

<https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-3-0310>

THE ROLE OF DYNAMOMETAMORPHISM IN THE FORMATION OF THE MUKODEK GOLD FIELD (NORTH PRIBAIKALIE)

V. A. Vanin¹, A. V. Tatarinov², D. P. Gladkochub¹,
A. M. Mazukabzov¹, V. G. Molochny³

¹*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia*

²*Geological Institute, Siberian Branch of RAS, Ulan-Ude, Russia*

³*LLC Siberian Geological Company, Irkutsk, Russia*

Abstract: The Mukodek gold field is discussed as an example proving that dynamometamorphism is a major factor in the formation of gold deposits in the Abchad fault zone. This deposit belongs to the gold-silver-ore zones of mylonitization and schistosity. The ore source is related to the original host rocks with an increased geochemical background concentration of Au. Due to dynamometamorphism processes, gold particles are abundant and mostly enlarged. From the primary rocks, the dynamometamorphites inherit a positive correlation between the number of particles and the concentrations of gold. The dynamometamorphic complex of the ore field developed in two stages, as a minimum. At the early stage (321.0 ± 1.9 Ma), the host rocks were mechanochemically deformed and transformed into the gold-bearing mineralized dynamometamorphites containing sericite, chlorite, ankerite, albite, and quartz. In the second stage (280 ± 15 Ma), the albite-dolomite-quartz ore veins were formed. Such veins have industrial gold contents.

Key words: Mukodek; Abchad fault; North Pribaikalie; ore field; dynamometamorphism; gold

РОЛЬ ДИНАМОМЕТАМОРФИЗМА В ФОРМИРОВАНИИ ЗОЛОТОРУДНОГО ПОЛЯ МУКОДЕК (СЕВЕРНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ)

В. А. Ванин¹, А. В. Татаринов², Д. П. Гладkochуб¹,
А. М. Мазукабзов¹, В. Г. Молочный³

¹*Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия*

²*Геологический институт СО РАН, Улан-Удэ, Россия*

³*ООО «Сибирская геологическая компания», Иркутск, Россия*

RESEARCH ARTICLE

Recommended by E.V. Sklyarov

Received: October 26, 2016

Revised: April 12, 2017

Accepted: April 28, 2017

For citation: Vanin V.A., Tatarinov A.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Molochny V.G., 2017. The role of dynamometamorphism in the formation of the Mukodek gold field (North Pribaikalie). *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (3), 643–653. doi:10.5800/GT-2017-8-3-0310.

Для цитирования: Ванин В.А., Татаринов А.В., Гладkochуб Д.П., Мазукабзов А.М., Молочный В.Г. Роль динамометаморфизма в формировании золоторудного поля Мукодек (Северное Прибайкалье) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2017. Т. 8. № 3. С. 643–653. doi:10.5800/GT-2017-8-3-0310.

Аннотация: Установлена роль динамометаморфизма как основного фактора при формировании рудоносных залежей золота в Абчадской зоне разлома на примере рудного поля Мукодек. Рудный объект отнесен к рудно-формационному золотосеребряному типу зон милонитизации и расланцевания. Исходные вмещающие породы, обладающие повышенным геохимическим фоном Au, являются источником рудного вещества. При процессах динамометаморфизма увеличивается количество золотых частиц. Большая их часть подвергается укрупнению. От первичных пород динамометаморфитами наследуется положительная корреляция между количеством частиц и концентрациями золота. Формирование динамометаморфического комплекса рудного поля происходило как минимум в две стадии. На ранней стадии (321 ± 1.9 млн лет) в результате механохимического (деформационного) преобразования вмещающих пород образовались золотоносные минерализованные динамометаморфиты серицит-хлорит-анкерит-альбит-кварцевого состава. Во вторую (280 ± 15 млн лет) – сформировались рудные жилы альбит-доломит-кварцевого состава с промышленными содержаниями золота.

Ключевые слова: Мукодек; Абчадский разлом; Северное Прибайкалье; рудное поле; динамометаморфизм; золото

1. ВВЕДЕНИЕ

Процессы формирования золоторудных месторождений на северо-востоке России детально рассмотрены в целом ряде работ [Volkov, 2005; Goryachev et al., 2008; Ostapenko et al., 2013; Parfenov, Kuzmin, 2001; и др.]. На фоне достаточно детально изученных золоторудных объектов Чукотского АО, Магаданской области и восточной части Республики Саха (Якутия) Северное Прибайкалье изучено значительно хуже, за исключением Бодайбинского района [Buryak, Bakulin, 1998; Ivanov, 2014; Lobanov, 1970; Chugaev et al., 2014; Kucherenko et al., 2008; и др.].

Одним из золоторудных объектов Северного Прибайкалья является Мукодекское рудное поле, которое располагается вблизи границы Олоkitского прогиба и Байкало-Муйского фрагмента Саяно-Байкальского складчатого пояса, разделяющей структурой которых является Абчадская зона разлома (АЗР) (рис. 1), которая, по сути, является аналогичной Даванской субмеридиональной зоне разлома, где широко проявлены процессы динамометаморфизма, сопровождаемые формированием редкометалльного оруденения и месторождений гранулированного кварца [Bydtaeva et al., 2011; Lobanov, 1970; Prokhorov et al., 1982]. Редкометалльная минерализация [Manuilova et al., 1964] и месторождения гранулированного кварца [Bydtaeva et al., 2011] также выявлены и в АЗР. Кроме этого, в ней установлены неоднократно проявленные процессы динамометаморфизма [Demin, Khmel'nitskaya, 1985], с зонами развития которых пространственно связаны золоторудные объекты, в частности Нерундинское золоторудное месторождение и рудное поле Мукодек. Помимо коренной золотоносности, в АЗР имеются россыпные месторождения золота

в отложениях рек Нерундукан и Нерунда [Budaev, Kolomiets, 2001; Kolomiets, Budaev, 2014], притоков рек Бол. Чуя и Мама, коренные источники которых находятся в толще пород, подвергнутой тектонометаморфическим преобразованиям.

Мукодекский разлом, к которому приурочена рассматриваемая золоторудная минерализация на одноименном рудном поле, принадлежит к АЗР, который прослеживается на расстояние более 450 км от побережья Байкала до р. Витим, при максимальной ширине около 12 км. Зона разлома накладывается на разновозрастные метаморфические и магматические образования. В пределах АЗР присутствуют обширные зоны катаклазитов, милонитов, ультрамилонитов и тектонических брекчий [Demin, Khmel'nitskaya, 1985]. Подобные образования слагают динамометаморфический комплекс на рудном поле Мукодек и Нерундинском месторождении, в котором локализована золоторудная минерализация.

