

**РУДНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ОМСУКЧАНСКИХ ЛЕЙКОГРАНИТОВ В УСЛОВИЯХ
БАЛЫГЫЧАНО-СУГОЙСКОГО КОНТИНЕНТАЛЬНОГО РИФТА (СЕВЕРО-ВОСТОК
РОССИИ)*****Н.Е. Савва¹, А.В. Волков², А.Э. Ливач¹, К.Ю. Мурашов²**¹Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н. А. Шило ДВО РАН,
Магадан, Россия; e-mail: nsavva7803@mail.ru²Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН,
Москва, Россия; e-mail: tma2105@mail.ru

Поступила в редакцию 10 октября 2025 г.

Впервые детально изучены минералого-геохимические особенности руд месторождения олова Солнечное (Омсукчанский район, Магаданская область), локализованного в ближнем эндоконтакте Лево-Омсукчанского лейкогранитового массива. Показано, что граниты омсукчанского комплекса, относимые к А-типу и известные как оловоносные, в условиях Балыгычано-Сугойского континентального рифта приобретают высокие содержания K_2O (более 4 %) и Na_2O (более 3 %), характерные для порфировых интрузий с Cu-специализацией. В рудах месторождения установлены высокие концентрации Cu и широкий спектр медных минералов: халькоцит, ковеллин, халькопирит, станнин, гирит, бурнонит, куприт, люционит (Cu_3AsS_4) – типичный минерал медно-порфировой системы. Присутствуют собственные минералы Bi (висмутин, самородный висмут, галеновисмутит) и Bi-содержащий галенит с концентрацией висмута до 4.5 мас %. Исследования методом ИСП-МС показали, что руды обогащены достаточно широким спектром микроэлементов (по величине коэффициента обогащения): As, Bi, Ag, Au, Sb, Pb, In, Cd, Cu, W, Sc, Sn, Zn, Y, Be, Mo, Li, REE, U, Co. Коэффициенты обогащения варьируют от нескольких (Y, Be, Mo, Li, REE, U, Co) – до десятков (W, Sc, Sn, Zn), сотен (Sb, Pb, In, Cd, Cu) и тысяч (As, Bi, Ag, Au) раз. Содержание меди изменяется от 0.001 до 0.8 %, золота – от 1.26 до 6.84 г/т. ΣREE колеблется от 101.9 до 424.29 г/т, в среднем – 237.2 г/т. Распределение REE аналогично таковому в лейкогранитах омсукчанского комплекса и характеризуется близкой к горизонтальной конфигурацией спектра, в тяжелой его части ($La_N/Yb_N = 0.61–6.84$), и глубоким, ярко выраженным отрицательным Eu-минимумом ($Eu/Eu^* = 0.23–0.52$). Это указывает на унаследованный характер накопления, REE в рудах от вмещающих пород. Индикаторные показатели Ce/Ce^* (0.72–1.19) и Eu/Eu^* (0.23–0.52) обычны для окислительных условий при рудообразовании. Высказано предположение о том, что в Балыгычано-Сугойском незавершенном рифте в ходе формирования вулканоплутонических комплексов происходили процессы гибридизации, смешения расплавов. Большое влияние на состав лево-омсукчанских лейкогранитов могли оказать аскольдинские ультракалийевые риолиты, обогатившие граниты K_2O и Na_2O , а также гранитоиды наяханского комплекса и глубинные гипербазиты из основания рифта со специфическим для них медным геохимическим профилем как дополнительный источник Cu. Таким образом создавались условия для образования медно-порфировой минерализации. Приведенная в статье информация имеет большое практическое значение для региональных прогнозно-металлогенических построений.

Ключевые слова: полиметаллическая минерализация, порфировая система, рудопроявление Солнечное, лейкограниты, Лево-Омсукчанский массив, Балыгычано-Сугойский континентальный рифт, Северо-Восток России.

*По мнению рецензента и членов редколлегии материал весьма интересный – это новый поворот в изучении металлогении данного района.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы на территории Магаданской области проводятся прогнозно-поисковые работы, направленные на открытие крупного медно-порфирового месторождения [3]. Работы сосредоточены в пределах Ольского района. Перспективные площади и объекты на этот тип оруденения известны и в других районах области.

Лейкограниты омсукчанского комплекса ранее относились к оловоносным [7, 18]. К интрузивным массивам этого комплекса в пределах Балыгычано-Сугойского вулканогенного (рифтогенного) прогиба Охотско-Чукотского вулканического пояса (ОЧВП) приурочены многочисленные месторождения олова (рис. 1).

В настоящей статье рассмотрен потенциал лево-омсукчанских гранитоидов на медное оруденение на примере месторождения Солнечное, которое расположено в 24 км к западу от районного центра пос. Омсукчан, на левобережье р. Сугой в приустьевой части одноименного ручья (рис. 1, рис. 2). Нами впервые проведено детальное изучение вещественного и химического состава руд месторождения, которое показало существенное содержание в них Cu и широкое развитие медной минерализации.

Месторождение Солнечное открыто в 1955 г. В.Л. Кузнецовой. Запасы олова по состоянию на 1 января 1964 г. подсчитаны по категории C_1 и составляют 117 т [7]. В непосредственной близости от него находится мелкое оловорудное месторождение Бастой (рис. 1). Кроме того, недалеко находится среднее по масштабу месторождение Индустриальное.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Минералогия руд изучалась в аншлифах на микроскопе AXIOPLAN Imaging. Химический состав определялся в аналитическом центре СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан, на электронно-зондовых микроанализаторах Camebax (аналитики Е.М. Горячева, Т.В. Субботникова) и QemScan (EVO50) с системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Quantax Esprit (аналитик О.Т. Соцкая).

В аналитическом центре коллективного пользования ИГЕМ РАН выполнено определение концентрации породообразующих и отдельных примесных элементов методом РФА на вакуумном спектрометре, модель Axios mAX производства компании PANalytical (аналитик А.И. Якушев).

Измерения микроэлементов ИСП-МС (ICP-MS) проводили на масс-спектрометре с ионизацией в индуктивно-связанной плазме X-Series II (аналитик Я.В. Бычкова). Пределы обнаружения элементов составля-

ли от 0.1 нг/г для тяжелых и средних по массе элементов с возрастанием до 1 нг/г для легких элементов. Золото в пробах определялось методом атомно-абсорбционной спектрометрии с электротермической атомизацией на спектрометре Spectr AA220Z (аналитик В.А. Сычкова).

ПОЛОЖЕНИЕ В РЕГИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУРАХ

Балыгычано-Сугойский рифт [17], раннее название которого – Омсукчанская впадина [24] или Балыгычано-Сугойский прогиб [13], вдоль которого сосредоточены месторождения и рудопроявления серебра, а также олова и полиметаллов, – крупная региональная геологическая структура, сформированная в ранне-позднеюрско-меловое время по субмеридиональным глубинным разломам и наложенная на складчатые осадочные толщи верхоянского комплекса. Рифтогенная природа прогиба подтверждается контрастностью раннемеловых магматических образований, преимущественно риолит-базальтового состава с резко выраженным ультракалиевым профилем кислых разновидностей.

Балыгычано-Сугойский рифт имеет осевую зону, по особенностям строения и развития сходную со срединно-океаническими зонами спрединга [25]. При этом, указанный автор подчеркивает, что в условиях сжатия литосферы формировались декомпрессионные криптозоны, благоприятные для проявления интенсивного интрузивного магматизма, параллельные структурам сжатия рифтов, которые фиксируются выходами на поверхность протяженных поясов меловых интрузий. Рифт заполнен мощной нижнемеловой континентальной вулканогенно-осадочной угленосной молассой, несогласно перекрытой верхнемеловыми вулканическими покровами. В основании его развиты дислоцированные триасово-юрские терригенные толщи. С западной стороны он отделен меридиональным глубинным разломом, хорошо выраженным в рельефе и четко фиксируемым по геофизическим и геологическим данным. В восточном направлении происходит резкое погружение пермско-мезозойских формаций под молассовые толщи прогиба и вулканогенные образования Охотско-Чукотского вулканогенного пояса.

По данным МОВ-ОГТ (профиль «2-ДВ»), земная кора под Балыгычано-Сугойской структурой имеет аномальное строение. На расстоянии 30–40 км вдоль профиля отчетливые сейсмические отражения установлены только до глубины 7 км от поверхности, а ниже следует зона сейсмической «прозрачности», которая прослеживается не менее чем на 30 км до мантии с разрывом границы М [5, 17]. Металлогения континентального Балыгычано-Сугойского (Омсукчанского) незавершенного рифта отличается боль-

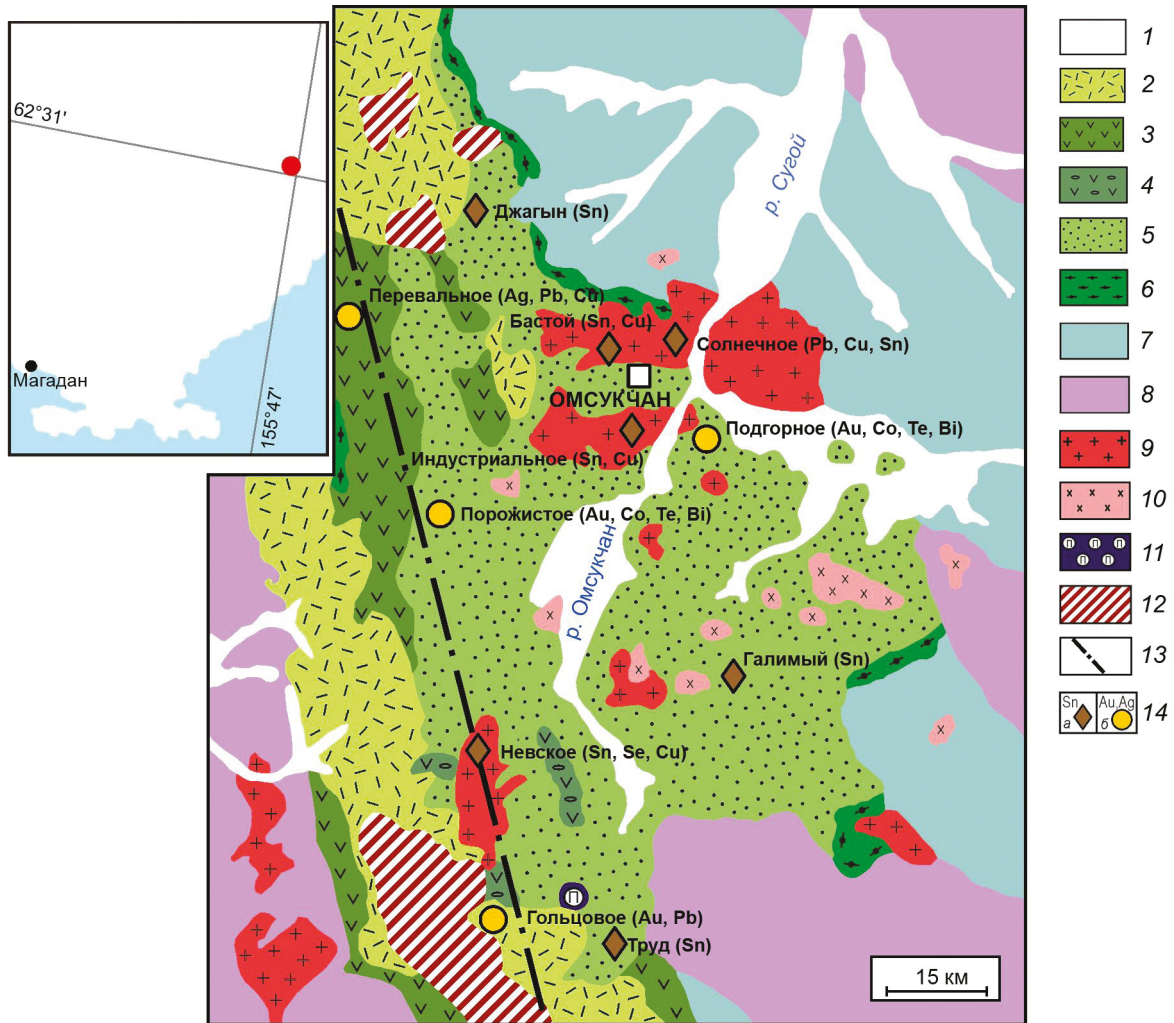


Рис. 1. Геологическое строение южной части Балыгычано-Сугойского рифта, по [8, 26], с дополнениями.

