

Геохимические критерии золотоносности первичных и окисленных руд Сохатиного месторождения (Северо-Восток России)

©2024 В. Г. Ворошилов✉, Т. В. Тимкин, Д. К. Молукпаева, О. В. Савинова

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
просп. Ленина, 30, 634050, Томск, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: Сохатиное золоторудное месторождение локализовано в протерозойских метаморфических толщах одного из блоков Приколымского террейна, где до недавнего времени золото добывалось только из россыпей. Разработка коренных месторождений начата в последние годы и многие вопросы их генезиса и критериев прогнозирования оруденения решены не в полной мере. Кроме того, Сохатиное месторождение по составу рудовмещающих пород, минералогии руд, их геохимическим особенностям и степени сохранности кор выветривания отличается от объектов-аналогов в регионе, что и определяет необходимость разработки критериев золотоносности первичных и окисленных руд.

Методика: для исследования состава руд и вмещающих пород использованы многоэлементный масс-спектрометрический анализ с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) и силикатный анализ методом плазменно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES). Состав первичных и окисленных рудных минералов изучался на электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 с энергодисперсионной приставкой фирмы «Oxford». Для исследования минералогии первичных и окисленных руд использован рентгеновский дифрактометр RIGAKU ULTIMA IV. Для оценки степени окисленности сульфидов выполнен фазовый анализ серы общей и серы сульфатной.

Результаты и обсуждение: в результате проведенных исследований установлен комплекс индикаторных элементов-спутников золотого оруденения, включающий Ag, Bi, Te, Pb, As, Cu, Se, W, Mo, Sb, Cd, Zn, Sn, Tl. Руды, образованные по мусковит-кварцевым и кварцево-эпидот-хлоритовым сланцам, существенно различаются между собой по содержаниям Pb, Zn, Cu, V, Mn, P, Co, Ni, Fe. При окислении руд происходит накопление Al_2O_3 , P_2O_5 , TiO_2 , Pb, Zn, Cd, As, Sb, Sn и вынос S, Cr. В зоне гипергенеза возрастает дисперсия содержаний Au, средняя проба самородного золота повышается с 744 ‰ до 858 ‰.

Выводы: элементы-индикаторы золотого оруденения формируют зонально построенные аномальные геохимические поля с концентрацией в рудных телах Au, Ag, As, Bi, Mo на фоне более обширных комплексных аномалий Pb, Cu, Te, Se, W, связанных с зонами березитов. Внешний контур рудных зон маркируется ассоциацией Be, Sb, Tl.

Ключевые слова: золоторудные месторождения, геохимические критерии, гипергенное золото, Приколымский террейн.

Источник финансирования: Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ. Проект № 24-27-00022.

Для цитирования: Ворошилов В. Г., Тимкин Т. В., Молукпаева Д. К., Савинова О. В. Геохимические критерии золотоносности первичных и окисленных руд Сохатиного месторождения (Северо-Восток России) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2024. № 4. С. 24-34. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/4/24-34>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Ворошилов Валерий Гаврилович, e-mail: v_g_v@tpu.ru

Введение

Сохатинское золоторудное месторождение расположено в пределах Приколымского террейна пассивной континентальной окраины и входит в состав Шаманихо-Столбовского рудно-россыпного района [1–3]. Выявленные в районе коренные месторождения и проявления золота (Надежда, Сохатинское, Глухаринское, Тый-Юрья, Темный и другие) приурочены к метаморфизованным протерозойским отложениям. В структурно-тектоническом плане все месторождения однотипны: оруденение приурочено к участкам сопряжения пологих надвигов с крутопадающими разрывами. Подобный контроль оруденения в целом характерен для метаморфитов зон мезозойской активизации северо-востока России и других регионов мира [4–8]. Специфической особенностью золотого оруденения Шаманихо-Столбовского района является локализация его только в породах определенного состава на каждом из объектов: на месторождении Надежда промышленное оруденение локализовано в кварцито-песчаниках, на Тый-Юрья – только в метариолитах, на рудопроявлении Темном – в доломитах, на Сохатинском месторождении – в переслаивающихся кварц-эпидот-хлоритовых и кварц-мусковитовых сланцах.

Район долгое время был источником россыпного золота, которого здесь добыто более 25 тонн. Коренные месторождения начали разрабатываться только в последние годы и закономерности размещения в них концентрированного оруденения пока в должной мере

не исследованы. Поскольку геохимические особенности руд в значительной степени определяются составом исходного субстрата, исследование геохимических критериев локализации оруденения на каждом из названных месторождений представляет собой самостоятельную и актуальную задачу.

Сохатинское месторождение локализовано в сохатинской толще раннепротерозойских метаморфических сланцев мусковит-кварцевого и кварцево-эпидот-хлоритового составов. В пределах месторождения породы подверглись интенсивному метасоматозу пропилит-березитового ряда с образованием кварцево-серицитовых, кварцево-серицит-карбонатных, кварцево-серицит-хлоритовых фаций метасоматитов. Метасоматиты сопровождаются интенсивным прожилковым окварцеванием и сульфидизацией в виде прожилков и вкрапленности. Рудные тела выделяются только по данным опробования и имеют очень сложную морфологию. Рудовмещающей структурой является зона пологих надвиговых нарушений с общим падением в северном направлении. Оруденение приурочено к участкам сопряжения пологопадающих надвигов с крутопадающими разрывами северо-западного и субширотного направлений (рис. 1).