Проведенный анализ особенностей размещения золоторудных объектов на территории Северного Прибайкалья показал, что целый ряд рудопроявлений и месторождений золота обнаруживает строгую приуроченность к зонам крупных разрывных нарушений, сформированных в условиях господства тектонодеформационных процессов. Однако эта закономерность до настоящего времени не нашла достаточно полного и детального отражения в существующих моделях формирования золоторудных объектов.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения вещественного состава на территории рудного поля были отобраны образцы

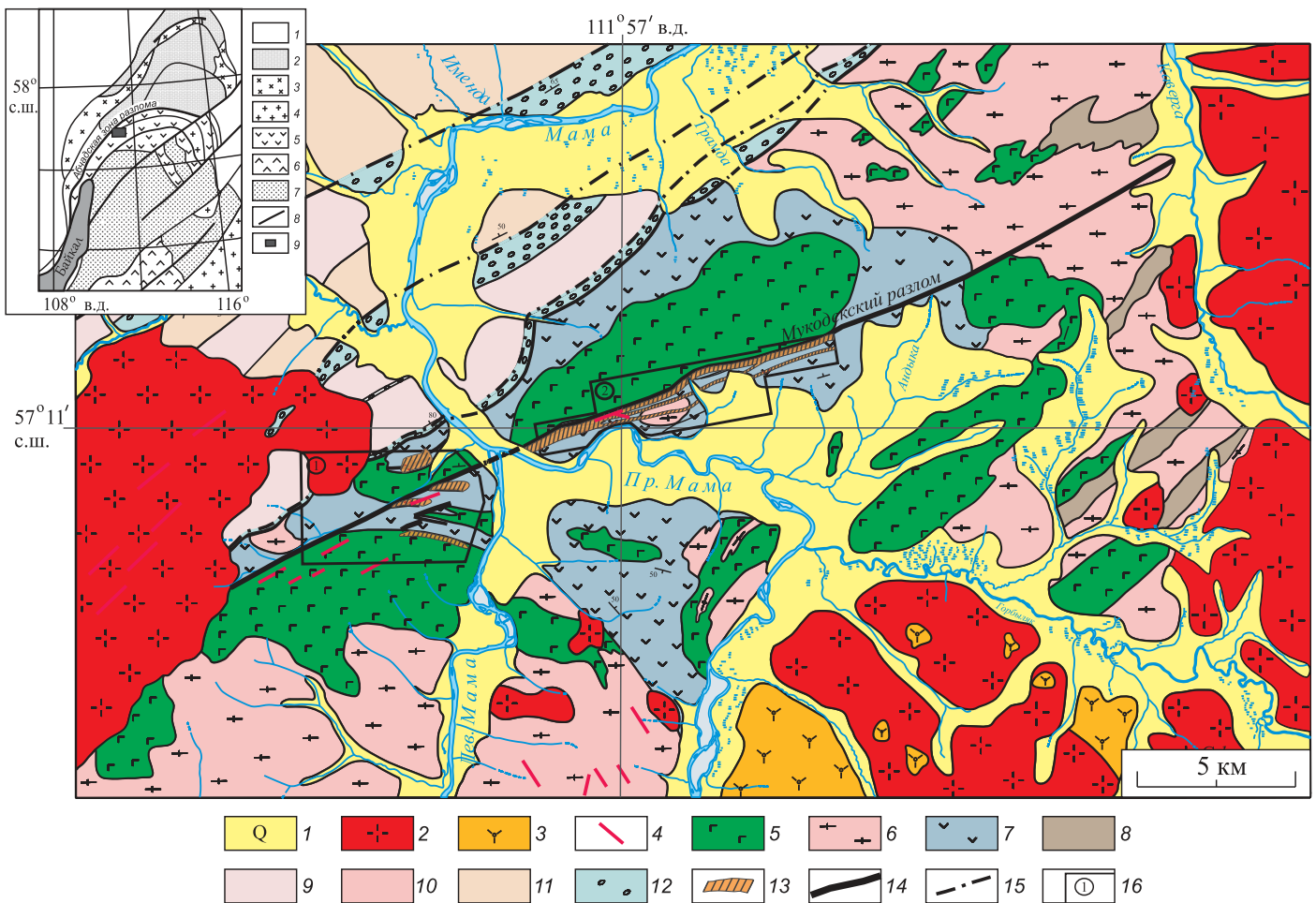


Рис. 1. Геологическая карта золоторудного поля Мукодек (составлена с использованием материалов геолого-поисковых работ 2008 и 2012 гг.)

1 – четвертичные отложения; 2–4 – конкудеро-мамаканский комплекс: 2 – граниты, 3 – сиениты, 4 – дайки (гранит-порфиры); 5–6 – таллаинский комплекс: 5 – габбро, 6 – плагиограниты; 7 – вулканиты ушмуканской толщи; 8 – метапесчаники горбылякской свиты; 9–12 – Олоkitская структурная зона: 9–11 – итыкитская, ондокская и овгольская свиты: переслаивание алевросланцев, метапесчаников, метагравелитов, сланцев, горизонты кристаллических известняков, 12 – конгломераты холоднинской свиты; 13 – золоторудные зоны метасоматитов; 14 – Мукодекский разлом; 15 – разломы, входящие в Абчадскую зону разломов; 16 – границы участков детализации (1 – Мукодек, 2 – Правомамский). Врезка – главные террейны Забайкалья, по [Parfenov et al., 1996]: 1 – Сибирская платформа; 2–3 – Байкало-Патомский складчато-надвиговой пояс: 2 – рифейские отложения, 3 – раннедокембрийские образования; 4–7 – террейны: 4 – кратонные, 5 – Келянский, 6 – Еравнинский, 7 – Баргузинский; 8 – зоны разломов; 9 – район работ.

Fig. 1. Geological map of the Mukodek gold field. The map uses the geological survey data collected in 2008 and 2012.

1 – Quaternary deposits; 2–4 – Konkudera–Mamakan complex: 2 – granites, 3 – syenites, 4 – dykes (granite porphyry); 5–6 – Tallaya complex: 5 – gabbro, 6 – plagiogranites; 7 – Ushmukan volcanites; 8 – metasandstones of the Gorbylyak suite; 9–12 – Olokitskaya structural zone: 9–11 – Itykit, Ondok and Ovgol suites: interlayering of aleuritic shales, metasandstones, metagravelites, shales, and layers of crystalline limestones, 12 – conglomerates of the Kholodninskaya suite; 13 – gold-bearing zones of metasomatites; 14 – Mukodek fault; 15 – faults belonging to the Abchad fault zone; 16 – boundaries of the sites studied in detail (1 – Mukodek, 2 – Pravomamsky). The insert shows the main terranes of Transbaikalia, according to [Parfenov et al., 1996]: 1 – Siberian platform; 2–3 – Baikal–Patom fold-thrust belt: 2 – Riphean deposits, 3 – Early Precambrian formations; 4–7 – terranes: 4 – cratonic, 5 – Kelyan, 6 – Eravanin, 7 – Barguzin; 8 – fault zones; 9 – study area.