1 – четвертичные отложения. Меловая система: 2 – верхний отдел, шороховская свита (риолиты, их туфы и игнимбриты), 3 – нижний и верхний отделы, каховская свита (андезиты, дациты и их туфы); 4–6 – нижний отдел; омсукчанская серия: 4 – зоринская свита (конгломераты, вулканогенная моласса), 5 – топтанская, айгурская, галимовская, уликская свиты (угленосная моласса), 6 – аскольдинская свита (ультракислые риолиты); 7 – юрская система: песчаники, алевролиты, аргиллиты; 8 – триасовая система: алевролиты, песчано-глинистые сланцы, прослой ракушечников, туффитов, туфов андезитов. Магматические породы: 9 – позднемеловые биотитовые граниты и лейкограниты (омсукчанский комплекс); 10 – ранне-позднемеловые биотитово-рогообманковые гранодиориты, кварцевые диориты, диориты (быстринский комплекс); 11 – меловые перидотиты караганского штока; 12 – субвулканические риолиты и невадиты (шороховский комплекс); 13 – ось Балыгычано-Сугойской рифтогенной структуры; 14 – месторождения олова (а), Au-Te-Vi (б). На врезке – географическое положение месторождения Солнечное.

шим разнообразием различных типов месторождений и рудопроявлений, среди них весьма распространенными можно считать Sn, W, Co, Au-Ag, Ag-Pb-Zn [13, 14, 18–20].

Формирование оловянного оруденения происходило в кампане и связано с внедрением лейкогранитов омсукчанского комплекса и образованием массивов Лево-Омсукчанский, Невский, Пестринский, Егорлыкский, Марат, а также Маякского [9, 14]. Возраст гранитов Лево-Омсукчанского массива – 81.69 ± 0.81 млн лет [8].

ЛЕВО-ОМСУКЧАНСКИЙ ЛЕЙКОГРАНИТОВЫЙ МАССИВ

Лево-Омсукчанский массив находится на левом и правом берегу р. Сугой в районе приустьевой части р. Омсукчан. Структурно приурочен к сочленению Балыгычано-Сугойского рифта и Насучанского синклиория. Плутон обнажен в виде нескольких куполовидных выступов, отражающих сложную поверхность кровли интрузива [9]. В апикальных частях Лево-Омсукчанского массива встречаются ксенолиты и пластовые залежи гибридных пород, состав кото-



Рис. 2. Отвалы горных выработок на месторождении Солнечное (г. Дракон, р. Сугой), наверху – зубчатые останцы гранитных скал.

Таблица 1. Химический состав лейкогранитов омсукчанского комплекса, мас. %.

	Омсукчанский интрузивный комплекс								
	Массив Невский			Лево-Омсукчанский массив					
	НВ-1	НВ-2	НВ-3	СЛ-1	БС-1	БС-8	ИНД-12	СЛ-67а	Ливач
SiO ₂	75.27	75.40	75.52	74.90	75.51	72.68	75.87	75.59	75.70
TiO ₂	0.14	0.15	0.14	0.29	0.18	0.11	0.16	0.27	0.14
Al ₂ O ₃	12.85	12.75	12.94	12.25	12.48	11.46	12.21	12.22	12.70
Fe ₂ O ₃ общ	1.85	1.74	1.58	2.77	1.97	6.66	2.09	2.41	1.73
MnO	0.3	0.3	0.3	0.05	0.03	0.09	0.02	0.044	0.03
MgO	0.17	0.20	0.18	0.36	0.23	0.19	0.19	0.25	0.32
CaO	0.94	1.06	1.04	1.11	0.05	1.09	0.79	0.89	0.70
Na ₂ O	3.37	3.52	3.53	3.44	3.23	1.70	3.24	3.28	3.33
K ₂ O	4.72	4.30	4.41	4.47	4.59	4.56	4.85	4.59	4.21
P ₂ O ₅	0.3	0.3	0.4	0.07	0.04	0.03	0.04	0.07	–
Сумма*	100.01	99.99	100.00	100.01	100.00	100.00	100.00	100.0	99.93
Na ₂ O+K ₂ O	8.09	7.82	7.94	7.91	7.82	6.26	8.09	7.87	7.54
Na ₂ O/K ₂ O	0.783	0.819	0.800	0.770	0.704	0.373	0.668	0.715	0.791

Примечание. Граниты Невского массива (месторождение Невское – НВ 1–3); граниты Лево-Омсукчанского массива (месторождения: Солнечное – СЛ-1, СЛ-67а; Бастой – БС-1, БС-8, Индустриальное – ИНД-12); последний анализ из работы [14].

рых зависит от первичного состава переработанных пород. Вмещающие осадочные отложения превращены в биотитовые роговики. Ширина зоны интенсивного ороговикования составляет от десятков метров до 120 м и зависит от угла наклона контактов, общая ширина зоны контактово-метаморфизованных пород достигает 500 м, на отдельных участках – до 2 км.

Лейкограниты главной фазы крупно- и среднезернистые, реже мелкозернистые. Крупнозернистые лейкограниты отмечаются в центральных частях массива, преобладают в восточной. Среднезернистые разновидности приурочены к западным выступам плутона. Мелкозернистые лейкограниты встречаются на контактах с роговиками. Согласно А.А. Соболеву [21], породы состоят (%) из олигоклаза до альбита в оторочках зерен (в среднем по 97 шлифам – 18.7), микроклина или анортоклаза (43.5), кварца (34.5), буровато-зеленого или бурого биотита (2.7),

акцессорных (0.6) – магнетита, циркона, ортита, флюорита, более редких апатита, циртолита, ксенотима, ильменита, турмалина, калитерита, ураноторита. Структура – мелко- и среднезернистая, вторичные минералы – хлорит, серицит, кварц. По комплексу признаков их можно отнести к адакитовому типу (высококалийевому и высококремнистому). Их формирование предположительно связано с плавлением 10 % гранатового амфиболита субдуцируемой океанической коры. К ним приурочено и касситерит-силикатное оруденение.

Особенностью состава практически всех оловянных гранитов Балыгычано-Сугойского прогиба является высокое содержание K₂O+Na₂O (табл. 1, рис. 3), а в геохимическом плане оловянные руды нередко содержат повышенное количество Си. Яркие вторичные минералы меди в оловянных рудах отмечены на месторождениях Невское, Бастой и др. (рис. 4).

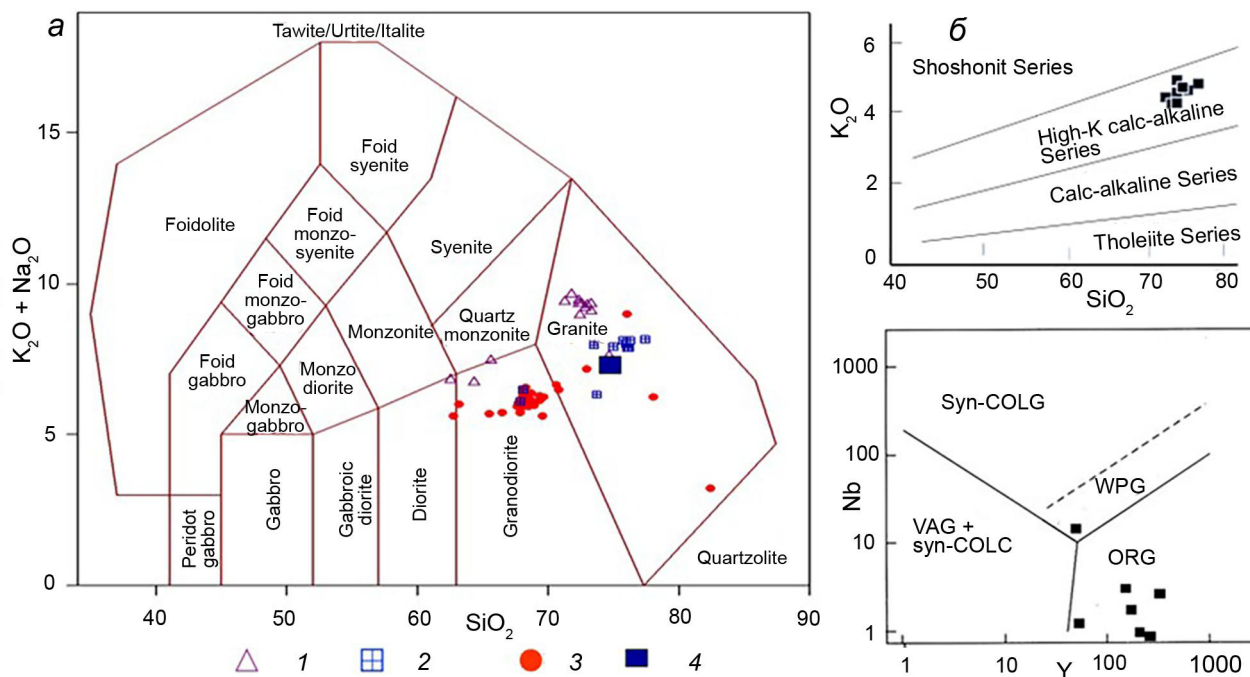


Рис. 3. Особенности состава гранитов омсукчанского комплекса.

a – Классификационная диаграмма изверженных пород [29] в сравнительном плане: 1 – монзонитоиды на площади месторождения Халали Au-Te-Bi; 2 – оловоносные граниты Омсукчанского рифта; 3 – гранитоиды Средненского Cu-порфирового массива; 4 – гранитоиды Лево-Омсукчанского массива (месторождение Солнечное). *б* – соотношение K_2O/SiO_2 в магматических породах омсукчанского комплекса, соответствующее известково-щелочной серии с высоким содержанием калия [32] и соотношение Y/Nb , указывающее на принадлежность гранитоидов к рифтогенной структуре [31]. ORG – граниты океанических хребтов, WPG – внутриплитные граниты, VAG – граниты вулканических дуг, Syn-COLG – коллизионные граниты.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ СОЛНЕЧНОЕ

Месторождение Солнечное локализовано в ближнем эндоконтакте Лево-Омсукчанско лейкогранитного массива. Лейкогранит сложен идиоморфными зернами плагиоклаза, ксеноморфными – калишпата, крупночешуйчатым биотитом и разнозернистым кварцем (рис. 5, *а-б*). В гранитах выявлены многочисленные жилы, представленные кварцем, хлоритом флюоритом и в меньшей степени турмалином. Одна из жил (мощностью до 3 м) детально разведана канавами и штольнями. Содержание олова в этой жиле варьирует от 0.4 до 14.52 % [9]. Простираение жилы северо-восточное ($75-90^\circ$), падение юго-восточное (угол $50-60^\circ$), длина по простиранию 500 м.