Магматические образования представлены протерозойскими силлами метатрахиродацит-трахириолит-порфиров зурнинского комплекса ($\tau\lambda\xi PR_{1zr}$) и юрскими дайками микродолеритов грязнинского комплекса (νJ_3gr).

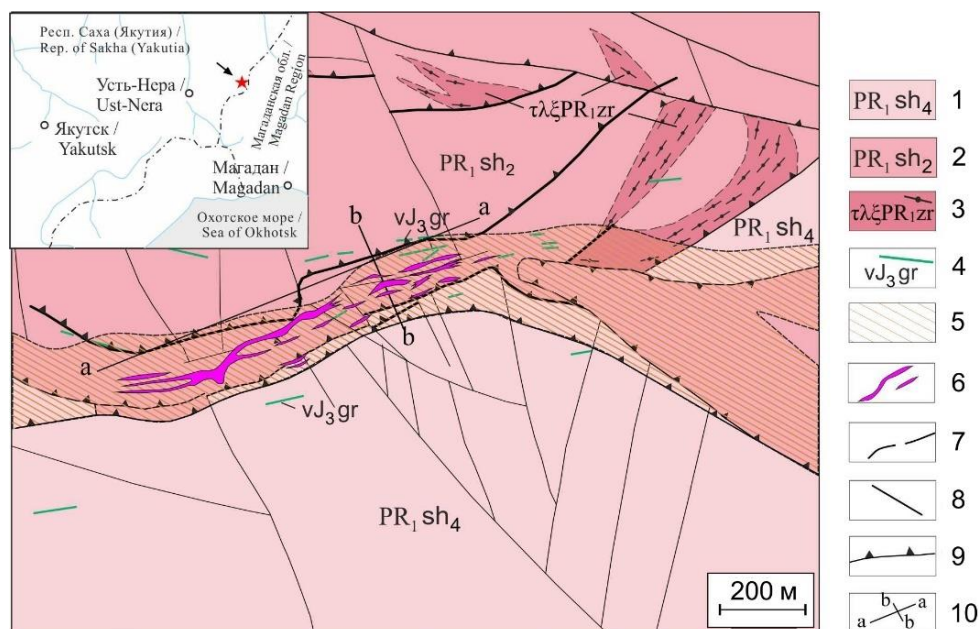


Рис. 1. Схема геологического строения Сохатинского месторождения. Сохатинская толща: 1 – четвертая пачка, мусковит-кварцевые, кварцево-эпидот-хлоритовые сланцы ($PR_1 sh_4$); 2 – вторая пачка, эпидот-амфибол-полевошпатовые, кварцево-эпидот-хлоритовые, мусковит-кварцевые сланцы ($PR_1 sh_2$); 3 – силлы метатрахиродацит-трахириолит-порфиров ($\tau\lambda\xi PR_{1zr}$); 4 – дайки долеритов (νJ_3gr); 5 – области распространения метасоматитов пропилит-березитового типа; 6 – золоторудные тела; 7 – геологические границы; 8 – крутопадающие разрывные нарушения; 9 – пологопадающие надвиги; 10 – линии разрезов на рис. 5.

[**Fig. 1.** Scheme of the geological structure of the Sokhatin deposit. Sokhatin sequence: (1) – fourth member, muscovite-quartz, quartz-epidote-chlorite schists ($PR_1 sh_4$); (2) – second member, epidote-amphibole-feldspar, quartz-epidote-chlorite, muscovite-quartz schists ($PR_1 sh_2$); (3) – metatrachyrhyodacite-trachyrhyolite-porphyry sills ($\tau\lambda\xi PR_{1zr}$); (4) – dolerite dikes (νJ_3gr); (5) – areas of distribution of the propylite-berezite type; (6) – gold ore bodies; (7) – geological boundaries; (8) – steeply dipping faults; (9) – gently dipping thrusts; (10) – section lines in Fig. 5.]

Коры выветривания палеоцен-эоценового возраста в пределах террейна в значительной степени эродированы и переотложены. Остаточные коры фрагментарно сохранились только на плоских водоразделах с отметками 300–500 м. Как самостоятельные источники золота в целом по району они оцениваются невысоко [9], но для Сохатинского месторождения эта оценка выглядит более оптимистично.

Степень золотоносности кор выветривания в существенной степени определяется составом вмещающих пород и содержанием сульфидов в первичных рудах [10–12]. В этом отношении Сохатинское месторождение благоприятно для накопления гипергенного золота в зоне окисления. Существенно карбонатные метасоматиты пропилит-березитового ряда и высокая, в сравнении с другими месторождениями района, сульфидность первичных руд способствовали интенсивным процессам окисления. Сохранившиеся линейные коры выветривания, существенно глинистые, проникают здесь по плоскостям рудовмещающих надвигов на глубину в десятки метров.

Эта золотоносная кора выветривания представляет собой отдельный тип руд со своими минерально-геохимическими и технологическими характеристиками. Выявление новых подобных объектов в пределах рудного поля существенно повысит привлекательность месторождения для отработки.

Материалы и методы исследований

Геохимическая характеристика руд дается по результатам силикатного и ICP-MS анализов, выполненных ООО «Дюамель» в 2017–2019 гг.

Многоэлементный масс-спектрометрический анализ с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) и силикатный анализ методом плазменно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES) проводились в ООО «Химико-аналитический центр», г. Томск, аттестат аккредитации РОСС RU № 0001.516895. Ответственные исполнители Филипас Т. А., Маковенко А. Н.