тектонитов из минерализованных зон, слабо измененных вторичными процессами вулканитов и гранитоидов из коренных пород, вскрытых горными выработками, и из керна буровых скважин.

Изучение состава руд включало в себя качественный и количественный минералогический анализ. Диагностика минералов осуществлялась

рентгеноструктурным фазовым анализом в ИРГИ-РЕДМЕТе (г. Иркутск). Количественный минеральный состав определялся в прозрачных и полированных шлифах, пробах-протоколках.

Определение содержаний Au и Ag в породах рудного поля проводилось с помощью сцинтилляционного атомно-эмиссионного анализа (САЭА) с

дуговым разрядом и сцинтилляционной регистрацией спектров (САЭС) в аналитическом отделе ИГХ СО РАН по аттестованной методике [Shabanova et al., 2012] (СТЭ-1 с высокоскоростными фотодиодными линейками МАЭС; устройство «Поток», количество параллельных измерений $n=2-4$, аналитическая навеска 150 мг, расчет частиц выполнен для $150 \cdot 4=600$ мг, вклад в валовые содержания частиц размером <2 мкм не учтен), ответственный исполнитель Е.В. Шабанова, руководитель группы ОСА и СО И.Е. Васильева.

В процессе проведения геологических исследований был выполнен морфологический анализ структурных наблюдений и структурно-парагенетический анализ условий образования отдельных структур.

3. ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И РУДОНОСНОСТИ МУКОДЕКСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ

В геологическом строении рудного поля принимают участие породы верхнерифейского (неопротерозойского) и позднепалеозойского возраста. К первым относятся метаморфизованные вулканогенно-осадочные отложения ушмуканской толщи и метаосадочные образования горбылякской свиты, габброиды и гранитоиды таллаинского комплекса. Позднепалеозойские образования представлены гранитоидами конкудеро-мамаканского комплекса. Все упомянутые породы, кроме позднепалеозойских гранитоидов, испытали тектонометаморфические преобразования, отвечающие РТ-условиям зеленосланцевой фации метаморфизма.

Разрез ушмуканской толщи на территории рудного поля состоит из ортосланцев, представленных чередованием основных, средних и кислых метавулканитов. Преобладают метавулканиты среднего и кислого состава. Текстура пород сланцеватая, плейчатая, полосчатая, линзовидно-полосчатая. Их минеральный состав определяют: актинолит, эпидот, хлорит, плагиоклаз в различных количественных соотношениях. Общая мощность толщи более 1.5 км.

В соответствии с общепринятой классификацией (TAS-диаграмма) метавулканиты ушмуканской толщи представлены рядом петрохимических типов: базальтом, трахибазальтом, андезитом, трахиандезитом, андезибазальтом, трахиандезибазальтом, дацитом с геохимическими характеристиками, близкими островодужным вулканитам [Vanin et al., 2014].

Таллаинский комплекс с возрастом 604 ± 3.4 млн лет [Rytsk et al., 2007] в пределах золоторудного поля представлен двумя фазами. К первой относятся катаклазированные полосчатые разгнейсо-

ванные габброиды, сложенные плагиоклазом (30–75 %), роговой обманкой (30–60 %), биотитом (1–5 %), редко кварцем (1–5 %). Динамометаморфические изменения проявлены в виде эпидотизации, хлоритизации, серицитизации, карбонатизации.

Во вторую фазу таллаинского комплекса объединяют средне- и крупнозернистые, иногда порфировидные, реже – мелкозернистые разновидности плагиогранитов, в значительной степени превращенные в гранитогнейсы и гнейсы частично мигматизированные, с некоторым развитием милонитов и катаклазитов. По составу полевых шпатов неизменные граниты второй фазы можно подразделить на плагиоклазовые и микроклиноплагиоклазовые.

Конкудеро-мамаканский комплекс, возраст становления тел которого, по различным оценкам [Kovach et al., 2012; Kolomiets, Budaev, 2014; Tsygankov et al., 2010, 2012; Litvinovsky et al., 2011], отвечает достаточно длительному временному интервалу (320–275 млн лет), в пределах рассматриваемой площади представлен гранитами, граносиенитами, сиенитами и редко – диоритами. Контакты гранитоидов конкудеро-мамаканского комплекса с вмещающими породами дискордантные, резкие и секущие. В области эндоконтактов крупных массивов часто наблюдаются ксенолиты вмещающих пород. Ширина экзоконтактовых изменений (по изограде биотита) колеблется от первых метров до 3 км. Она зависит от крутизны залегания поверхности контакта массива.

К этому комплексу также отнесены дайки сиенит-порфиров, гранит-порфиров и риолит-порфиров, которые установлены как в пределах крупных массивов комплекса, так и во вмещающих породах (рис. 1). Дайки риолит-порфиров макроскопически выглядят как мелкозернистые породы с порфировыми вкрапленниками плагиоклаза и микроклина.

К северу от рудного поля распространены метаморфизованные терригенно-карбонатные, углеродистые, вулканогенно-осадочные и вулканогенные породы итыкитской, ондокской и холоднинской свит, которые принадлежат к Олокинской структурно-формационной зоне.

Тектонические особенности и золотоносность рудного поля. Зона Мукодекского разлома в каледонский этап тектогенеза, вероятнее всего, формировалась как сдвиго-поддвиговая структура с шарьяжно-надвиговым стилем развития.

Мукодекский разлом имеет восток-северо-восточное простирание и крутое падение ($60-70^\circ$) на север-северо-запад. На отдельных его участках наблюдается выполаживание до $30-45^\circ$. Ширина вскрытой горными выработками зоны разлома со-

ставляет более 2.5 км. Пересекая все допалеозойские образования на площади рудного поля, он никак не затрагивает конкудеро-мамаканские граниты (рис. 1). Зона разлома характеризуется сложным чешуйчатым строением в виде серии тонких тектонических пластин, субпараллельных основному сместителю. Тектоно-деформационные процессы выразились в образовании S-образного кливажа, линейного рассланцевания, полосчатости, зон брекчирования и будинажа, складок различной морфологии и масштаба, с широким проявлением окварцевания и карбонатизации в форме вкрапленности и прожилков кварц-кальцитового состава.