Лейкограниты в приальбандовых частях жил хлоритизированы, содержат вкрапленность калиевого полевого шпата, редкую вкрапленность турмалина, зона хлоритизации по периферии сменяется зоной каолинизации. Хлоритизация развивается по биотиту (рис. 5, *в*). В зоне выветривания аргиллизированные полевые шпаты разрушаются, а граниты приобретают охристый оттенок за счет ожелезнения гидроксидами Fe.

ТЕКСТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РУД

Текстуры руд месторождения Солнечное указывают на их образование в трещинах отрыва (рис. 6). В последних формировались преимущественно друзовые, кокардовые и брекчиевые текстуры, а в оперяющих трещинах – прожилковые. При выходе в роговики сульфидная минерализация выклинивается и образуются безрудные прожилки кварца с крстификационной текстурой (рис. 6, *е*). Друзовидная текстура встречается в прожилках позднего кварца и флюорите (рис. 6, *в*). Кокардовая текстура возникла в условиях растяжения, где вокруг крупных обломков катаклазированного флюорита отлагался кварц-сульфидный агрегат (рис. 6, *з*). В гидротермальных брекчиях отмечаются остроугольные обломки гранитов и роговиков, сцементированные разнозернистым кварцем (рис. 6, *жс*).

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ РУД

Из рудных минералов в жилах преобладают галенит, халькопирит, арсенопирит, реже встречается сфалерит. Касситерит в виде неравномерно рассеянной вкрапленности иногда образует гнездообразные скопления. Из вторичных минералов в основном

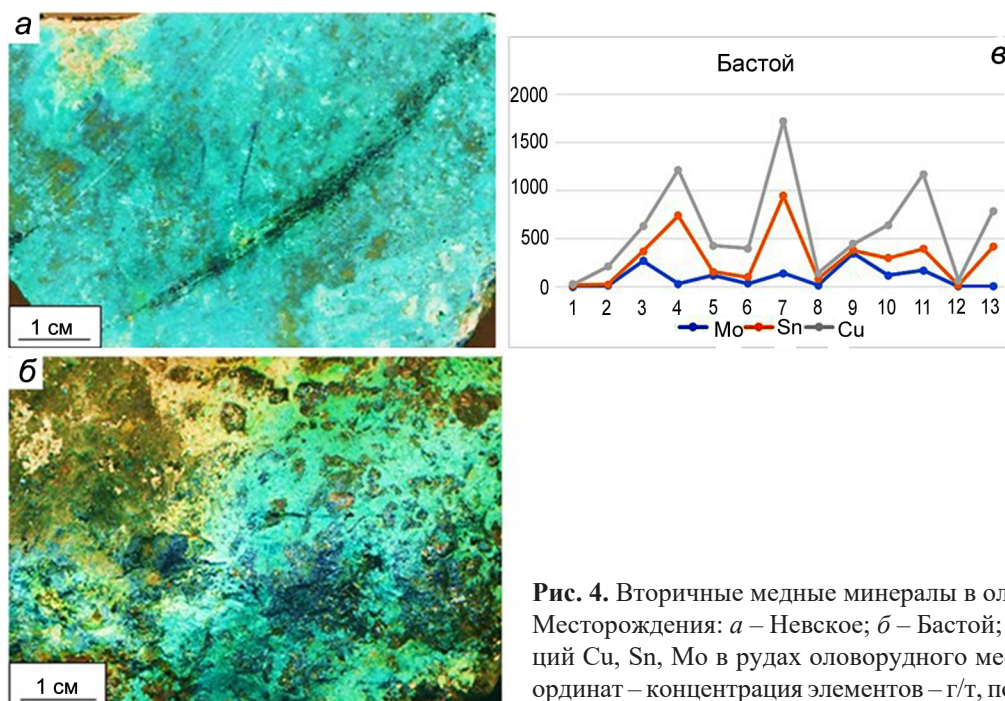


Рис. 4. Вторичные медные минералы в оловянных рудах. Месторождения: а – Невское; б – Бастой; в – соотношения концентраций Cu, Sn, Mo в рудах оловорудного месторождения Бастой (по оси ординат – концентрация элементов – г/т, по оси абсцисс – номера проб).

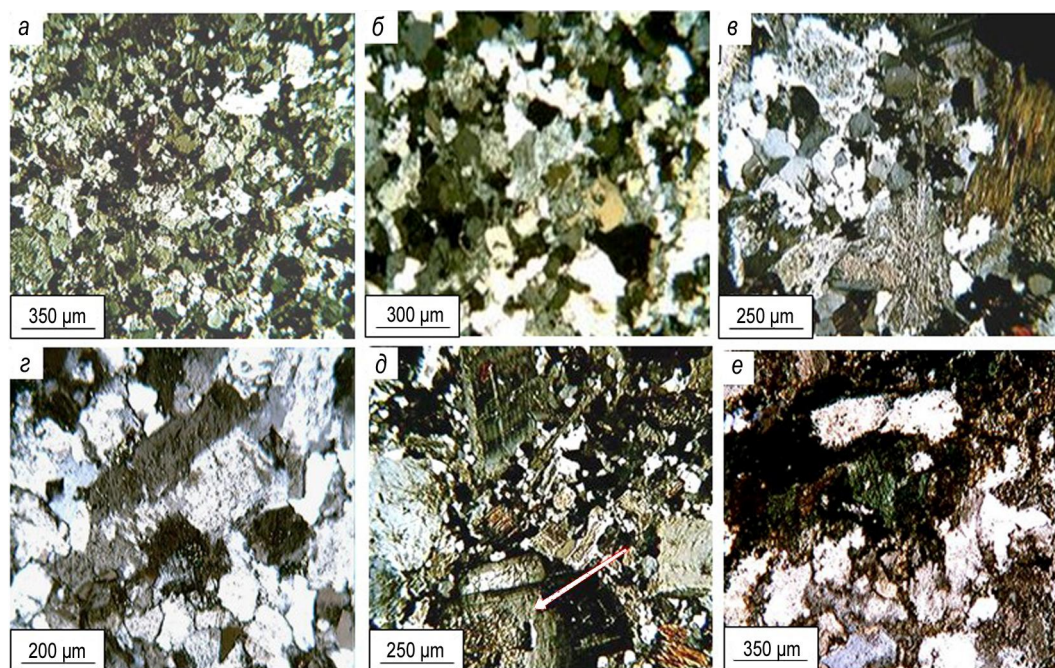


Рис. 5. Метасоматические околорудные изменения лейкогранитов, вмещающих месторождение Солнечное.

а–б – равномернозернистая структура гранитов; в – хлоритизация биотита (справа); г – окварцевание гранита; д – аргиллизация полевых шпатов (стрелка указывает на кристалл калишпата, замещенного каолинитом); е – развитие хлорита и гидроксидов железа по биотиту.

встречаются: гидроксиды Fe, ковеллин, англезит и скородит. Минеральный состав руд показан в табл. 2.

Кварц – наряду с флюоритом широко распространен в рудах месторождения Солнечное. Отчетливо выделяется две генерации кварца: кварц I – мелко-

и среднезернистый, светлосерый, полупрозрачный, цементирующий гидротермальные брекчии и слагающий матрицу для обособления рудных минералов, кварц II – крустификационный и друзовидный, слагающий прожилки 2–15 мм, он пересекает катаклази-

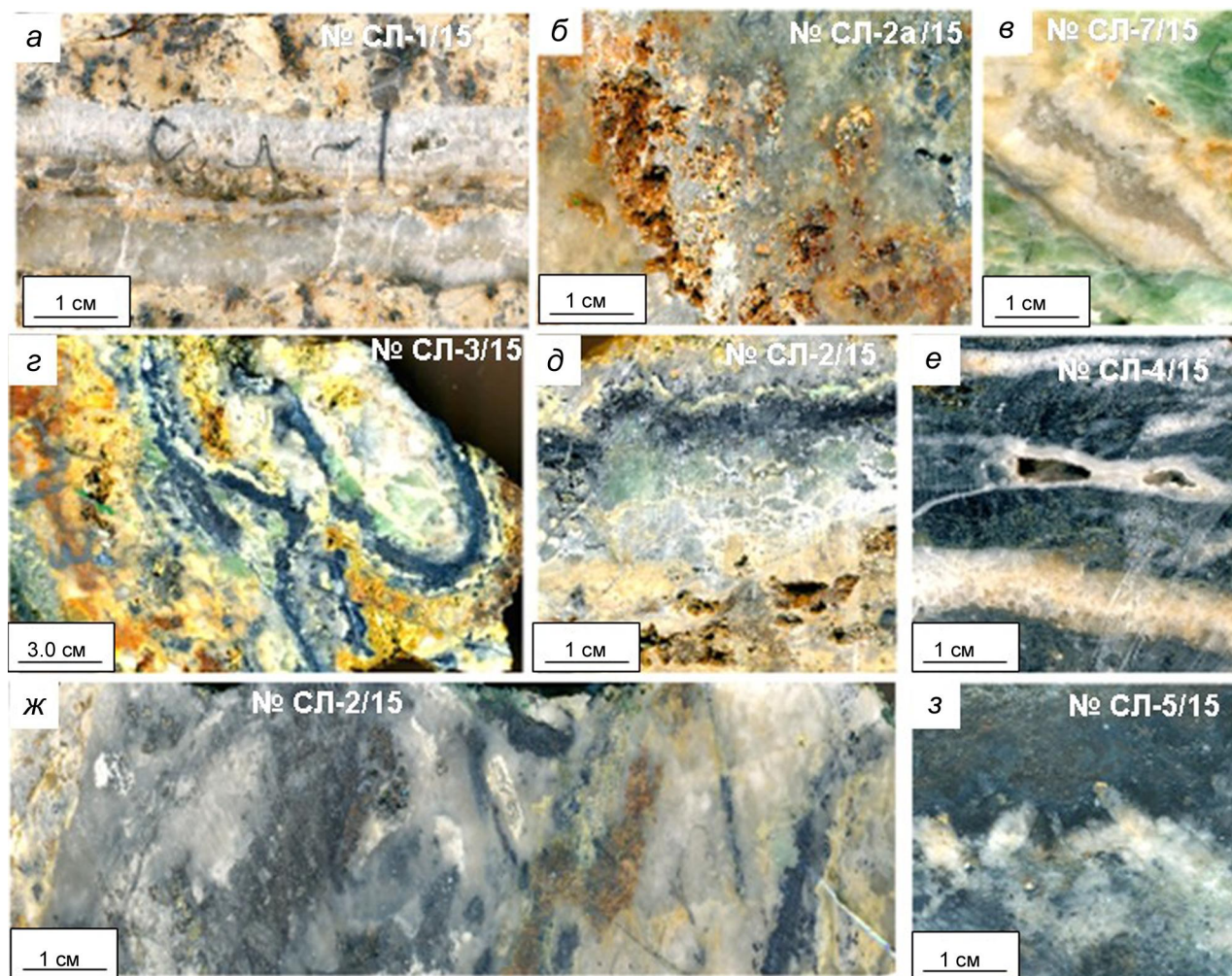


Рис. 6. Текстуры руд месторождения Солнечное.