Минеральный состав первичных и окисленных руд изучался по образцам, отобранным авторами из канав и керн скважин. Рентгенофазовый анализ (РФА) образцов горных пород проводился в АО ТомскНИПИнефть (г. Томск, аналитик Кравченко Г. Г.) на рентгеновском дифрактометре RIGAKU ULTIMA IV с реализацией съемки рентгенограмм в геометрии Брега-Брентано.

Электронно-зондовый микроанализ минералов выполнен в Томском политехническом университете (г. Томск, аналитик Якич Т. Ю.) на электронном микроскопе TESCAN VEGA 3 с энергодисперсионной приставкой фирмы «Oxford».

Фазовый анализ серы общей и серы сульфатной проводился в АО «Иргиредмет», г. Иркутск, аттестат аккредитации № Росс RU.0001.510043. Ответственные исполнители Синькова Л. В., Горбунова К. М.

Результаты исследований

Минералогия руд

Характерной особенностью Сохатинского месторождения является наличие в составе золото-висмут-теллуридной минерализации только сульфовисмутитов и полное отсутствие сульфосолей на основе сульфоарсениновой и сульфоантимонитовой составляющих (блеклых руд, энаргита, прустита, пираргирита) [15].

Столь же показательно постоянное присутствие примеси селена в галените-2, шалпахите, айкините, висмутине, вплоть до образования собственных минералов (науманнит, клаусталит, селенаркубит) (рис. 2).

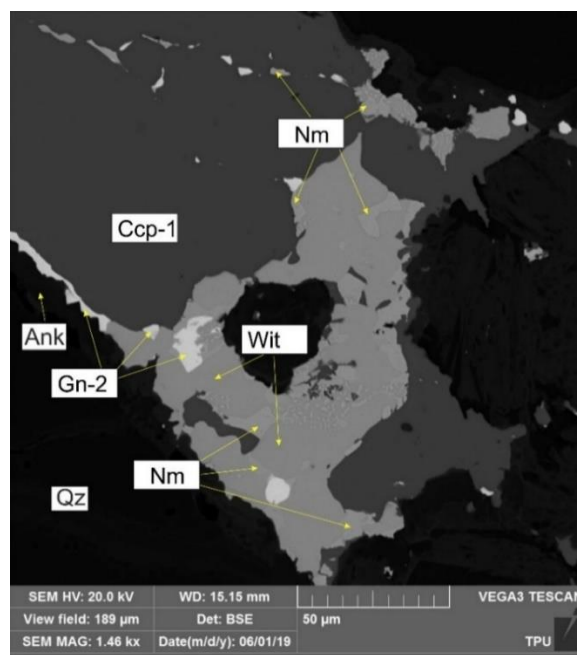


Рис. 2. Селенид серебра (науманнит) в составе поздней теллуридо-висмутовой минерализации, цементирующей зерна халькопирита-1 (Ccp1): Nm – науманнит, Wit – виттихенит, Gn2 – галенит-2, Ank – анкерит, Qz – кварц.

[Fig. 2. Silver selenide (naumannite) in the composition of late tellurium-bismuth mineralization, cementing grains of chalcopyrite-1 (Ccp1): Nm – naumannite, Wit – wittichenite, Gn2 – galena-2, Ank – ankerite, Qz – quartz.]

Гидрогеохимические аномалии селена установлены нами также в водотоках, дренирующих Сохатинское месторождение.

Еще одна особенность – практическое отсутствие в рудах арсенопирита, он обнаруживается только под электронным микроскопом, но мышьяк присутствует в качестве примеси в пирите и в структуре аномального геохимического поля все же является индикаторным элементом.

Основное количество самородного золота связано с сульфидами. По времени отложения выделяется 2 генерации гипогенного золота. Золото-1 чаще всего наблюдается совместно с халькопиритом-1 и галенитом-1 в прожилках, цементирующих раздробленные зерна пирита (рис. 3а). Пирит, видимо, служил химически благоприятной средой для осаждения золота.

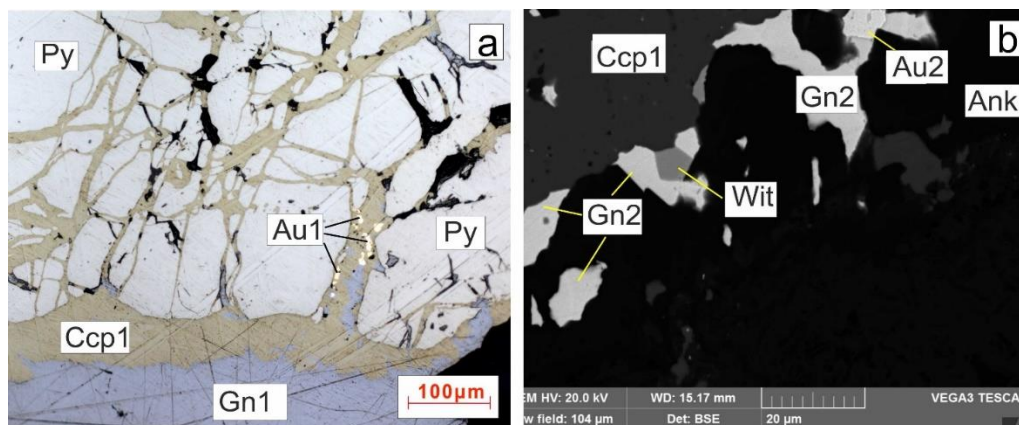


Рис. 3. Золото в неокисленных рудах Сохатинского месторождения: *a* – золото-1 (Au1) с халькопиритом-1 (Ccp1) и галенитом-1 (Gn1), цементирующих пирит (Py); *b* – золото-2 (Au2) в составе поздней теллуридо-висмутовой минерализации, (галенит-2 (Gn2), виттихенит (Wt), анкерит (Ank)), обрастающей зерна халькопирита-1 (Ccp1).