Для сланцеватости безрудных пород, распространенных в зоне влияния Мукодекского разлома, характерны крутые углы ($55-75^\circ$) с азимутом падения $330-350^\circ$. В центральной и южной части участка Мукодек крутопадающая сланцеватость ориентирована по азимуту падения $170-180^\circ$ (рис. 1). Интенсивность рассланцевания во вмещающих породах документируется как умеренная. Она усиливается с приближением к минерализованным зонам динамометаморфитов. На плоскостях рассланцевания иногда отмечаются кварцевые, кварц-карбонатные прожилки. Количество прожилков увеличивается по мере приближения к минерализованным зонам. Мощность прожилков – от нитевидных до нескольких сантиметров. Прожилки ориентированы субпараллельно направлениям сланцеватости.

Пространственная ориентировка сланцеватости в минерализованных (рудных) зонах динамометаморфитов и наложенной на нее системы трещин, как правило, на $10-15^\circ$ отличается от таковой в рудовмещающей толще. Местами также меняется и величина углов падения до 30° .

Наложённые на сланцеватость трещины образуют систему следующих направлений: аз. пад. $340-350^\circ \angle 60-70^\circ$ (иногда наблюдается их выполаживание до $30-45^\circ$); $180^\circ \angle 80^\circ$; $90^\circ \angle 40^\circ$. Эти трещины выполнены белым кварцем, часто с включениями сульфидов (пирита, халькопирита), альбита и железисто-магнезиальных карбонатов.

Сделан вывод о правосдвиговых движениях по главному Мукодекскому разлому в рудный этап развития. На это указывают зафиксированные в рудных зонах динамометаморфитов флексурные перегибы и складки с азимутами погружения шарниров $350-360^\circ \angle 30-50^\circ$ и падением осевой поверхности на запад, северо-запад под углом $30-40^\circ$. Следует отметить, что в замках складок волочения отмечается пересечение ранних метаморфитов серицит-альбит-анкерит-кварцевого состава поздними жильными образованиями анкерит(кальцит)-кварцевого состава под углом, близким к углу осевой поверхности этих складок.

На позднем пострудном этапе формирования рудного поля происходило образование разрывов с аз. пад. $20^\circ \angle 50^\circ$ и субширотного простираения, с внедрением по ним даек конкудеро-мамаканского комплекса, секущих минерализованные зоны (рис. 1). Распространенная пострудная система трещин представлена развитием трех различных направлений азимута падения: $270^\circ \angle 80^\circ$; $40^\circ \angle 75^\circ$; $135^\circ \angle 20^\circ$.

В Мукодекской зоне разлома установлены три протяженные золотоносные минерализованные зоны динамометаморфитов на Правомамском участке и четыре зоны на участке Мукодек (рис. 1). Минерализованные зоны, как правило, имеют четкие геологические границы и золотоносны на всем протяжении, рудные же тела с заданными кондиционными и оценочными параметрами в их пределах выявляются лишь бороздовым и керновым опробованием. Мощность зон достигает 30, иногда 160 м. Они прослежены горными выработками через 200 и 400 м на расстояние более 12 км. Параметры рудных тел: мощность – от 2.2 до 9.9 м, длина по простираению – от 100 до 2000 м, прослеженная протяженность по падению – от 30 до 250 м. Содержания золота в них варьируются в широких пределах ($1.23-77.30$ г/т). Ресурсы золота кат. P_1 и P_2 суммарно оценены >400 т для опойскованной площади участка.

Золотоносный динамометаморфический комплекс, включающий катаклазиты, динамосланцы, милониты и тектонобрекчии, сформирован по вулканогенно-осадочным породам ушмуканской толщи, габброидам и гранитоидам таллаинского комплекса, обладающим повышенным геохимическим фоном золота (таблица). Т.е. рудные зоны сформированы по тем породам и в тех местах, где их пересекает Мукодекский разлом. Рудоносные динамометаморфиты характеризуются порфиروبластической, бластоцементной, гетерогранолепидобластовой, катакластической, пойкилометаблостовой структурами. Им свойственна полосчатая, сланцеватая, очково-линзовидная, брекчиевая текстура.

Их основными порообразующими минералами (в скобках средние содержания) являются: плагиоклаз (альбит, олигоклаз) (39.2 %), карбонат (кальцит, доломит, анкерит) (24.3 %), кварц (21.5 %), серицит (6.3 %), хлорит (5.8 %). Суммарная массовая доля рудных минералов в залежах с промышленной минерализацией составляет 2.9 %. Из них 1.1 % приходится на гидроксиды железа (лимонит, гетит), 0.3 % – на ильменит и 0.2 % – на магнетит. Доля сульфидов составляет 1.3 %. Сульфиды представлены главным образом пиритом. Иногда отмечаются пирротин, галенит, халькопирит и сфалерит. Минеральные парагенетические

Характеристики горных пород и руд Мукодекского рудного поля по данным САЭА**Characteristics of the rocks and ores sampled from the Mukodek ore field (as shown by the SAEA)**

Характеристики	Вмещающие породы (группа 1)	Динамометаморфиты рудных зон (группа 2)	Рудные тела (группа 3)
Средние значения количества зарегистрированных частиц Au (шт)	5	12	29
То же сплавов Ag-Au	0.3	7.0	21.0
Процент содержаний частиц Ag-Au сплавов	5.8	37.4	42.5
Средние значения количества зарегистрированных частиц Ag (шт)	13	2750	3595
Процент содержаний самой тонкой фракции (2–6 мкм) частиц Au	98.7	80.8	61.2
То же Ag	95.5	98.1	77.1
Средние содержания Au (г/т)	0.014	0.140	1.660
Диапазон содержаний Ag (г/т)	0.00 – <0.03	<0.03 – 1.10	0.19 – 2.70 (среднее 1.24)

ассоциации представлены (от ранних к поздним): пирит-пирротиновой, пирит-гематит-кварцевой, золото-теллуридно-халькопирит-галенит-пирит-кварцевой.

Самородное золото локализовано частично в пирите, но в основном в крупнокристаллическом молочно-белом и сером «льдином» кварце в самородной форме. Оно образует рудную ассоциацию с мелкокристаллическим пиритом, галенитом и халькопиритом. Преобладающий размер зерен 0.1–0.3 мм. Цвет золота ярко-желтый, реже – красновато-желтый. Наиболее характерные формы частиц золота: пластинчатая с пережимами и короткими отростками, комковатая, крючковатая.

В пирите золото чаще всего встречается в виде теллуридов (петцитов), и только 20 % от общего количества приходится на его самородную форму. В ассоциации с золотом изредка встречается гессит. Иногда золото в пирите образует вытянутые выделения размером около 300 мкм [Ivanov et al., 2015]. Но чаще оно, располагаясь по зонам роста кристаллов пирита, обладает правильной изометричной формой с элементами кристаллографической огранки.

4. ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОЛОТОРУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

По структурно-вещественным признакам Мукодекское золоторудное поле отнесено к рудноформационному золотосеребряному типу «зон милонитизации и рассланцевания» [Shcheglov, 1997]. Рудные объекты этого типа позднее А.Д. Щеглов [Shcheglov, 2007] выделил в особую генетическую группу динамогенных месторождений, возникаю-

щих при перемещении крупных блоков верхних слоев тектоносферы. По его утверждению, такие месторождения образуются при горизонтальных и вертикальных перемещениях блоков земной коры в большом интервале температур и давлений, что приводит к формированию в одних случаях рудноносных милонитов, а в других (в приповерхностных условиях) – месторождений альпийского типа. При этом рудное вещество этих месторождений концентрируется «под влиянием динамического воздействия динамометаморфизма, часто в узких линейных зонах вдоль границ крупных геологических масс» [Yarmolyuk et al., 2006]. Формирование рудных полей, приуроченных к динамометаморфическим комплексам шовных зон (зон смятия) и шарьяжно-надвиговых структур коллизионных орогенов, рассматривается в рамках генетических моделей, в основе которых лежат представления о динамометаморфическом (тектоно-метаморфическом, деформационно-метаморфическом) рудогенезе [Tatarinov, Yalovik, 2006; Chikov, 1992a, 1992b].

Предполагаются деформационные механизмы высвобождения из первичных пород, перераспределения и накопления рудных компонентов в промышленных концентрациях за счет механохимических реакций в условиях сдвигового тектогенеза. Они включают в себя механическое разрушение (деструкцию), раскристаллизацию и перекристаллизацию, образование флюидов и металлоорганических комплексов.

Широко проявленные динамометаморфические процессы в пределах АЗР [Demin, Khmel'nitskaya, 1985] и на площади Мукодекского рудного поля указывают на возможность динамометаморфического (механохимического) образования рудных тел. Источником рудного вещества, вероятно,

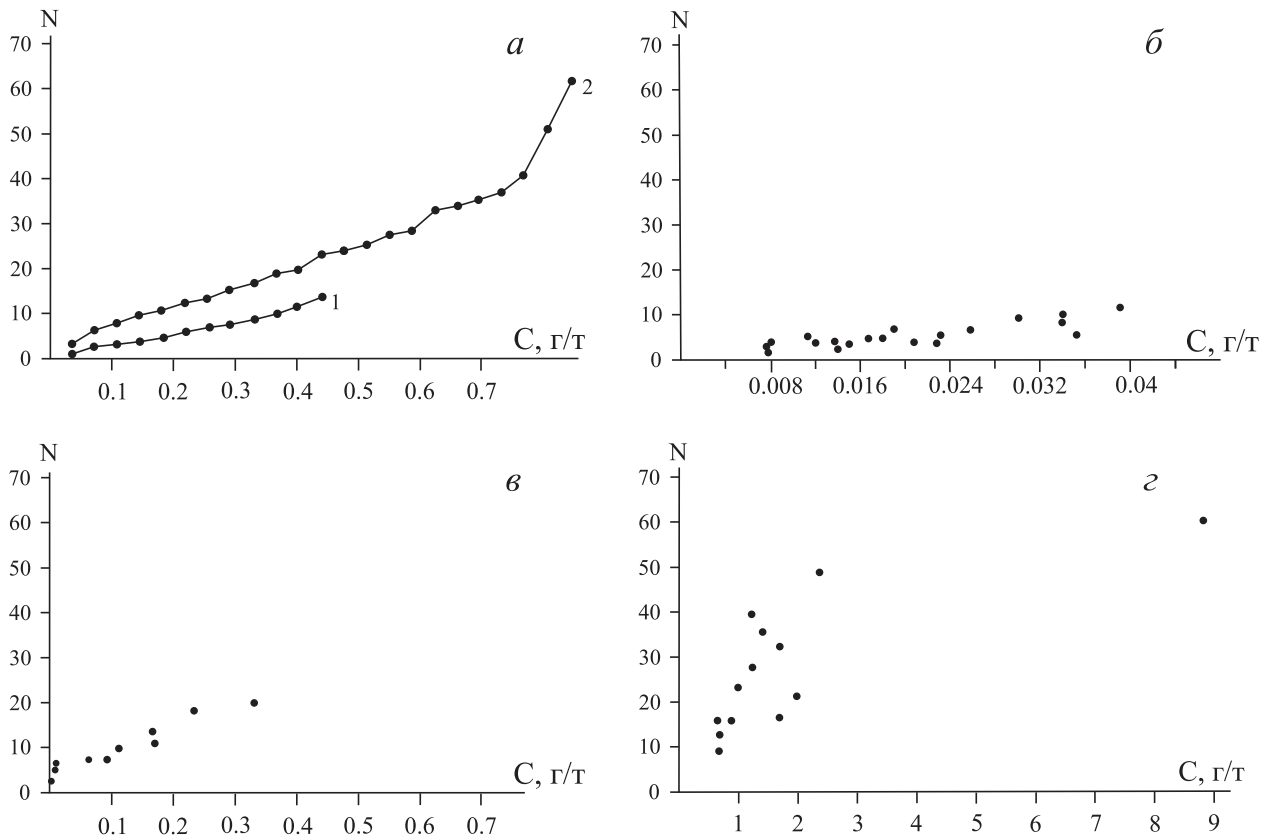


Рис. 2. а – тренды распределений частиц золота (N) во вмещающих породах (1) и рудных зонах (2). Точки на графиках – пробы. б – график корреляции между числом частиц (N) и содержаниями (C) Au по данным САЭА проб вмещающих пород; в – график корреляции между числом частиц (N) и содержаниями (C) Au по данным САЭА проб динамометаморфического комплекса рудных зон; г – график корреляции между числом (N) и содержаниями (C) Au по данным САЭА проб рудных тел.

Fig. 2. а – distribution trends of gold particles (N) in the host rocks (1) and ore zones (2). Dots on the curves correspond to the samples. Curves showing correlations between the number of Au particles (N) and content (C), according to the SAEA of the samples taken from: б – host rocks; в – dynamometamorphic complex of the ore zones; г – ore bodies.

могут являться вмещающие золоторудную минерализацию породы. Для доказательства данного утверждения выполнены определения количества самородных частиц Au, Ag и их сплавов в ИГХ СО РАН (г. Иркутск). Рассчитаны также содержания этих металлов.

Анализировались три группы проб: 1) метавулканиды из вмещающей ушмуканской толщи (24 шт.) и габброиды таллаинского комплекса (2 шт.); 2) динамометаморфиты, слагающие золоторудные зоны (10 шт.); 3) рудные тела, условно выделенные в составе золоторудных зон по содержанию Au ≥ 0.5 г/т (16 шт.). Результаты обобщены в таблице и на диаграммах (рис. 2). Их анализ приводит к следующим выводам.