а – прожилки кварца в опоярывающих жилу трещинах в граните; *б* – пятнистая текстура (фрагмент кварц-флюорит-сульфидной жилы, гранит катаклазированный и выветрелый); *в* – кварцевый прожилок во флюорите с друзовой текстурой; *з* – кокардовое обрастание обломка флюорита сульфидным агрегатом в граните; *д* – отложение сульфидного агрегата (темное на катаклазированном флюорите); *е* – прожилки кварца в роговике; *ж* – брекчиевая текстура – обломки метасоматически измененного гранита и роговиков в кварце; *з* – фрагмент кварцевого прожилка в роговике; в правом углу снимков – номера образцов.

рованный флюорит (рис. 6, *в*) и участвует в сложении прожилков, пересекающих роговики и метасоматически измененные граниты (рис. 6, *а*, *е*).

Флюорит – крупнокристаллический, ярко-зеленый, катаклазированный. Его выделения достигают 10–15 см в поперечнике. Предположительно, образовался раньше кварц-сульфидной ассоциации. Вокруг агрегатов катаклазированного флюорита образуются кокарды кварц-сульфидного агрегата (рис. 6, *з*). Также отмечается пересечение его кварцем II. Состав флюорита по данным рентгеноспектрального анализа: Са – 5.44 и F – 51.61 мас. %.

Галенит – слагает ксеноморфные обособления 0.1–1.5 см в кварце. Тесно сростается с халькопиритом, сфалеритом, халькопиритом, люцитом

(рис. 7, *а*, *з*). В составе галенита по данным рентгеноспектрального анализа отмечаются примеси Вi от 1.7 до 4.4 мас. %, Ag до 2 мас. %, вплоть до серебро-содержащего галеновисмутита (*шапбахита* $AgBiS_2 + PbS$) (табл. 3), с характерной пластинчатой отдельностью (рис. 7, *а*).

Сфалерит – образует ксеноморфные выделения размером до 0.7 мм. По составу отличается низкой и средней железистостью (0.5–4.5 мас. %). Сростается с галенитом и люцитом, содержит эмульсионную вкрапленность люцитом (рис. 7, *в*, *е*).

Арсенопирит – слагает агрегаты идиоморфных кристаллов (рис. 8, *з*) и образует идиоморфную вкрапленность в галените (рис. 7, *а–б*; рис. 8, *е*), а также корродирует галенит и сфалерит как более поздний

Таблица 2. Минеральный состав руд месторождения Солнечное.

Группы минералов	Главные	Второстепенные	Редкие
Жильно-метасоматические	Кварц Хлорит Флюорит	Турмалин Калишпат Рутил Барит	Мусковит Кальцит Каолинит
Рудные	Галенит Халькопирит Сфалерит Арсенопирит	Халькоцит Станнин Люцит Пирит Висмутин Галеновисмутит Касситерит	Гирит Шапбахит Бурнонит Куприт Ковеллин Геокронит Шеелит
Гипергенные	Скородит Англезит Ковеллин	Гидроксиды Fe Куприт	Хризоколла Азурит

Примечание. Жирным шрифтом выделены Cu-содержащие минералы.

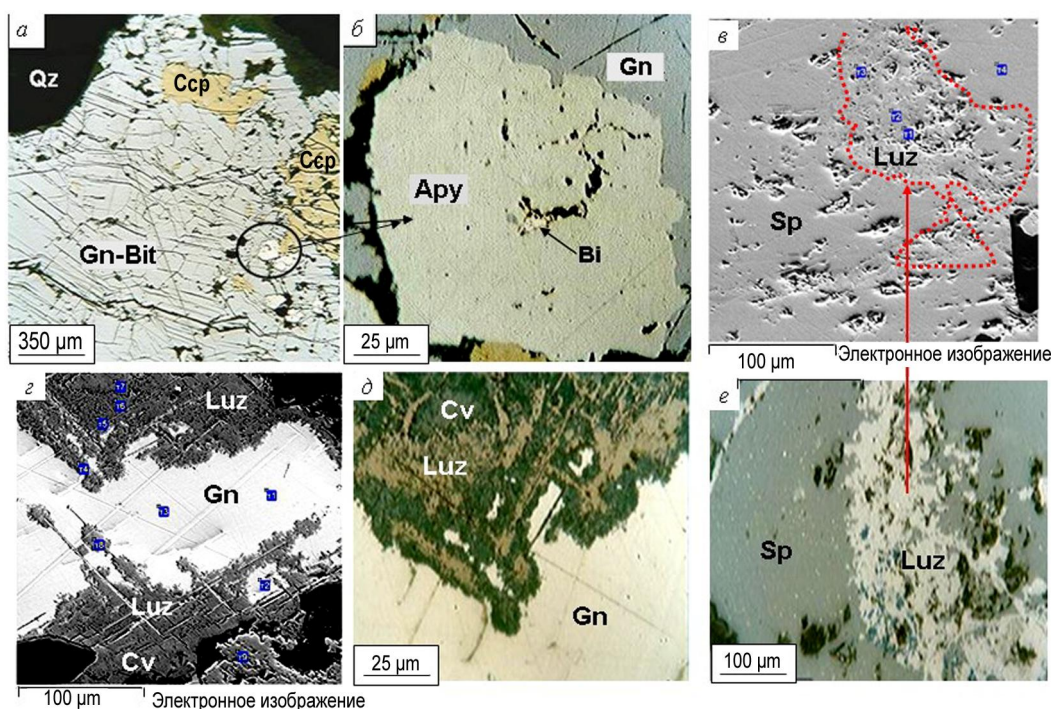


Рис. 7. Срастания рудных минералов месторождения Солнечное.

a – галеновисмутит (Gn-Bit) с включениями ксеноморфных выделений халькопирита (Ccp) и мелких идиоморфных кристаллов арсенопирита (Apy); *б* – фрагмент увеличенного кристалла арсенопирита (Apy) с микровключением самородного висмута (Bi); *в*, *е* – люцит (Luz) в сфалерите (Sp) (*в* – электронное изображение, *е* – оптическое); *г*–*д* – срастание галенита (Gn) с люцитом (Luz), на периферии люцита – гипергенный ковеллин (Cv) (*г* – электронное изображение, *д* – оптическое).

минерал по отношению к ним. Нередко внутри кристаллов арсенопирита содержатся включения висмута и висмутина (рис. 8, *е*), иногда ковеллина и люцитона. Для химического состава арсенопирита характерна постоянная примесь Sb (до 1.42 мас. %) (табл. 3). Это показано также на профиле, пройденном рентгеноспектральным микроанализатором, через кристалл арсенопирита (рис. 9).

Пирит – менее распространен в рудах. Он имеет идиоморфные очертания с кубическим габитусом кристаллов (рис. 8, *а*) и довольно крупные (до 1 мм) ксеноморфные обособления. Слагает отдельные вкрапления в кварце, срастается со сфалеритом и галенитом. Размеры кристаллов до 0.5 мм в поперечнике. По составу – стехиометричный (Fe – до 46.35 мас. %; S – до 53.65). При просмотре под микроскопом при

Таблица 3. Химический состав рудных минералов месторождения Солнечное, мас. %.

Концентрация элементов, мас. %						Формульные коэффициенты				
Fe	As	Sb	S		Σ	Fe	As	Sb	S	
Арсенопирит $FeAsS$										
35.69	42.2	1.42	21.75		101.06	0.09	0.9	0.02	1.09	
34.69	46.32	0	19.57		100.58	0.14	1.02		1.01	
34.87	42.9	1.07	20.36		99.21	0.13	0.95	0.01	1.05	
34.71	42.15	0.78	21.01		98.64	0.36	0.93	0.01	1.08	
35.52	41.54	0.00	22.05		99.11	0.40	0.89	0.00	1.10	
34.15	44.13	1.08	19.39		98.75	0.35	0.95	0.01	0.98	
34.47	43.44	1.34	19.8		99.05	0.32	0.94	0.02	1.00	
35.24	45.15	0.61	19.69		100.69	0.09	0.97	0.01	0.99	
Люцит Cu₃AsS₄										
	As	Cu	S		Σ		As	Cu	S	
	15.02	51.22	31.64		97.94		0.80	3.24	3.96	
	17.09	51.64	32.63		101.35		0.89	3.158	3.96	
Халькопирит CuFeS₂										
Cu	Fe	S			Σ		Fe	Cu	S	
30.39	34.76	34.86			100.01		1.138	0.874	1.99	
29.89	34.83	34.72			99.44		1.146	0.864	1.99	
Геокронит-иорданит- $Pb_9(Sb, As)_4S_{15}$ (с дефицитом S)										
	As	Sb	S	Pb	Σ	Cu	As	Sb	S	Pb
	12.33	4.31	14.31	70.44	101.66		4.67	1.00	12.7	9.65
	14.49	0.00	14.38	70.16	100.03		5.52		12.8	9.67
Гирит Cu₈S₅										
Fe	As	Cu	S		Σ	Fe	As	Cu	S	
3.97	1.15	69.43	22.93		98.18	0.488	0.11	7.499	4.91	
1.52	1.21	73.11	25.65		101.49	0.177	0.11	7.501	5.22	
Бурнонит $Pb_{0.98}(Cu_{1.03}, As_{0.08})S_{2.91}$ + Куприт Cu₂O (по сере)										
O	As	Cu	S	Pb	Σ	O	As	Cu	S	Pb
15.81	1.18	25.3	18.3	39.8	101.01		0.08	1+1.03	2.91	0.98
Галенит PbS										
	Ag	Bi	S	Pb	Σ	Fe	Ag	Bi	S	Pb
	2.05	4.10	13.18	80.54	99.86		0.045	0.05	0.46	0.93
	2.04	4.46	13.17	81.33	101.02		0.045	0.05	1.10	0.93
	1.79	3.28	12.72	79.5	97.29		0.041	0.04	1.01	0.94
	1.61	3.59	12.74	79.59	97.52		0.037	0.04	0.98	0.94
		3.68	12.74	79.62	96.05			0.04	0.97	0.96
		1.68	12.91	82.54	97.12			0.02	0.98	0.99
		2.06	13.17	81.61	96.85			0.02	0.98	0.97
		1.71	12.89	83.35	97.95			0.02	0.99	0.99
			12.61	84.74	97.35				1.00	1.02
Висмутин Bi₂S₃										
		80.01	17.52	2.44	99.97			2.03	2.9	0.06
		81.06	17.74	2.47	101.27			2.03	2.9	0.06
Галеновисмутит Pb (шапбахит?)(Ag, Cu, Bi)₂S₄ (нестехиометричный с дефицитом S)										
Cu	Ag	Bi	S	Pb	Σ	Cu	Ag	Bi	S	Pb
2.07	18.15	30.38	15.32	32.52	98.44	0.232	1.201	1.04	3.41	1.12
3.59	17.9	29.96	15.11	32.07	98.63	0.399	1.171	1.01	3.33	1.09
Ковеллин CuS										
Fe	Ag	Cu	S	As	Σ	Fe	Ag	Cu	S	As
1.42		64.86	31.46		98.47	0.025		1.007	0.97	
1.03		65.82	30.82		97.67	0.018		1.028	0.95	

Таблица 3. Окончание.

