterozoiskogo progiba [Geodynamic conditions for the transformation of gold deposits of the Bodaibinsky Neoproterozoic trough], *Doklady Rossiiskoi akademii nauk* [Reports of the Russian Academy of Sciences], 2006, V. 407, No 6, pp. 793–797. (In Russ.).
13. Lobanov M. P., Radchenko K. M., Chernetskaya I. I., Okhotnikov I. A., Nomokonova Yu. A., Novikova E. F. Rudonosnye uglitnye pelitoidy lineinykh zon smyatiya Patomskogo nagor'ya [Ore-bearing carbonaceous pelitoids of linear crushing zones of the Patom upland], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 1976, No 9, pp. 34–44. (In Russ.).
14. Mannafov N. G. Metallogenicheskaya karta Okhotsko-Kolym'skogo regiona m-ba 1 : 500 000. Ob'yasnitel'naya zapiska [Metallogenic map of the Okhotsk-Kolyma region m-ba 1:500,000. An explanatory note], Magadan, Magadangeologiya GGP Publ., 2000.
15. Nemerov V. K., Spiridonov A. M., Razvozzhaeva E. A., Matel' N. L., Budyak A. E., Stanevich A. M. Osnovnye faktory ontogeneza mestorozhdenii blagorodnykh metallov sukholozhskogo tipa [The main factors of ontogenesis of deposits of precious metals of the Sukholozhsky type], *Otechestvennaya geologiya* [National Geology], 2005, No 3, pp. 17–24. (In Russ.).
16. Nemerov V. K., Stanevich A. M., Razvozzhaeva E. A., Budyak A. E., Kornilova T. A. Biogenno-sedimentatsionnye faktory rudoobrazovaniya v neoproterozoiskikh tolshchakh Baikalo-Patomskogo regiona [Biogenic sedimentation factors of mineralization in the Neoproterozoic strata of the Baikal-Patom region], *Geologiya i geofizika* [Russian Geology and Geophysics], 2010, V. 51, No 5, pp. 729–747. (In Russ.).
17. Pen'kov V. F. Geneticheskaya mineralogiya uglerodistykh veshchestv [Genetic mineralogy of carbonaceous substances], Moscow, Nedra Publ., 1996, 221 p.
18. Popova M. V., Shalamov I. V. Zoloto v neftnykh i neftematerinskikh porodakh (na primere Lenotungusskoi neftegazonosnoi provintsii) [Gold in oils and oil-bearing rocks (on the example of the Lena-Tunguska oil and gas province)], *Prirodnye bitumy i tyazhelye nefi: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii k stoletiyu so dnya rozhdeniya V. A. Uspenskogo* [Natural bitumen and heavy oils: materials of the International scientific and practical Conference on the centenary of the birth of V. A. Uspensky], St. Petersburg, Nedra Publ., 2006, pp. 458–472.



19. Rusinov V. L., Rusinova O. V., Kryazhev S. G., Shchegol'kov Yu. V., Alysheva E. I., Borisovskii S. E. Okolorudnyi metasomatizm terrigennykh uglerodistykh porod v Lenskom zolotorudnom raione [Near-ore metasomatism of terrigenous carbonaceous rocks in the Lena gold ore region], *Geologiya rudnykh mestorozhdenii* [Geology of Ore Deposits], 2008, V. 50, No 1, pp. 3–45. (In Russ.).
20. Tatarinov A. V., Yalovik L. I. Dinamometamorfizm – glavnyi faktor formirovaniya kollizionnykh mestorozhdenii zolota [Dynamometamorphism – the main factor in the formation of collisional gold deposits], *Zolotorudnye mestorozhdeniya Vostoka Rossii: trudy III Vserossiiskogo simpoziuma “Zoloto Sibiri i Dal'nego Vostoka: geologiya, geokhimiya, tekhnologiya, ekonomika, ekologiya”*, Ulan-Ude, 21–25 sentyabrya 2004 [Gold ore deposits of the East of Russia: proceedings of the III All-Russian Symposium “Gold of Siberia and the Far East: geology, geochemistry, technology, economics, ecology”, Ulan-Ude, September 21–25, 2004], Magadan, BNTs SO RAN Publ., 2006, pp. 32–49.
21. Uspenskii V. A., Neruchev S. G., Radchenko O. A. [et al.]. Formirovanie osnovnykh tipov iskopaemogo organicheskogo veshchestva i ikh evolyutsiya na posledovatel'nykh stadiyakh litogeneza [Formation of the main types of fossil organic matter and their evolution at successive stages of lithogenesis], *Priroda organicheskogo veshchestva sovremennykh i iskopaemykh osadkov* [Nature of organic matter of modern and fossil sediments], Moscow, Nauka Publ., 1973, pp. 68–78. (In Russ.).
22. Fridovskii V. Yu., Solov'ev E. Yu., Polufuntikova E. I. Dinamika formirovaniya i struktury yugovostochnogo sektora Adycha-Nerskoj metallogenicheskoi zony [Dynamics of formation and structures of the southeast quadrant of the Adycha-Nersky metallogenic zone], *Otechestvennaya geologiya* [National Geology], 2003, No 3, pp. 16–21. (In Russ.).
23. Shashorin B. N., Tolkachev A. E., Afanas'eva R. N. Pokrovno-skladchatye deformatsii i zolotonosnost' Khodokanskogo rudnogo polya [Cover fold deformations and gold potential of Khodokan ore field], *Otechestvennaya geologiya* [National Geology], 2004, No 6, pp. 17–22. (In Russ.).
24. Beuge P., Rosler H. J. u. a. Untersuchungen zur Geohemie der Metamorphose mit Hilfe der zerstörungsreien Neutronenaktivierungsanalyse, *Zeitschrift für angewandte Geologie*, Bd. 24, 1978, Heft 7/8, pp. 334–339.
25. Emsbo P., Koenig A. E. Transport of Au in petroleum: evidence from the northern Carlin trend, Nevada, *Proceedings of the 9th Biennial SGA Meeting*, eds. Andrew C. J. [et. al.], Dublin, Millpress, 2007, pp. 695–698.
26. Li Jianming, Ying Hanlong, Ye Jie Chen Xurui. Sediment-hosted micro-disseminated gold deposits in China, *The 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, August 6–17, 2000. Congress Program*, Rio de Janeiro, Geological Survey of Brazil, 2000, pp. 36–37.

Ганжа Галина Борисовна

ветеран ЦНИГРИ

Арсентьева Ирина Викторовна (arsenteva@tsnigri.ru)

кандидат геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник

ФГБУ «Центральный научно-исследовательский геологоразведочный институт цветных и благородных металлов», г. Москва, Россия