[**Fig. 3.** Gold in unoxidized ores of the Sokhatin deposit: (*a*) – gold-1 (Au1) with chalcopyrite-1 (Ccp1) and galena-1 (Gn1), cementing pyrite (Py); (*b*) – gold-2 (Au2) in the composition of late tellurium-bismuth mineralization, (galena-2 (Gn2), wittichenite (Wt), ankerite (Ank)), overgrowing chalcopyrite-1 grains (Ccp1).]

Золото-2 вместе с галенитом-2, виттихенитом и другими минералами поздней ассоциации обрастает зерна халькопирита-1 и проникает по трещинам в него и более ранние минералы (рис. 3b).

Основной примесью в золоте является серебро, доля которого меняется от 7 % до 38 %. Как золото-1, так и золото-2 имеют достаточно широкий диапазон изменения пробы. В тех случаях, когда генерация золота под микроскопом устанавливается однозначно, золото-1 имеет диапазон колебаний пробы от 662 до 920 ‰ (среднее 788 ‰), золото-2 – от 636 до 832 ‰ (среднее 734 ‰).

Тенденция снижения пробности прослеживается, но статистически значимого различия между золотом-1 и золотом-2 не устанавливается. Средняя проба по всем замерам гипогенного золота составляет 744 ‰, что говорит в пользу того, что в рудах преобладает золото-2.

Пробность золота из зоны окисления – от 788 до 920 ‰ (в среднем – 858 ‰), примеси представлены только серебром. Статистическая значимость отличия по составу гипергенного золота от гипогенного устанавливается с доверительной вероятностью 99.99 %. Окисленное золото, таким образом, облагорожено за счет выноса части серебра. Частично золото, вероятно, растворялось и осаждалось затем из коллоидного раствора, либо адсорбировалось глинистыми минералами [16, 17].

На месторождениях соседнего Глухаринского рудного узла пробность золота несколько выше и колеблется в пределах 800–980 ‰, как в рудах, так и в россыпях, что объясняется, видимо, тем, что опробованию подвергались руды месторождения Надежда, в значительной степени окисленные [18, 19].

Геохимия

Руды месторождения Сохатинского в целом можно разделить на 2 группы: неокисленные (первичные) и окисленные. Геохимическая характеристика первичных руд дается по результатам анализов керновых проб, окисленные руды охарактеризованы по бороздо-

вым пробам из канав. Оруденение носит прожилково-вкрапленный характер, поэтому химический состав руды решающим образом зависит от состава исходного субстрата. В таблице 1 приведены результаты силикатного и рентгенофазового анализов, иллюстрирующих эту зависимость.

Наиболее широко на месторождении распространены две разновидности рудовмещающих пород: кварц-эпидот-хлоритовые и мусковит-кварцевые сланцы. Они изначально существенно различаются по содержаниям кремнезема, железа, кальция, магния, и различия эти сохраняются в рудах, хотя эпидот и хлорит замещаются в березитах карбонатом, а мусковит – серицитом (табл. 1).

Следует отметить, что на Сохатинском месторождении глинистые коры выветривания в полной мере проявлены только на поверхности, где руды нередко представлены кварцево-глинистым агрегатом. На глубину линейные коры выветривания проникают вдоль надвиговых швов и рудовмещающих разрывов на десятки метров. Содержание каолинита в них постепенно снижается от 50–60 % на поверхности до 2–5 % на глубине 40–60 м. Сами швы достаточно маломощные и полного выветривания не наблюдается даже вблизи поверхности. Соотношение сера сульфатная/сера общая в окисленных рудах колеблется в диапазоне 60–95 % до глубины 10 м, 30–70 % в интервале 10–20 м от поверхности и далее быстро снижается. Соответственно, полного окисления сульфидов в коре выветривания не достигается.

Окисленные руды отличаются от первичных повышенными в 2–4 раза содержаниями Al_2O_3 , P_2O_5 и TiO_2 . Окисление сульфидов, дальнейший гидролиз сульфатов (жарозита) и образование гидроокислов (лимонита) сопровождалось выносом серы, содержание которой в итоге снижается на порядок. Из-за высокой дисперсии содержаний железа, кальция, магния, калия в исходных породах и первичных рудах, установить их поведение в процессе окисления по данным силикатного анализа не удастся.

Табл. 1. Химический и минеральный состав руд Сохатинского месторождения
[Tabl 1. Chemical and mineral composition of the ores of the Sokhatin deposit]