<i>Халькоцит Cu_2S</i>										
Fe	Ag	Cu	S	As	Σ	Fe	Ag	Cu	S	As
2.3	1.85	66.94	21.98	0.53	98.59	0.068	0.029	1.751	0.95	0.01
2.32	1.47	69.75	22.13	0.00	95.67	0.068	0.022	1.787	1.14	
0.52	2.28	73.01	22.76	0.05	98.63	0.015	0.034	1.824	1.12	

<i>Сфалерит ZnS</i>										
Cd	Cu	Fe	S	Zn	Σ	Cd	Cu	Fe	S	Zn
	2.9	4.3	32.6	59.25	99.05		0.045	0.075	0.99	0.89

* Красным цветом выделены названия минералов Cu.

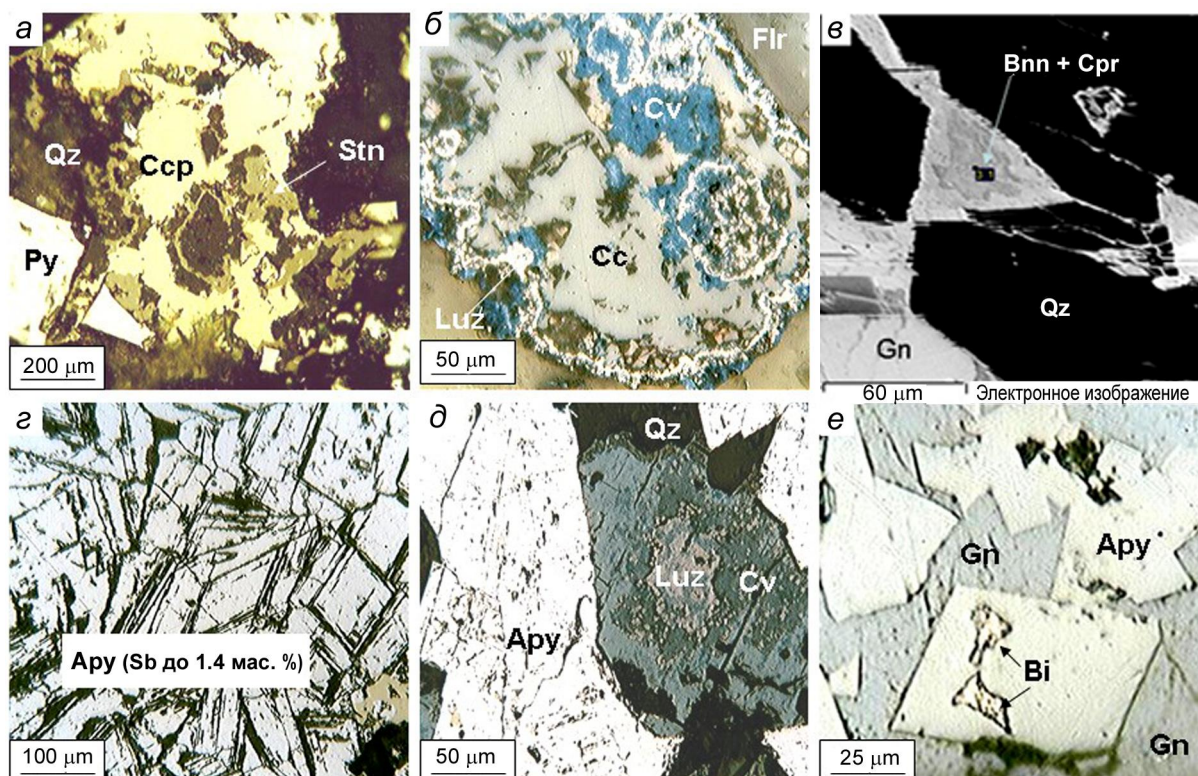


Рис. 8. Срастания рудных минералов.

a – идиоморфный кристалл пирита (Py) и срастание халькопирита (Ccp) со станнином (Stn) в кварце; *б* – выделение халькоцита (Cc) с каймой люконита (Luz) и включением ковеллина (Cv) во флюорите (Flr); *в* – выделение бурнонита и куприта (Bnn+Cpr) в срастании с галенитом (Gn) – электронное изображение; *з* – зернистый агрегат сурьмянистого арсенопирита (Apy); *д* – включение люконита (Luz) и ковеллина (Cv) между выделениями арсенопирита (Apy); *е* – кристаллы арсенопирита (Apy) в галените (Gn) с включениями самородного висмута (Bi).

высоком разрешении обнаруживает мелкие (0.01–0.10 мм) включения галенита.

Минералы меди

Халькопирит – слагает относительно крупные, до 1.5 см, ксеноморфные обособления (рис. 8, *a*) и срастается практически со всеми рудными минералами: галенитом, сфалеритом, станнином, пиритом и арсенопиритом. В галеновисмутите отмечаются гнездовые скопления халькопирита размером до 0.4 мм.

Халькопирит отличается чистотой состава и удовлетворительной стехиометрией (табл. 3).

Ковеллин – встречается как гипогенный, так и гипергенный в срастании со сфалеритом, люконитом, халькоцитом. Он часто образует гипергенные каймы на сфалерите, в состав которого не входит Cu, и на люконите (рис. 7, *з, д*). На воздухе при относительно недолгом хранении аншлифов образует на поверхности тонкие дендритовидные выделения

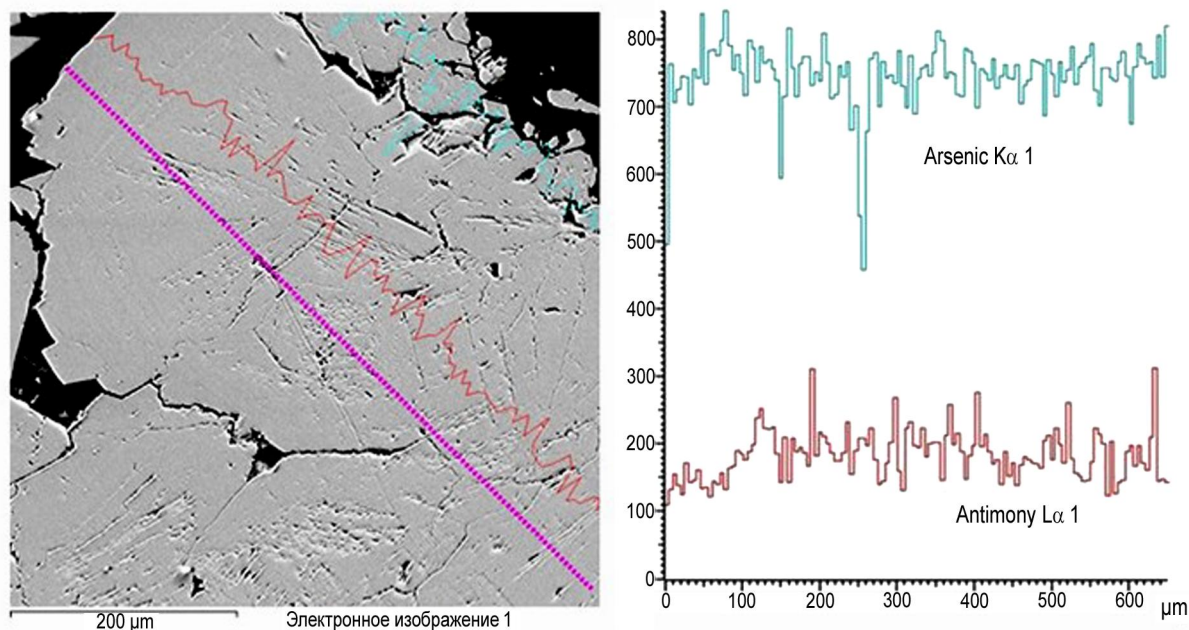


Рис. 9. Концентрационные кривые As и Sb на профиле, пройденном рентгеноспектральным микроанализатором через кристалл арсенопирита.

черного куприта. Размеры обособлений не более 0.7 мм. В своем составе постоянно содержит примесь Fe до 1.4 мас. % (табл. 3).

Халькоцит – широко распространен среди медных минералов, образует самостоятельные округлые ксеноморфные выделения размером до 0.5 мм с включениями ковеллина и тонкой каймой люцитита (рис. 8, б).

Люцитит – можно отнести к распространенным минералам в рудах. Он встречается повсеместно в виде небольших (до 0.7 мм) скоплений. Содержится в эмульсионной вкрапленности в сфалерите (рис. 7, в, е). Также образует каймы на халькоците, галените. Часто замещается гипергенным ковеллином.

Станнин – основной минерал олова в рудах. Постоянно сростается с халькопиритом (рис. 8, а). Размеры его выделений не превышают 0.7 мм. Иногда отмечаются ксеноморфные вросстки (0.1 мм) в галените.

Куприт – широко развит в зоне гипергенеза и часто образует дендритовидные выделения на поверхности аншлифов (при непродолжительном хранении) на халькоците и арсенопирите по краям зерен и по трещинам катаклаза в них.

Бурнонит – редко встречающийся минерал в рудах месторождения Солнечного и выявлен рентгеноспектральным анализом в ассоциации с гипогенным купритом в виде включения в галените (табл. 3, рис. 8, в).

Гирит – Cu_8S_5 , редкий минерал. Установлен микрорентгеноспектральным анализом (табл. 3) в трещинах спайности в сфалерите.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУД

Геохимические особенности руд месторождения Солнечное были изучены в аналитическом центре ИГЕМ РАН методами РФА и ИСП-МС.