1. Исходные рудовмещающие породы рудного поля обладают повышенным геохимическим фоном золота (14 мг/т). При этом почти 99 % частиц золота находится в тонкодисперсном (2–6 мкм) рассеянном состоянии (таблица).

2. В процессе динамометаморфизма в среднем более чем в два раза увеличивается количество частиц крупного золота при уменьшении доли весьма тонкого. Среднее же содержание золота вырастает в десять раз, т.е. налицо процесс его мобилизации и концентрирования. Однако при этом отметим, что при значительно повышенном уровне золотоносности пород динамометаморфического комплекса, слагающего рудные зоны, тренд распределения частиц золота (рис. 2, а) комплементарен таковому для первичных пород.

3. По сравнению с исходными породами в рудных телах динамометаморфического генезиса, около 40 % тонкодисперсного золота подвергается укрупнению при лавинообразном росте его средних содержаний (более чем в 100 раз).

Данная закономерность согласуется с экспериментами по механической активации геохимических специализированных на золото фосфоритов Бурэнханского месторождения [Tatarinov

et al., 2008]. Эксперименты были поставлены с целью изучения возможности механохимического перераспределения и концентрирования золота. Размеры исходного тонкого золота, приуроченного к окисленному пириту, в основном менее 1 мкм, изредка достигают 1–3 мкм. В ходе механохимических превращений его частицы образуют микрополоски длиной до 20 мкм и шириной 1.5–2.0 мкм, а также выделения размером 1×7 мкм и 2.5×5.0 мкм.

4. С ростом содержаний и укрупнением золота в ходе рудообразования сильная положительная корреляция между количеством его частиц и концентрациями сохраняется от первичных пород (рис. 2, б–г). Однако при этом происходит резкое увеличение весьма пологого угла наклона (7°) корреляционного поля, характерного для исходных первичных пород, до 25° в динамометаморфитах золоторудных зон и до 65° в рудных телах.

Поведение серебра в процессах динамометаморфизма, завершающихся рудообразованием, в целом аналогично золоту, за исключением укрупнения его частиц (таблица). При динамометаморфизме и рудогенезе золото и серебро, практически не образующие сплавов типа электрума в первичных породах, осуществляют концентрирование в значительной степени уже в виде совместных минералов. Из этого также следует предполагать и уменьшение значений пробности золота в рудных телах по сравнению с рассеянным в исходных породах.

Формирование рудного поля происходило в две стадии. Имеющиеся датировки $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом [Ivanov et al., 2015] по двум навескам пиритов, отобранных из сульфидизированных динамометаморфитов рудных зон и поздних жильных рудных тел, соответственно показывают 321.0±1.9 млн лет и 284.0±15.0 млн лет. На ранней стадии происходило механохимическое преобразование попавших в зону влияния Мукодекского разлома пород ушмуканской толщи и таллаинского комплекса с образованием минерализованных динамометаморфитов серицит-хлорит-анкерит-альбит-кварцевого состава. На второй стадии сформировались минерализованные рудные жилы альбит-доломит-кварцевого состава. И те, и другие образования имеют промышленные содержания золота.

рализованное рудные жилы альбит-доломит-кварцевого состава. И те, и другие образования имеют промышленные содержания золота.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Золоторудное поле Мукодек, обладающее всеми признаками рудной формации «зон милонитизации и рассланцевания», по [Shcheglov et al., 1997], относится к группе динамогенных месторождений. Главенствующая роль в образовании золоторудных зон и залежей Мукодекского поля принадлежит процессам динамометаморфизма, сопровождающим длительное становление Абчадской зоны разломов. Намечается трехстадийное формирование рудообразующей системы Мукодекского поля. На ранней (неопротерозойской) рудоподготовительной стадии возникают осадочно-вулканогенная ушмуканская толща и гранитоиды таллаинского комплекса, обладающие повышенным геохимическим фоном золота. На следующей стадии (карбон) тектонометаморфические преобразования приводят к формированию слабозолотоносного динамометаморфического комплекса в результате мобилизации и частичного перераспределения золота из первичных неопротерозойских осадочно-вулканогенных и магматических пород. Финальная стадия (пермский период) характеризуется динамометаморфизмом с образованием золоторудных тел, имеющих промышленное значение. Наиболее вероятным источником рудного вещества для золоторудных зон метасоматитов являлись геохимически специализированные на золото вулканиты ушмуканской толщи, габброиды и гранитоиды таллаинского комплекса.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 16-35-60033, 16-35-00042) и РНФ (проект № 16-17-10180) в части изучения вещественного состава руд.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Budaev R.Ts., Kolomiets V.L., 2001. Geological structure, conditions of formation and predicted resources of the Nerunda gold deposit (North Pribaikalie). In: Gold of Siberia: geology, geochemistry, technology, and economics. Proceedings of the Second International Symposium. KNIIGiMS, Krasnoyarsk, p. 229–230 (in Russian) [Будаев Р.Ц., Коломиец В.Л. Геологическое строение, условия формирования и прогнозные ресурсы месторождения мелкого золота «Нерунда» (Северное Прибайкалье) // Золото Сибири: геология, геохимия, технология, экономика: Труды Второго Международного симпозиума. Красноярск: КНИИГиМС, 2001. С. 229–230].
- Buryak V.A., Bakulin Yu.I., 1998. Metallogeny of Gold. Dalnauka, Vladivostok, 403 p. (in Russian) [Буряк В.А., Бакулин Ю.И. Металлогения золота. Владивосток: Дальнаука, 1998. 403 с.].