Оксиды и минералы [Oxides and minerals]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO ₂	62.37	58.51	56.37	36.15	32.32	46.61	57.9	60.21	72.37	81.46	70.72	75.06	74.82	80.55
TiO ₂	0.08	0.5	0.4	1.83	0.76	1.99	1.56	0.96	0.2	0.24	0.34	0.49	0.48	0.31
Al ₂ O ₃	3.83	4.15	2.11	10.62	12.61	11.13	15.44	13.63	3.94	5.53	6.17	7.45	9.21	7.23
Fe ₂ O ₃	10.14	10.89	12.52	15.43	16.29	14.54	7.54	10.22	8.33	3.53	7.19	7.04	6.09	2.7
FeO	4.15	2.77	1.37	12.1	11.27	2.27	1.33	1.36	1.44	1.07	1.28	0.67	0.76	1.7
MnO	0.04	0.14	0.14	0.15	0.14	0.14	0.07	0.08	0.03	0.02	0.01	0.02	0.04	0.02
MgO	1.31	2.64	3.32	4.29	4.77	3.00	1.94	1.55	0.78	0.87	0.52	0.44	0.97	0.53
CaO	2.19	5.37	6.23	3.57	2.7	5.85	2.69	2.44	1.47	0.93	0.9	0.16	1.63	2.06
K ₂ O	1.16	1.3	0.37	0.6	0.59	1.35	3.22	2.6	1.12	1.96	2.27	1.95	1.19	1.6
P ₂ O ₅	0.03	0.05	0.06	0.24	0.09	0.46	0.22	0.24	0.06	0.05	0.09	0.12	0.13	0.09
H ₂ O	0.13	0.24	0.06	0.38	0.14	0.81	0.23	0.51	0.07	0.27	0.76	0.49	0.05	0.05
S	7.88	4.01	9.36	0.46	1.85	0.8	0.31	0.34	5.35	0.99	2.54	0.93	0.16	0.13
п.п.п. [LOI]	6.18	9.23	7.78	14.4	17.32	12.17	7.55	6.47	5.28	2.67	7.74	5.2	3.59	2.33
Сумма	99.5	99.8	100.1	100.2	100.9	101.1	100.0	100.6	100.4	99.6	100.5	100.0	99.1	99.3
Кварц [Quartz]	67	71	43	22	23	42	40	41	76	73	45	56	54	65
Серицит [Sericite]	19	9	3	-	-	-	-	-	13	25	-	-	-	-
Хлорит [Chlorite]	-	-	-	20	-	-	4	5	-	-	-	-	-	1
Карбонаты [Carbonates]	12	14	40	24	32	17	1	1	9	-	-	-	3	3
Сульфиды [Sulfides]	-	4	12	-	-	-	-	-	2	2	-	-	-	-
Лимонит [Limonite]	-	-	-	1	2	2	-	-	-	-	-	-	1	-
Глина [Clay]	2	2	2	33	43	32	55	53	-	-	33	35	42	31
Ярозит [Jarosite]	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-	13	9	-	-
Гипс [Gypsum]	-	-	-	-	-	2	-	-	-	-	9	-	-	-

Примечание: Силикатный анализ – по данным метода ICP-OES, содержание минералов – по результатам рентгенофазового анализа. 1–8 – руды по кварц-эпидот-хлоритовым сланцам, 9–14 – руды по мусковит-кварцевым сланцам; степень окисления руд: 1, 2, 3, 9, 10 – неокисленные; 4, 5, 6 – умеренно окисленные; 7, 8, 11–14 – интенсивно окисленные. Содержание окислов и минералов – в %.

[Note: Silicate analysis - according to the ICP-OES method, mineral content - according to the results of X-ray phase analysis. (1–8) – ores based on quartz-epidote-chlorite shales, (9–14) – ores based on muscovite-quartz shales; degree of oxidation of ores: (1, 2, 3, 9, 10) – unoxidized; (4, 5, 6) – moderately oxidized; (7, 8, 11–14) – intensively oxidized. Content of oxides and minerals – in %.]

Таблица 2 характеризует содержание в породах и рудах 25 элементов по данным анализа ICP-MS. Для оценки поведения химических элементов в процессе оруденения и гипергенного окисления руд сформировано 6 выборок: А – безрудные кварц-эпидот-хлоритовые сланцы; В – безрудные мусковит-кварцевые сланцы; руды в кварц-эпидот-хлоритовых сланцах: С – неокисленные, D – окисленные; руды в мусковит-кварцевых сланцах: Е – неокисленные, F – окисленные. Рудные интервалы выделяются только по результатам

опробования, поэтому к рудам отнесены пробы с содержанием Au свыше 0.6 г/т, к безрудным породам – пробы с содержанием Au ниже чувствительности анализа (<0.001 г/т) и без явных аномалий основных элементов-спутников золота (Ag, Pb, Bi, Cu, As, Zn, Te, Cd). Поскольку распределение всех элементов-спутников не соответствует нормальному закону, в качестве оценок среднего взяты средние геометрические значения и их сравнение проведено с использованием непараметрического критерия Манна-Уитни (табл. 2).

Табл. 2. Сравнение содержаний химических элементов в рудах и безрудных породах месторождения Сохатинское
[Table 2. Comparison of the contents of chemical elements in ores and barren rocks of the Sokhatin deposit]