Результаты РФА показали (табл. 2), что в химическом составе изученных образцов SiO_2 варьирует от 12.53 до 75.59 %, Al_2O_3 (от 0.19 до 12.22), Fe_2O_3 (от 2.41 до 15.49), CaO (от 0.55 до 83.56), Na_2O (от 0.1 до 3.28), K_2O (от 0.1 до 4.59), S (от 0.02 до 4.59). Такой широкий спектр изменений химического состава (табл. 4) изученных образцов, весьма вероятно, связан с гидротермальным околорудным метасоматозом (безрентгенизацией) и рудообразованием.

Отметим, что только химический состав образца № СЛ-1/15 (табл. 4) (безрудный метасоматит по граниту (рис. 6, а)), аналогичен составу вмещающих лейкогранитов Лево-Омсукчанского массива (табл. 1); высокие содержания CaO связаны с заметными концентрациями кальцита и сидерита. Количество последнего, по-видимому, обусловило содержание Fe_2O_3 , а содержание серы коррелирует с количеством сульфидной минерализации (табл. 4).

Распределение основных микроэлементов и REE в изученных образцах с рудной минерализацией приведены в таблице 5 и показаны на диаграммах (рис. 10, 11), где они нормированы по отношению к средним значениям для верхней коры [23] и хондриту [28], соответственно.

Таблица 4. Химический состав (мас. %) изученных образцов рудопроявления Солнечное.

№ образца	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	п.п.п.	Σ
СЛ-1/15*	75.59	0.27	12.22	2.41	0.04	0.25	0.89	3.28	4.59	0.07	<0.02	0.24	99.85
СЛ-2/15	63.13	<0.02	0.33	4.98	0.01	<0.10	8.04	<0.10	<0.10	0.02	3.24	5.99	82.5
СЛ-3/15	76.01	0.03	1.26	2.71	0.01	<0.10	1.97	0.3	0.42	0.02	4.59	3.85	86.58
СЛ-4/15	56.68	0.02	0.25	5.54	0.01	<0.10	8.06	<0.10	<0.10	0.02	2.74	8.04	78.62
СЛ-5/15	67.7	0.1	7.36	15.49	0.04	<0.10	0.58	0.48	0.39	0.28	0.18	2.65	95.07
СЛ-6/15	68.18	0.08	8.1	15.02	0.15	0.19	0.55	0.44	0.4	0.3	0.25	2.38	95.79
СЛ-7/15	12.53	<0.02	0.19	1.37	0.01	<0.10	83.56	0.11	<0.10	0.03	0.12	0.3	98.1

Примечание. Аналитический центр коллективного пользования ИГЕМ РАН, данные РФА (аналитик А.И. Якушев); * – только отмеченный образец соответствует граниту, остальные образцы из оруденелых гранитов (см. рис. 6).

Исследования методом ИСП-МС показали (рис. 10), что изученные образцы относительно верхней коры [23] обогащены достаточно широким спектром микроэлементов (по величине коэффициента обогащения): As, Bi, Ag, Au, Sb, Pb, In, Cd, Cu, W, Sc, Sn, Zn, Y, Be, Mo, Li, REE, U, Co (табл. 5, рис. 10). Коэффициенты обогащения варьируют от нескольких (Y, Be, Mo, Li, REE, U, Co) – до десятков (W, Sc, Sn, Zn), сотен (Sb, Pb, In, Cd, Cu) и тысяч (As, Bi, Ag, Au) раз (рис. 10).

В изученных образцах ΣREE варьирует от 101.9 до 424.29 г/т, в среднем – 237.2 г/т (табл. 5). Большая часть образцов явно обогащена LREE по сравнению с HREE (ΣLREE/ΣHREE варьирует от 1.83 до 8.91), и только в одном образце (№ СЛ-6/15) отношение обратное – ΣLREE/ΣHREE = 0.78 (табл. 5).

Легкие REE при повышении давления переходят в водный флюид, а тяжелые удерживаются в магме, что позволяет считать первые «гидрофильными», а вторые «магмафильными» элементами [11]. Таким образом, в большинстве изученных образцов преобладают гидрофильные REE, и только в одном – магмафильные (табл. 5).

Как показано в таблице 5, в большинстве образцов преобладают лантаноиды «цериевой» группы, и только в одном – REE «иттриевой группы» [16]. Нормированные на хондрит REE образуют пологие (близ хондритовые) спектры с заметным Eu минимумом (рис. 11).

Значения Ce/Ce* находятся в интервале от слабо отрицательных до умеренно положительных (от 0.72 до 1.19), а значения Eu/Eu* изменяются от 0.23 до 0.52 (табл. 5).

Таким образом, сочетание Ce/Ce* и Eu/Eu* показывает, что при рудообразовании преобладали окислительные условия [6, 27]. Низкие Eu/Sm отношения в изученных рудах (табл. 3) указывают на рудообразование в верхнекоровом уровне [4].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Детальное исследование руд месторождения Солнечного показало, что его руды отличаются высокими концентрациями Cu. Среди минералов меди установлены: халькопирит, халькоцит, станнин, люцонит, гирит, бурнонит, куприт, ковеллин.

Последовательность образования минеральных ассоциаций на основании их взаимоотношений выглядит следующим образом: I стадия – карбонат-барит-флюоритовая (катаклаз) → II стадия – полисульфидная (пирит + галенит + сфалерит + люцонит + халькопирит + станнин + бурнонит + ковеллин + куприт) → III стадия – редкометалльная (галеновисмутит + шапбахит + арсенопирит + висмут самородный + висмутин). В зоне гипергенеза образуются сульфаты Zn, Pb и оксиды Fe, Cu. Широкое развитие флюорита, наряду с люцонитом, также можно рассматривать как индикаторный минерал медно-порфировых систем, так как для ряда гранитоидных образований характерны высокие концентрации, парциальные давления и фугитивности F, указывающие на открытость систем по фтору с участием трансмагматических флюидов [10, 22].

По данным ИСП-МС, руды обогащены достаточно широким спектром микроэлементов (по величине коэффициента обогащения): As, Bi, Ag, Au, Sb, Pb, In, Cd, Cu, W, Sc, Sn, Zn, Y, Be, Mo, Li, REE, U, Co. Коэффициенты обогащения варьируют от нескольких (Y, Be, Mo, Li, REE, U, Co) – до десятков (W, Sc, Sn, Zn), сотен (Sb, Pb, In, Cd, Cu) и тысяч (As, Bi, Ag, Au) раз. Содержание меди изменяется от 0.001 до 0.8 %, золота – от 1.26 до 6.84 г/т. ΣREE варьирует от 101.9 до 424.29 г/т, в среднем – 237.2 г/т.

Распределение REE аналогично таковому в лейкогранитах омсукчанского комплекса [17] и характеризуется близкой к горизонтальной конфигурацией спектра в тяжелой его части ($La_N/Yb_N = 0.61-6.84$) и глубоким, ярко выраженным отрицательным Eu-минимумом ($Eu/Eu^* = 0.23-0.52$), что указывает на уна-

Таблица 5. Элементный состав (г/т) изученных образцов руд и вмещающих пород.

№ пробы	СЛ-1/15	СЛ-2/15	СЛ-3/15	СЛ-4/15	СЛ-5/15	СЛ-6/15	СЛ-7/15
Au	1.70	1.27	1.26	<ПО	6.84	<ПО	<ПО
Ag	1.83	151.23	124.44	73.30	10.63	0.00	10.70
As	53.89	41795.12	18670.96	70621.59	17070.65	14881.06	4755.98
Sb	0.71	528.44	363.43	1106.86	23.93	20.98	137.11
Cu	12.88	4626.25	7934.31	8024.37	1034.40	2418.76	171.10
Pb	15.28	21828.86	26689.46	24901.71	563.57	228.01	1608.22
Zn	111.35	535.96	5874.12	639.11	225.13	178.86	6.04
Li	65.02	145.55	193.85	140.57	53.82	118.19	24.90
Be	5.61	5.99	3.25	1.35	15.64	61.20	0.44
Mn	343.09	18.69	29.31	9.94	222.48	1121.37	3.46
Ti	1639.90	17.70	89.67	11.63	395.14	409.58	<ПО
Sc	5.34	0.68	0.02	0.11	16.93	9.33	<ПО
V	13.68	0.53	0.02	<ПО	7.96	6.32	<ПО
Cr	<0.30	8.53	16.81	5.27	7.21	5.02	0.89
Co	1.61	12.45	52.67	43.06	51.72	78.84	3.28
Ni	1.57	1.21	1.09	0.92	0.86	2.18	1.06
Bi	0.30	912.41	589.58	383.63	2.16	1.17	227.10
Se	8.76	7.41	0.93	1.96	1.40	9.19	<ПО
Te	0.07	0.23	<ПО	0.05	0.08	0.15	<ПО
Ga	23.29	4.40	5.22	6.22	37.37	34.24	1.50
Rb	163.77	2.13	26.42	1.17	9.26	26.49	0.44
Sr	37.91	11.78	11.53	11.09	97.93	86.37	9.80
Y	33.55	211.49	38.73	134.92	121.00	397.33	222.44
Zr	64.68	33.38	20.92	46.75	30.72	21.51	3.37
Nb	19.64	0.04	0.72	<ПО	3.22	2.88	<ПО
Mo	5.70	3.57	2.09	2.55	18.79	14.11	1.01
Sn	12.69	44.08	10.57	71.08	54.91	125.64	2.12
Cd	0.43	12.82	40.82	27.75	3.79	0.85	0.10
In	0.15	26.48	13.04	50.65	2.76	2.44	1.50
Cs	12.21	0.79	1.40	0.81	0.89	2.10	0.17
Ba	450.35	<ПО	35.56	69.79	23.32	17.19	26.84
La	41.29	38.46	19.35	34.62	67.97	39.20	21.81
Ce	95.24	77.44	36.84	64.09	117.37	70.97	36.59
Pr	10.13	9.07	4.34	7.34	14.63	8.87	4.48
Nd	36.56	35.54	16.56	26.54	57.71	41.53	19.69
Sm	6.61	13.20	4.16	5.51	15.85	22.64	5.63
Eu	0.44	1.17	0.29	0.60	0.76	3.18	0.83
Gd	4.76	16.29	3.91	4.79	16.12	40.22	7.41
Tb	0.97	3.72	0.81	1.02	3.57	9.77	1.32
Dy	5.65	25.98	5.33	7.47	25.60	71.08	9.12
Ho	1.19	5.60	1.15	1.77	5.11	15.12	2.02
Er	3.40	17.30	3.57	5.72	14.93	44.23	5.92
Tm	0.59	2.87	0.58	0.89	2.50	7.03	0.80
Yb	4.16	20.50	4.35	6.30	17.70	44.00	5.32
Lu	0.63	3.16	0.67	1.00	3.11	6.43	0.80
Hf	2.54	<ПО	0.10	<ПО	0.64	0.44	<ПО
Ta	1.52	<ПО	0.00	<ПО	0.54	0.36	<ПО
W	19.18	166.77	88.61	56.80	162.89	331.40	148.43
Tl	1.36	0.78	1.11	0.75	0.30	0.40	0.12
Th	15.00	0.55	1.65	0.10	10.22	4.88	0.01
U	4.92	5.63	2.59	7.87	11.85	9.89	2.51
∑REE	211.61	270.31	101.90	167.64	362.96	424.29	121.72
∑LREE	190.26	174.89	81.53	138.69	274.30	186.40	89.03
∑HREE	21.35	95.42	20.37	28.95	88.65	237.88	32.70
∑LREE/∑HREE	8.91	1.83	4.00	4.79	3.09	0.78	2.72

Таблица 5. Окончание.