- Bydtaeva N.G., Kiseleva R.A., Kirillov A.A., 2011. Suture zones as the main ore-controlling structures of barren quartz deposits. In: Modern problems of studying and using the raw quartz. Proceedings of the All-Russia Conference (Miass, 24–27 May 2011). Ural Branch of RAS, Miass–Ekaterinburg, p. 33–47 (in Russian) [Быдтаева Н.Г., Киселева Р.А., Кириллов А.А. Шовные зоны как основные рудоконтролирующие структуры месторождений безрудного кварца // Современные проблемы изучения и использования минерально-сырьевой базы кварцевого сырья: Материалы Всероссийского совещания (г. Миасс, 24–27 мая 2011 г.). Миасс–Екатеринбург: УрО РАН, 2011. С. 33–47].
- Chikov B.M., 1992a. Hypothesis of stress-metamorphic concentration of ore elements in zones of crushing. In: Shear metamorphism and ore-controlling parageneses. UIGGM, Novosibirsk, p. 44–48 (in Russian) [Чиков Б.М. Гипотеза стресс-метаморфической концентрации рудных элементов в зонах смятия // Сдвиговый метаморфизм и рудоконтролирующие парагенезисы. Новосибирск: ОИГГМ, 1992. С. 44–48].
- Chikov B.M., 1992b. Shear stress-structure formation in the lithosphere: varieties, mechanisms, and conditions. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 33 (9), 3–39 (in Russian) [Чиков Б.М. Сдвиговое стресс-структурообразование в литосфере: разновидности, механизмы, условия // Геология и геофизика. 1992. Т. 33. № 9. С. 3–39].
- Chugaev A.V., Plotinskaya O.Y., Chernyshev I.V., Kotov A.A., 2014. Lead isotope heterogeneity in sulfides from different assemblages at the Verninskoe gold deposit (Baikal-Patom Highland, Russia). *Doklady Earth Sciences* 457 (1), 887–892. <https://doi.org/10.1134/S1028334X14070216>.
- Demin A.N., Khmel'nitskaya I.I., 1985. The Abchad fault zone (North Pribaikalie) and associated mineralization. In: Internal structure of Precambrian ore-bearing faults. Moscow, p. 73–94 (in Russian) [Демин А.Н., Хмельницкая И.И. Абчадская зона разломов (Северное Прибайкалье) и связанная с ней минерализация // Внутреннее строение рудоносных докембрийских разломов. М., 1985. С. 73–94].
- Goryachev N.A., Vikent'eva O.V., Bortnikov N.S., Prokofev V.Y., Alpatov V.A., Golub V.V., 2008. The world-class Natalka gold deposit, northeast Russia: REE patterns, fluid inclusions, stable oxygen isotopes, and formation conditions of ore. *Geology of Ore Deposits* 50 (5), 362–390. <https://doi.org/10.1134/S1075701508050024>.
- Ivanov A.I., 2014. Gold of the Baikal-Patom (Geology, Mineralization, and Prospects). FSUE TsNIGRI, Moscow, 215 p. (in Russian) [Иванов А.И. Золото Байкало-Патома (геология, оруденение, перспективы). М.: ФГУП ЦНИГРИ, 2014. 215 с.].
- Ivanov A.V., Vanin V.A., Demonterova E.I., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Gorovoy V.A., 2015. Application of the 'no fool's clock' to dating the Mukodek gold field, Siberia, Russia. *Ore Geology Reviews* 69, 352–359. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.007>.
- Kolomiets V.L., Budaev R.Ts., 2014. The gold and lithofacies characteristics of the sediments in the placer deposit "Nerunda" (Baikalian Siberia). *International Research Journal* (11–1), 70–71 (in Russian) [Коломиец В.Л., Будаев Р.Ц. Золото и литолого-фациальная характеристика отложений россыпного месторождения «Нерунда» (Байкальская Сибирь) // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 11-1 (30). С. 70–71].
- Kovach V.P., Sal'nikova E.B., Rytsk E.Y., Yarmolyuk V.V., Kotov A.B., Anisimova I.V., Yakovleva S.Z., Fedoseenko A.M., Plotkina Y.V., 2012. The time length of formation of the Angara-Vitim batholite: results of U-Pb geochronological studies. *Doklady Earth Sciences* 444 (1), 553–558. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12050133>.
- Kucherenko I.V., Gavrilov R.Yu., Martynenko V.G., Verkhozin A.V., 2008. Petrological and geochemical characteristics of the ore-bearing metasomatic aureole of the Chertovo Koryto gold deposit (Patom Highland). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Earth Sciences* 312 (1), 11–20 (in Russian) [Кучеренко И.В., Гаврилов Р.Ю., Мартыненко В.Г., Верхозин А.В. Петролого-геохимические черты рудовмещающего метасоматического ореола золоторудного месторождения Чертово корыто (Патомское нагорье) // Известия Томского политехнического университета. Науки о Земле. 2008. Т. 312. № 1. С. 11–20].
- Litvinovsky B.A., Tsygankov A.A., Jahn B.M., Katzir Y., Be'eri-Shlevin Y., 2011. Origin and evolution of overlapping calc-alkaline and alkaline magmas: The Late Palaeozoic post-collisional igneous province of Transbaikalia (Russia). *Lithos* 125 (3–4), 845–874. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.04.007>.
- Lobanov M.P., 1970. On the genesis of rare metal metasomatites in Pribaikalie. *Geologiya Rudnykh Mestorozhdenii (Geology of Ore Deposits)* 12 (3), 23–32 (in Russian) [Лобанов М.П. О генезисе редкометалльных метасоматитов Прибайкалья // Геология рудных месторождений. 1970. Т. 12. № 3. С. 23–32].
- Manuilova M.M., Vas'kovsky D.P., Gurulev S.L., 1964. Precambrian Geology of North Pribaikalie. Nedra, Moscow, 226 p. (in Russian) [Мануйлова М.М., Васковский Д.П., Гурулев С.Л. Геология докембрия Северного Прибайкалья. М.: Недра, 1964. 226 с.].
- Ostapenko N.S., Neroda O.N., Safronov P.P., 2013. The Pokrovskoe gold-silver deposit (Amur Region): Geological settings, formation factors, and ore mineralogy. *Russian Journal of Pacific Geology* 7 (5), 315–329. <https://doi.org/10.1134/S1819714013050059>.
- Parfenov L.M., Bulgatov A.N., Gordienko I.V., 1996. Terranes and the formation of the orogenic belts of Transbaikalia. *Tikhookeanskaya Geologiya (Russian Journal of Pacific Geology)* 15 (4), 3–15 (in Russian) [Парфенов Л.М., Булгатов А.Н., Гордиенко И.В. Террейны и формирование орогенных поясов Забайкалья // Тихоокеанская геология. 1996. Т. 15. № 4. С. 3–15].
- Parfenov L.M., Kuzmin M.I. (Eds.), 2001. Tectonics, Geodynamics, and Metallogeny of the Territory of the Republic of Sakha (Yakutia). MAIK, Moscow, 571 p. (in Russian) [Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия) / Ред. Л.М. Парфенов, М.И. Кузьмин. М.: МАИК, 2001. 571 с.].