Элемент [Element]	Средние геометрические содержания (г/т) [Geometric average grades (ppb)]						Критерий Манна-Уитни [Mann-Whitney test]					
	A	B	C	D	E	F	A-B	C-A	D-B	C-D	E-C	F-D
Be	0.98	1.01	1.07	0.96	1.08	0.69	-0.92	1.01	-1.00	1.18	1.47	-3.48
P	2080	535	1366	554	1576	384	19.58	-4.54	0.01	3.85	1.26	-1.94
V	166	39	160	56	154	47	20.90	-1.01	2.67	4.84	0.13	-0.92
Cr	206	239	220	226	139	142	-6.73	0.41	-0.95	-0.56	-2.70	-2.46
Mn	893	264	908	363	1072	156	20.34	-0.29	2.02	3.51	1.05	-4.05
Fe	57322	20184	74817	41704	82672	40707	20.40	4.38	6.79	4.50	1.89	-0.23
Co	28.91	6.89	33.44	16.15	31.46	5.62	20.82	0.49	6.19	4.17	-0.10	-6.14
Ni	41.95	17.11	43.80	21.57	41.08	12.47	18.91	-1.81	2.27	3.81	0.61	-4.13
Cu	12.4	4.0	120.4	55.0	237.1	70.8	14.58	5.19	8.26	1.26	0.85	1.05
Zn	102.4	30.6	153.0	49.9	321.1	61.4	19.60	2.62	3.50	3.85	3.83	0.86
As	2.4	1.33	26.4	36.7	52.8	55.7	9.92	7.04	9.29	-0.94	2.28	2.11
Se	0.53	0.62	1.39	1.08	1.31	0.47	-5.41	8.50	4.14	1.07	0.38	-3.27
Nb	7.66	4.25	4.94	2.99	5.23	2.22	16.95	-3.81	-5.07	3.43	0.68	-2.18
Mo	0.97	1.29	3.73	4.20	4.80	10.51	-8.08	4.96	7.12	-0.21	0.31	3.42
Ag	0.02	0.01	0.99	0.63	1.06	1.35	9.47	7.16	9.57	1.59	0.13	3.14
Cd	0.07	0.05	0.15	0.09	0.47	0.20	11.89	2.64	6.20	1.13	1.99	2.98
Sn	0.89	0.80	1.53	1.33	2.12	1.27	6.30	4.87	6.32	0.43	1.98	-0.69
Sb	0.52	0.40	0.93	0.73	1.44	0.93	3.49	3.01	4.48	1.49	2.17	1.68
Te	0.003	0.006	0.07	0.05	0.06	0.06	-8.28	7.70	7.85	0.84	-0.58	0.34
Hf	0.12	0.14	0.10	0.11	0.12	0.16	-4.24	-0.77	-2.56	-0.36	0.27	3.11
W	1.19	2.51	4.37	3.73	6.01	2.37	-16.93	6.16	4.33	1.59	1.61	-2.13
Au	0.0005	0.0005	1.27	1.45	1.21	1.87	-0.95	19.58	20.42	-0.64	-0.78	0.57
Tl	0.11	0.27	0.16	0.23	0.14	0.23	-18.12	2.70	-1.83	-2.35	-1.12	0.02
Pb	10	5	120	25	103	125	15.29	6.37	5.89	2.68	-0.15	3.59
Bi	0.05	0.05	1.71	2.03	3.13	3.42	-1.80	17.59	17.90	-0.28	1.49	2.29

Примечание: A – безрудные кварц-эпидот-хлоритовые сланцы; B – безрудные кварц-мусковитовые сланцы; руды в кварц-эпидот-хлоритовых сланцах: C – неокисленные, D – окисленные; руды в кварц-мусковитовых сланцах: E – неокисленные, F – окисленные. При значении критерия Манна-Уитни более 1.96, вероятность отличия средних содержаний превышает 95 %.

[Note: (A) – barren quartz-epidote-chlorite shales; (B) – barren quartz-muscovite shales; ores in quartz-epidote-chlorite shales: (C) – unoxidized, (D) – oxidized; ores in quartz-muscovite shales: (E) – unoxidized, (F) – oxidized. If the Mann-Whitney criterion value is more than 1.96, the probability of difference in average contents exceeds 95%.]

Из приведенных данных следует, что кварц-эпидот-хлоритовые сланцы отличаются от мусковит-кварцевых повышенными в 2.5–4 раза содержаниями V, Co, Mn, Zn, Cu, Fe, Ni, в 1.5–2 раза – Pb, As, Nb, Ag, Cd, Sb, Sn и пониженными в 1.5–2 раза концентрациями Te, Tl, W, Mo, Hf, Se (рис. 4а).

При формировании руд по кварц-эпидот-хлоритовым сланцам возрастают содержания Au (в тысячи раз), Ag, Bi, Te (в 20–40 раз), Pb, As, Cu (в 10 раз), Se, W, Mo (в 2.5–4 раза), Sb, Cd, Zn, Sn, Tl, Fe (в 1.5–2 раза) при одновременном полуторакратном снижении содержаний Nb и P (рис. 4б). Статистически значимых изменений содержаний Co, Ni, Cr, Mn, V, Be, Hf при этом не установлено.

Оруденение в мусковит-кварцевых сланцах также сопровождается сопоставимым привносом Au (в тысячи раз), Ag, Bi, As (в 25–50 раз), Cu, Te (в 10 раз), Pb,

Mo (в 3–5 раз), Sb, Se, Zn, Cd, Sn, W (в 1.5–2 раза) (рис. 4с). Кроме того, установлено статистически значимое возрастание в 1.5–2 раза концентраций Fe, Co, Ni, Mn, V (табл. 2) и снижение содержаний Nb, Hf, Tl.

Между собой руды, сформировавшиеся по разным субстратам, существенно различаются по содержаниям Pb, Zn, Cu, V, Mn, P, Co, Ni, Fe, что вполне согласуется с различиями в составе исходных пород и позволяет предполагать, что указанные элементы в процессе оруденения заимствуются из рудовмещающей толщи (табл. 2, рис. 4д). По содержаниям других элементов-спутников золота (Ag, Se, Te, Sb, As, Bi, W, Mo, Sn) руды не отличаются и для них можно предполагать другой источник, возможно, нескрытый массив гранитоидов, учитывая накопление в рудах коровых элементов W, Mo, Sn.