№ пробы	СЛ-1/15	СЛ-2/15	СЛ-3/15	СЛ-4/15	СЛ-5/15	СЛ-6/15	СЛ-7/15
Hf/Sm	0.38	-	0.03	-	0.04	0.02	-
Nb/La	0.48	0.00	0.04	-	0.05	0.07	-
Th/La	0.36	0.01	0.09	0.00	0.15	0.12	0.00
Y/Ho	28.10	37.75	33.77	76.31	23.68	26.27	110.14
U/Th	0.33	10.25	1.57	77.39	1.16	2.03	391.34
Rb/Sr	4.32	0.18	2.29	0.11	0.09	0.31	0.04
Co/Ni	1.03	10.33	48.41	46.61	60.08	36.20	3.10
Au/Ag	0.93	0.01	0.01	-	0.64	-	-
Eu/Eu*	0.32	0.34	0.31	0.44	0.23	0.43	0.52
Ce/Ce*	1.19	0.92	0.94	0.95	0.84	0.72	0.81
LaN/YbN	6.74	1.27	3.02	3.74	2.61	0.61	2.79
Σ Ce	183.21	160.51	77.09	132.58	257.69	160.58	82.57
Σ Y	19.62	65.97	15.63	21.15	67.02	162.02	26.32
Σ Sc	8.78	43.83	9.17	13.90	38.25	101.69	12.83
Eu/Sm	0.07	0.09	0.07	0.11	0.05	0.14	0.15

Примечание. Определение микроэлементов и REE методом плазменной масс-спектрометрии (ИСП-МС), аналитический центр коллективного пользования ИГЕМ РАН (аналитик Я.В. Бычкова). ПО – предел обнаружения, REE – РЗЭ; LREE – легкие РЗЭ; HREE – тяжелые РЗЭ; образец СЛ-1/15 соответствует граниту, остальные образцы из оруденелых гранитов.

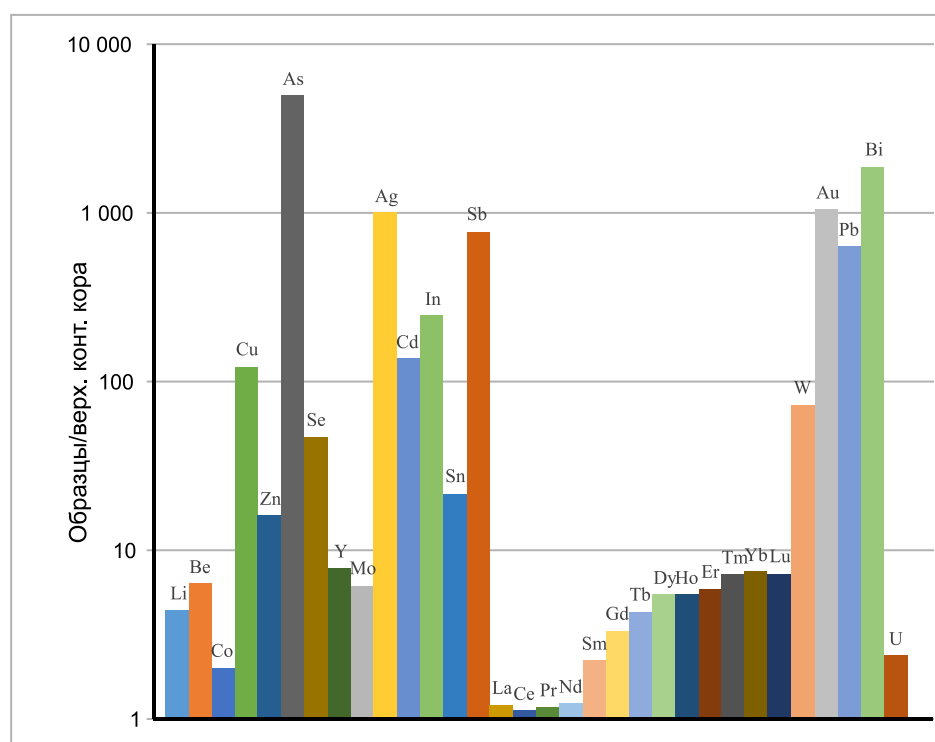


Рис. 10. Распределение основных микроэлементов (среднее по изученным образцам), нормированных по отношению к средним значениям для верхней коры [23]), в изученных образцах рудопроявления Солнечное.

следованный характер REE в рудах от вмещающих пород.

В связи с широким распространением медных минералов в рудах месторождения Солнечного и относительно высокими концентрациями Cu (достигает 0.8 %) необходимо обсудить потенциал Лево-Омсук-

чанских гранитов на медное оруденение. В рассмотрении этого вопроса включен ряд важных аспектов.

1. Лево-омсукчанские граниты входят в омсукчанский комплекс – представитель лейкогранитовой формации [12, 14], содержащей граниты А-типа [17]. Изучение особенностей химического состава тради-

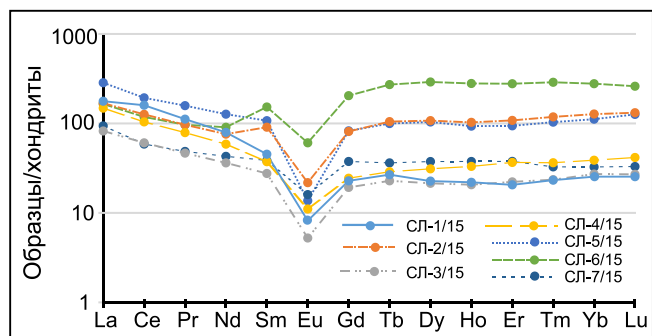


Рис. 11. Распределение REE, нормированных по хондриту [28], в изученных образцах рудопроявления Солнечное.

ционно оловоносных гранитоидов Лево-Омсу́кчанского массива, соответствующих А-типу гранитов, выявило их повышенную щелочность (таб. 1, рис. 1). Показано, что лейкограниты в условиях Балыгычано-Сугойского континентального рифта характеризуются высокими содержаниями K_2O (более 4 %) и Na_2O (более 3 %), типичными для порфировых интрузий с Si-специализацией.

2. Структурно массив приурочен к сочленению Балыгычано-Сугойского рифта и Насучанского синклинория. По данным А.Э. Ливача (2001 г.), структура лейкогранитов порфировидная, гранитовая, участками графическая. Вторичные минералы – хлорит, серицит, кварц. С этими породами, в указанном рифте, традиционно связывали месторождения олова касситерит-силикатной формации и при поисках на площади развития гранитов омсу́кчанского комплекса не придавали значения повышенным концентрациям сопутствующих олову металлов, привнос которых связан с циркуляцией гидротермальных флюидов, причем основными источниками этих металлов были магматические очаги, которые продуцировали рудоносные интрузивные и вулканогенные формации.

3. При рассмотрении источников вещества следует в первую очередь обратить внимание на то, что эффузивно-экструзивные комплексы и граниты омсу́кчанского комплекса представляют собой единую риолит-лейкогранитовую вулканоплутоническую ассоциацию [24]. Внедрение лейкогранитов омсу́кчанского комплекса происходило в кампане с образованием массивов Лево-Омсу́кчанский, Невский, Пестринский, Егорлыкский, Марат, Маяк по западному обрамлению Балыгычано-Сугойского рифта.

4. Возраст формирования поперечного к ОЧВП Балыгычано-Сугойского рифта предположительно раннемеловой (валанжин-готеривский), судя по воз-

расту риолитов аскольдинской свиты, выполняющей основание Омсу́кчанского прогиба [1]. Проведенное указанными авторами SHRIMP датирование гранитов массива Маяк показало 82.5 ± 2 млн лет [1], а гранитов Лево-Омсу́кчанского массива – 81.69 ± 0.81 млн лет [8].

5. В условиях незавершенного рифта при внедрении высокощелочных лейкогранитов омсу́кчанского комплекса (массивы Лево-Омсу́кчанский, Маяк, Невский и др.) в вулканоплутоническую ассоциацию могли быть вовлечены ультракалийевые риолиты аскольдинской свиты (K_2O – 6.44–7.97 мас. %), оказавшие влияние на высокую щелочность гранитного комплекса, а также Мо-порфировые гранодиориты наяханского комплекса, глубоко проникающие по разломам в структуры, перпендикулярные к простиранию ОЧВП, и их возраст – 84 ± 1 млн лет [2] близок к возрасту гранитов омсу́кчанской серии.

6. В основании рифта, по данным гравиметрических работ, предполагается наличие гипербазитов [24], для которых характерна медная геохимическая специализация. Взаимодействие с ними на глубоких горизонтах при внедрении гранитоидов омсу́кчанского комплекса могло привести к мобилизации, переносу и переотложению Cu. Не исключено влияние проникающих в глубь Балыгычано-Сугойского рифта гранитов наяханской серии – 84 ± 1 млн лет [2] – с Мо-порфировой специализацией. Важно, что объема гранитоидов Лево-Омсу́кчанского плутона вполне должно хватить для формирования продуктивной порфировой системы. По данным геофизических материалов, малоплотные граниты омсу́кчанского комплекса на глубине объединяются в обширные по площади плитообразные плутоны [13].

7. Таким образом, в Балыгычано-Сугойском рифте создавались условия для образования меднопорфировой системы комплексного типа, с возможным участием мантийного вещества. Подобные типы систем отличаются разнообразием сопряженного оруденения, включающим эпitherмальное золото-серебряное, серебро-медное (люционит-энаргитовое), и совмещаются с золото-висмут-теллуридными редкометалльными типами [15, 30].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые изучена минералогия руд месторождения Солнечного (Омсу́кчанский район), локализованного в ближнем эндоконтакте Лево-Омсу́кчанского гранитного массива. Установлена повышенная меденосность полиметаллических руд с широким проявлением люционитовой минерализации, а также флюорита – индикаторных минералов меднопорфировых систем. Показана повышенная щелочность гранитоидов.