- Prokhorov K.V., Sobachenko V.N., Tatarinov A.V., 1982. The Davan zone of rock crushing and its ore-bearing capacity. In: Rifts and endogenous mineralization of the Baikal-Amur region. Nauka, Moscow, p. 102–116 (in Russian) [Прохоров К.В., Собаченко В.Н., Татаринов А.В. Даванская зона смятия и ее рудоносность // Разломы и эндогенное оруденение Байкало-Амурского региона. М.: Наука, 1982. С. 102–116].
- Rytsk E.Y., Kovach V.P., Kovalenko V.I., Yarmolyuk V.V., 2007. Structure and evolution of the continental crust in the Baikal Fold region. *Geotectonics* 41 (6), 440–464. <https://doi.org/10.1134/S0016852107060027>.
- Shabanova E.V., Bus'ko A.E., Vasilieva I.E., 2012. Arc scintillation atomic emission analysis of powder samples using MAES with high temporal resolution. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov (Industrial laboratory. Materials diagnostics)* (1 (II)), 24–23 (in Russian) [Шабанова Е.В., Бусько А.Е., Васильева И.Е. Дуговой сцинтилляционный атомно-эмиссионный анализ порошковых проб при использовании МАЭС с высоким временным разрешением // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2012. № 1 (II). С. 24–23].
- Shcheglov A.D., 1997. On a new type of gold deposits and prospects for their discovery. *Razvedka i Okhrana Nedr (Prospect and protection of mineral resources)* (11), 10–11 (in Russian) [Щеглов А.Д. О новом типе месторождений золота и перспективах их открытия // Разведка и охрана недр. 1997. № 11. С. 10–11].
- Shcheglov A.D., 2007. Main Problems of Metallogeny. Selected Works. VSEGEI Publishing House, St. Petersburg, 359 p. (in Russian) [Щеглов А.Д. Основные проблемы металлогении. Избранные труды. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2007. 359 с.].
- Tatarinov A.V., Yalovik L.I., 2006. Dynamometamorphism as the main factor in the formation of collisional gold deposits. In: Gold ore deposits of East Siberia. Proceedings of the 3rd All-Russia Symposium: Gold of Siberia and the Far East: geology, geochemistry, technology, economics, and ecology (Ulan-Ude, 21–25 September 2004). North-Eastern Scientific Centre FEB RAS, Magadan, p. 32–49 (in Russian) [Татаринов А.В., Ялович Л.И. Динамометаморфизм – главный фактор формирования коллизионных месторождений золота // Золоторудные месторождения востока Сибири: Труды III Всероссийского симпозиума «Золото Сибири и Дальнего Востока: геология, геохимия, технология, экономика, экология» (г. Улан-Удэ, 21–25 сентября 2004 г.). Магадан: СВНЦ ДВО РАН, 2006. С. 32–49].
- Tatarinov A.V., Yalovik L.I., Karmanov N.S., Enhtuyaa D., 2008. Influence of mechanochemical transformations on the ore-bearing bacterial organo-mineral aggregates of phosphorites in Mongolia. In: Mineralogy and geochemistry of landscape in mining areas. Modern mineral formation. Proceedings of the 2nd All-Russia Symposium with international participation and the 8th All-Russia Readings devoted to Academician A.E. Fersman (Chita, 24–27 November, 2008). Chita, p. 90–92 (in Russian) [Татаринов А.В., Ялович Л.И., Карманов Н.С., Энхтуяа Д. Влияние механохимических преобразований на рудоносные бактериальные органо-минеральные агрегаты фосфоритов Монголии // Минералогия и геохимия ландшафта горнорудных территорий. Современное минералообразование: Труды II Всероссийского симпозиума с международным участием и VIII Всероссийских чтений памяти академика А.Е. Ферсмана (г. Чита, 24–27 ноября 2008 г.). Чита, 2008. С. 90–92].
- Tsygankov A.A., Litvinovsky B.A., Jahn B.M., Reichow M.K., Liu D.Y., Larionov A.N., Presnyakov S.L., Lepekhina Ye.N., Sergeev S.A., 2010. Sequence of magmatic events in the Late Paleozoic of Transbaikalia, Russia (U-Pb isotope data). *Russian Geology and Geophysics* 51 (9), 972–994. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.08.007>.
- Tsygankov A.A., Udoratina O.V., Burmakina G.N., Grove M., 2012. New data on U-Pb dating of zircons and the problem of the duration of the Angara-Vitim granitoid batholith formation. *Doklady Earth Sciences* 447 (1), 1273–1277. <https://doi.org/10.1134/S1028334X12110141>.
- Vanin V.A., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., 2014. The Neoproterozoic island-arc association of the Mukodek gold-ore field, Northern Baikal area. *Geodynamics & Tectonophysics* 5 (3), 743–762 (in Russian) [Ванин В.А., Гладкоhub Д.П., Донская Т.В. Неопротерозойская островодужная ассоциация золоторудного поля Мукодек // Геодинамика и тектонофизика. 2014. Т. 5. № 3. С. 743–762]. <https://doi.org/10.5800/GT-2014-5-3-0152>.
- Volkov A.V., 2005. The distribution and formation conditions of gold deposits in tectono-magmatic activation zones of the Northeast of Russia. *Geology of Ore Deposits* 47 (3), 188–205.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Kovach V.P., Rytsk E.Y., Kozakov I.K., Kotov A.B., Sal'nikova E.B., 2006. Early stages of the Paleasian ocean formation: Results of geochronological, isotopic, and geochemical investigations of Late Riphean and Vendian-Cambrian complexes in the Central Asian Foldbelt. *Doklady Earth Sciences* 411 (1), 1184–1189. <https://doi.org/10.1134/S1028334X06080046>.



Ванин Вадим Александрович, канд. геол.-мин. наук, м.н.с.
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
✉ e-mail: vanin_geo@mail.ru

Vanin, Vadim A., Candidate of Geology and Mineralogy, Junior Researcher
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
✉ e-mail: vanin_geo@mail.ru



Татаринов Александр Васильевич, докт. геол.-мин. наук, г.н.с.
Геологический институт СО РАН
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Россия
e-mail: tatarinov@gin.bscnet.ru

Tatarinov, Aleksander V., Doctor of Geology and Mineralogy, Chief Researcher
Geological Institute, Siberian Branch of RAS
6a Sakhyanova street, Ulan-Ude 670047, Russia
e-mail: tatarinov@gin.bscnet.ru



Гладкочуб Дмитрий Петрович, докт. геол.-мин. наук, член-корреспондент РАН,
директор института
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
e-mail: dima@crust.irk.ru

Gladkochub, Dmitry P., Doctor of Geology and Mineralogy, Corresponding Member of RAS,
Director of the Institute
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
e-mail: dima@crust.irk.ru



Мазукабзов Анатолий Муталибович, докт. геол.-мин. наук, в.н.с.
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
e-mail: mazuk@crust.irk.ru

Mazukabzov, Anatoly M., Doctor of Geology and Mineralogy, Lead Researcher
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
e-mail: mazuk@crust.irk.ru



Молочный Василий Григорьевич, главный геолог
ООО «Сибирская геологическая компания»
664019, Иркутск, ул. Освобождения, 131, Россия
e-mail: molvgr@mail.ru

Molochnyy, Vasily G., Chief Geologist
Siberian Geological Company LLC
131 Osvobozhdeniya street, Irkutsk 664019, Russia
e-mail: molvgr@mail.ru