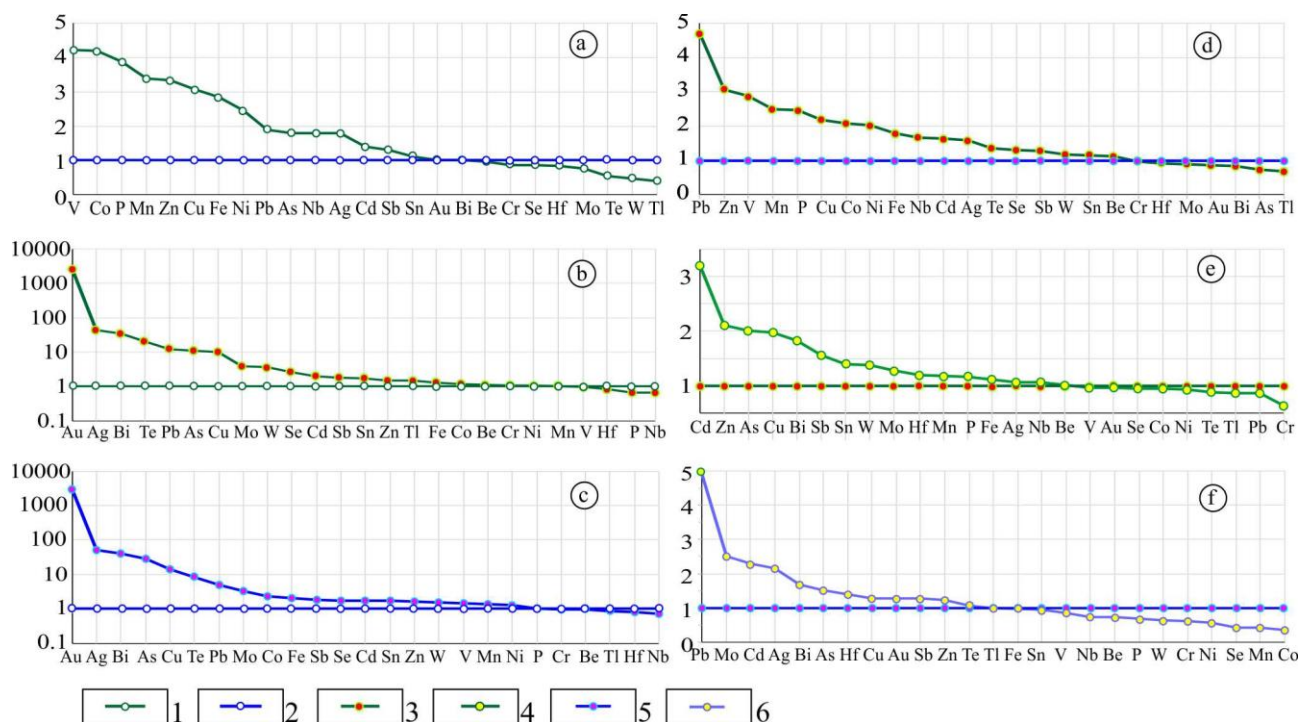


Рис. 4. Соотношение средних геометрических содержаний элементов в исходных породах и рудах Сохатинского месторождения: 1 – безрудные кварцево-эпидот-хлоритовые сланцы; 2 – безрудные мусковит-кварцевые сланцы; руды в кварцево-эпидот-хлоритовых сланцах: 3 – неоокисленные, 4 – окисленные; руды в мусковит-кварцевых сланцах: 5 – неоокисленные, 6 – окисленные.

[Fig. 4. The ratio of the average geometric contents of elements in the original rocks and ores of the Sokhatin deposit: (1) – barren quartz-epidote-chlorite schists; (2) – barren muscovite-quartz schists; ores in quartz-epidote-chlorite schists: (3) – unoxidized, (4) – oxidized; ores in muscovite-quartz schists: (5) – unoxidized, (6) – oxidized.]

При окислении руд, образованных по кварц-эпидот-хлоритовым сланцам, происходит полутора-двукратное возрастание содержаний Zn, Cd, As, Sb, Sn на фоне выноса Cr (рис. 4е). Для остальных элементов статистически значимых изменений концентраций не установлено.

Окисление руд, сформированных по мусковит-кварцевым сланцам, сопровождается накоплением Pb, Mo, Cd, Ag, Bi, As, Hf и выносом Co, Mn, Se, Ni, Cr, W (рис. 4ф).

Что касается Au, его среднее геометрическое значение в процессе окисления руд существенно не изменяется, но резко возрастает дисперсия содержаний. Это означает, что в зоне окисления возникают локальные участки концентрирования золота, существенно повышающие ценность руд, что вполне закономерно для сульфидсодержащих месторождений золота [10–14].

Первичные ореолы рассеяния

Характер перераспределения химических элементов в процессе оруденения находит отражение в многомерных корреляционных зависимостях, что позволяет использовать результаты факторного анализа для геометризации аномальных геохимических полей.

Факторным анализом в первичных ореолах выявлено 4 геохимических ассоциации, отражающих как состав исходных пород, так и наложенные гидро-

термально-метасоматические процессы (табл. 3).

Фактор 1 объединяет элементы, большей частью породообразующие – Fe, Mn, P, Co, Ni, Nb. Этот фактор можно охарактеризовать как «породный», поскольку существенно повышенными концентрациями элементов, входящих в фактор 1, обладают хлорит-эпидотсодержащие исходные породы (табл. 2).

Фактор 2 объединяет Au, Ag, As, Bi, Mo и является главным «рудным» фактором.