Исследования методом ИСП-МС показали, что руды обогащены достаточно широким спектром микроэлементов (по величине коэффициента обогащения): As, Bi, Ag, Au, Sb, Pb, In, Cd, Cu, W, Sc, Sn, Zn, Y, Be, Mo, Li, REE, U, Co. Коэффициенты обогащения варьируют от нескольких (Y, Be, Mo, Li, REE, U, Co) – до десятков (W, Sc, Sn, Zn), сотен (Sb, Pb, In, Cd, Cu) и тысяч (As, Bi, Ag, Au) раз. Содержание меди изменяется от 0.001 до 0.8 %, золота – от 1.26 до 6.84 г/т. Σ REE колеблется от 101.9 до 424.29 г/т. в среднем – 237.2 г/т. Распределение REE аналогично таковому в лейкогранитах омсукчанского комплекса и характеризуется близкой к горизонтальной конфигурацией спектра в тяжелой его части ($LaN/YbN = 0.61–6.84$) и глубоким, ярко выраженным отрицательным Eu-минимумом ($Eu/Eu^* = 0.23–0.52$), что указывает на унаследованный характер накопления REE в рудах от вмещающих пород.

Высказано предположение о предпосылках для обнаружения комплексного типа медно-порфирового оруденения, связанного с Лево-Омсукчанским интрузивом. Полученная информация имеет большое практическое значение для региональных прогнозно-металлогенических построений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке тем Госзадания СВКНИИ ДВО РАН и ИГЕМ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акинин В.В., Миллер Э.Л. Эволюция известково-щелочных магм Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // *Петрология*. 2011. Т. 19, № 3. С. 249–290.
- Акинин В.В., Колова Е.Е., Савва Н.Е., Горячев Н.А., Маматюсупов В.Т., Кузнецов В.М., Альшевский А.В., Ползуненков Г.О. Возраст гранитоидов и ассоциирующего молибден-порфирового оруденения Коркодон-Наяханской зоны (Северо-Восток России) // *Вестн. Северо-Восточного научного центра ДВО РАН*. 2019. № 4. С. 3–8.
- Аленичева А.А., Касаткин Н.С., Юрченко Ю.Ю., Зубова Т.Н., Шатов В.В., Сергеев С.А. Выявление новых объектов, перспективных на молибден-медно-порфировое оруденение при создании Госгеолкарты-1000/3 на примере листов О-55, О-56 (Северное Приохотье, Магаданская область) // *Руды и металлы*. 2024. № 2. С. 5–27. DOI: 10.47765/0869-5997-2024-10006.
- Винокуров С.Ф. Европиевые аномалии в рудных месторождениях и их генетическое значение // *Докл. РАН*. 1996. Т. 346, № 6. С. 792–795.
- Горячев Н.А., Бялобжеский С.Г., Кузнецов В.М., Палымский Б.Ф., Фельдман Л.Л. Особенности глубинного строения окраинно-континентальных магматических дуг на примере Северного Приохотья // *Структура и строение земной коры Магаданского сектора России по геолого-геофизическим данным*. Новосибирск: Наука, 2007. С. 118–133.
- Горячев Н.А., Викентьева О.В., Бортников Н.С., Прокофьев В.Ю., Алпатов В.А., Голуб В.В. Наталкинское золоторудное месторождение мирового класса: распределение РЗЭ, флюидные включения. Стабильные изотопы кислорода и условия формирования руд (Северо-Восток России) // *Геология рудн. месторождений*. 2008. Т. 50, № 5. С. 414–444.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:200 000. Лист Р-56-ХVIII (Омсукчан). 2-ое изд. Сугойская серия. Объяснительная записка. М.: Недра, 1982. 92 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-56 – Сеймчан. (Объясн. зап.). СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. 426 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:200 000. Лист Р-56-ХVIII (Омсукчан). 2-ое изд. Сугойская серия (Объясн. зап.). М.: Недра, 2009. С. 88.
- Гусев А.И. Роль летучих компонентов в формировании различных типов эндогенного оруденения // *Современные наукоемкие технологии (раздел геолого-минералогические науки)*. 2013. № 2. С. 69–73.
- Жариков В.А., Горбачев Н.С., Латфутт П., Дохерти В. Распределение редкоземельных элементов и иттрия между флюидом и базальтовым расплавом при давлениях 1–12 кбар (по экспериментальным данным) // *Докл. АН*. 1999. Т. 366, № 2. С. 239–241.
- Жуланова И.Л., Русакова Т.Б., Котляр И.Н. Геохронология и геохронометрия эндогенных событий в мезозойской истории Северо-Востока Азии. М.: Наука, 2007. 358 с.
- Кузнецов В.М., Ливач А.Э. Строение и металлогеническое районирование Балыгычано-Сугойского прогиба // *Проблемы металлогении рудных районов Северо-Востока России*. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2005. С. 156–177.
- Ливач А.Э., Третьякова Н.И. Балыгычано-Сугойский рифт: строение, основные черты развития и металлогения // *Вестн. СВНЦ*. 2022. №2. С. 3–14.
- Мигачев И.Ф., Звездов В.С., Минина О.В. Формационные типы меднопорфировых месторождений и их рудно-магматические системы // *Отч. геология*. 2022. № 1. С. 26–48.
- Минеев Д.А. Лантаноиды в рудах редкоземельных и комплексных месторождений. М.: Наука, 1974. 237 с.
- Петрова М.Н., Петров С.Ю., Курапов М.Ю. Возраст и особенности состава интрузивных образований северной части Балыгычано-Сугойского рифтогенного прогиба (Северо-Восток России) // *Вестн. СПбГУ. Науки о Земле*. 2021. Т. 66, Вып. 3. С. 595–615. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2021.309>.
- Руб М.Г. Особенности вещественного состава и генезиса рудоносных вулканоплутонических комплексов. М.: Наука, 1967. 363 с.
- Савва Н.Е. Особенности металлогении континентального рифта на примере Дукацкого рудного района // *Проблемы металлогении рудных районов Северо-Востока России: Сборник научных трудов*. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН. 2005. С. 196–220.
- Савва Н.Е. Минералогия серебра Северо-Востока России. М.: Триумф, 2018. 544 с.
- Соболев А.П. Мезозойские гранитоиды Северо-Востока СССР и проблемы их рудоносности. М.: Наука, 1979. 180 с.
- Сотников В.И., Берзина А.Н. Режим хлора и фтора в медно-молибденовых рудно-магматических системах. СО

- РАН, Объед. ин-т геологии геофизики и минералогии. Новосибирск, 1993. 132 с.
23. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
 24. Умитбаев Р.Б. Охотско-Чаунская металлогеническая провинция (Строение, рудоносность, аналоги). М.: Наука, 1986. 288 с.
 25. Уткин В.П. Горст-аккреционные системы и рифтограбены // Тихоокеан. геология. 1996. № 6. С. 44–72.
 26. Филатов С.И. Некоторые особенности локализации оловянного оруденения в Оmsukчанском рудном районе // Новые данные по геологии рудных районов Востока СССР. М.: Наука, 1969. С. 103–113.
 27. Jones B., Manning D. A. Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones // Chem. Geol. 1994. V. 111. P. 111–129.
 28. McDonough W.F., Sun S.S. The Composition of the Earth // Chem. Geol. 1995. V. 120. P. 223–253.
 29. Middlemost E.A.K. Magmas and magmatic rocks. An introduction to igneous petrology. London. New York: Longman. 1985. 266 p.
 30. Migachev I. Complex ore nodes of marginal volcanoplutonic belts and their geological setting // Resource Geology Special Issue. 1993. N 15. P. 199–209.
 31. Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks // J. Petrology. 1984. V. 25 (4) P. 956–983.
 32. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of Eocene Calc Alkaline Volcanic Rocks from Kastamonu Area. Northern Turkey // Contribution to Mineralogy and Petrology. 1976. V. 58. P. 63–81.

Рекомендована к печати Н.А. Горячевым
после доработки 12.12.025 г.
принята к печати 16.01.2026 г.

ORE POTENTIAL OF OMSUKCHAN LEUCOGRANITES FORMED IN THE CONDITIONS OF THE BALYGYCHAN-SUGOY CONTINENTAL RIFT (NORTHEAST RUSSIA)

N.E. Savva^a, A.V. Volkov^b, A.E. Livach^a, K.Yu. Murashov^b

^a*Shilo North-East Interdisciplinary Research Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Magadan, Russia; e-mail: nsavva7803@mail.ru*

^b*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: tma2105@mail.ru*

Pioneer studies of ores from the Solnechnoe tin deposit (Omsukchan district, Magadan region) located near the endocontact of the Levo-Omsukchan leucogranite massif focused on their mineralogical and geochemical characteristics. Granites of the Omsukchan Complex classified as A-type and known as tin-bearing were shown to acquire high contents of K₂O (> 4 %) and Na₂O (> 3 %) under the conditions of the Balygychan-Sugoy continental rift, which are characteristic of porphyry intrusions specialized in Cu. High concentrations of Cu and a wide range of copper minerals were identified in ores of the deposit: chalcocite, covellite, chalcopyrite, stannite, gyrite, bournonite, cuprite, and luzonite (Cu₃AsS₄) – a typical mineral of the copper-porphyry system. Bismuth (Bi) minerals (bismuthinite, native bismuth, galenobismuthite) and Bi-bearing galena with a bismuth concentration up to 4.5 wt % are present. ICP-MS studies showed that the ores are enriched in a fairly wide range of trace elements (based on the enrichment factor): As, Bi, Ag, Au, Sb, Pb, In, Cd, Cu, W, Sc, Sn, Zn, Y, Be, Mo, Li, REE, U, Co. Enrichment factors vary from several (Y, Be, Mo, Li, REE, U, Co) to tens (W, Sc, Sn, Zn), hundreds (Sb, Pb, In, Cd, Cu) and thousands (As, Bi, Ag, Au) times. The copper content varies from 0.001 to 0.8%, and the gold content from 1.26 to 6.84 g/t. ΣREE ranges from 101.9 to 424.29 g/t, averaging 237.2 g/t. The REE distributions are similar to those in the leucogranites of the Omsukchan Complex and are characterized by a nearly horizontal spectrum configuration in its heavy part (LaN/YbN=0.61–6.84) and a deep trough at Eu (Eu/Eu* = 0.23–0.52). This indicates that the REE composition in the ores is inherited from the host rocks. Indicator values of Ce/Ce* (0.72–1.19) and Eu/Eu* (0.23–0.52) are typical of oxidizing conditions during mineralization process. It was proposed that hybridization and melt mixing occurred during the formation of volcanoplutonic complexes in the immature Balygychan-Sugoy rift. The composition of the Levo-Omsukchan leucogranites could have been significantly influenced by the Askoldin ultrapotassic rhyolites which enriched the granites in K₂O and Na₂O, as well as by the granitoids of the Nayakhan Complex and deep ultramafic rocks from the rift base, with their specific copper geochemical profile as an additional source of copper. Thus, this was how the stage was set for the formation of porphyry copper mineralization. The information presented in the paper has a great practical value for regional mineral prognostication.

Key words: polymetallic mineralization, porphyry system, Solnechnoe ore occurrence, leucogranites, Levo-Omsukchan massif, Balygychan-Sugoy continental rift, Northeast Russia.