Фактор 3 также объединяет тесно связанные с золотом элементы-спутники – Pb, Cu, Te, Se, W. Их выделение в отдельный фактор произошло потому, что аномалии указанных элементов часто выходят за пределы собственно золоторудной минерализации, маркируя рудоподводящие и рудовмещающие структуры и пространственно соответствуют зонам березитизации. В целом контуры аномалий фактора 3 включают в себя более локальные аномалии фактора 2 (рис. 5).

Элементы, объединяемые в фактор 4 (Be, Sb, Tl) накапливаются на выклинивании рудных зон, маркируя внешний контур оруденения. Аномалии значений этого фактора одинаково часто встречаются во всех разновидностях исходных пород, поэтому связывать их следует с наложенными процессами. В зоне окисления интенсивность аномалий возрастает, поскольку сурьма здесь дополнительно накапливается. При поисковых работах эти аномалии могут указывать на наличие рудных зон.

Табл. 3. Матрица факторных нагрузок для первичных ореолов Сохатинского месторождения

[Table 3. Matrix of factor loadings for the primary aureoles of the Sokhatin deposit]

Элемент [Element]	F1	F2	F3	F4
1	2	3	4	5
Be	0.21	-0.09	-0.02	0.86
P	0.87	-0.05	-0.12	0.19
V	0.95	-0.03	-0.02	0.04
Mn	0.91	-0.02	0.02	-0.02
Fe	0.95	0.11	0.08	0.12
Co	0.97	0.01	0.04	0.00
Ni	0.71	-0.05	0.09	-0.21
Cu	0.21	0.09	0.77	0.00
Zn	0.91	-0.02	0.11	0.16

Продолжение Табл. 3
[Continued Table 3]

1	2	3	4	5
As	0.06	0.77	0.14	0.13
Se	-0.17	0.32	0.52	-0.08
Nb	0.73	-0.07	-0.14	0.26
Mo	-0.11	0.69	0.19	0.07
Ag	0.02	0.88	0.23	-0.06
Sn	0.15	0.31	0.22	0.21
Sb	0.31	0.07	0.09	0.42
Te	0.00	0.39	0.64	-0.02
W	-0.33	0.11	0.53	0.21
Au	-0.02	0.90	-0.11	-0.02
Tl	-0.73	-0.03	-0.03	0.47
Pb	0.12	0.19	0.68	-0.01
Bi	0.00	0.86	0.18	-0.08

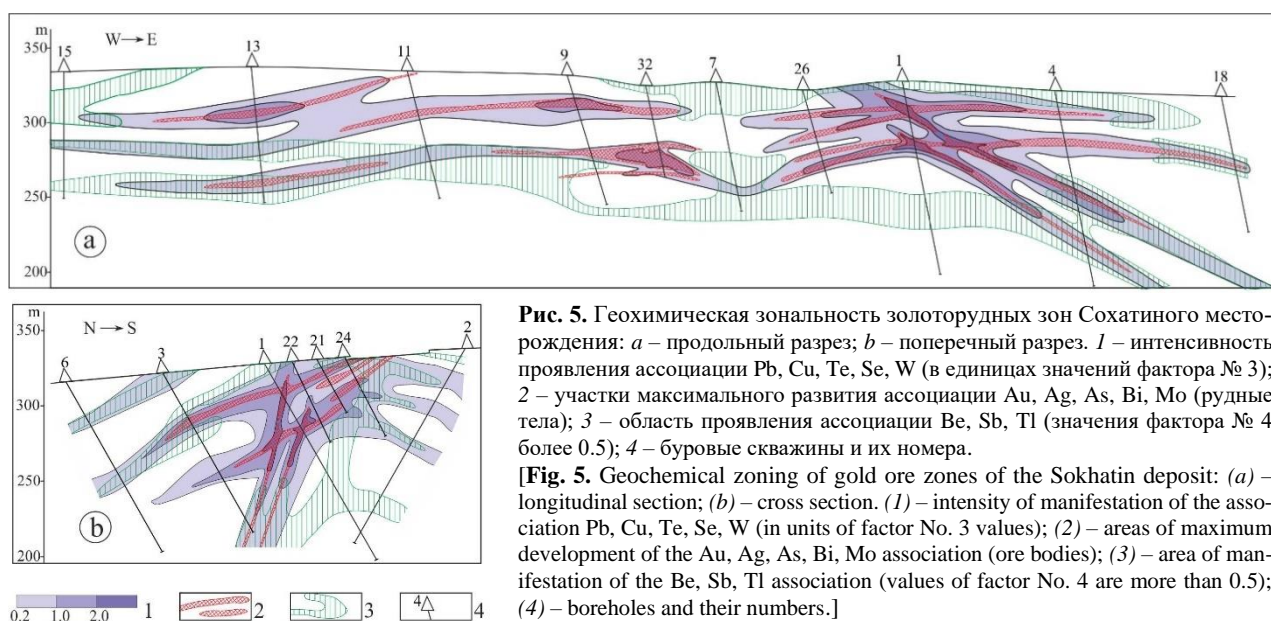


Рис. 5. Геохимическая зональность золоторудных зон Сохатинского месторождения: *a* – продольный разрез; *b* – поперечный разрез. 1 – интенсивность проявления ассоциации Pb, Cu, Te, Se, W (в единицах значений фактора № 3); 2 – участки максимального развития ассоциации Au, Ag, As, Bi, Mo (рудные тела); 3 – область проявления ассоциации Be, Sb, Tl (значения фактора № 4 более 0.5); 4 – буровые скважины и их номера.

[Fig. 5. Geochemical zoning of gold ore zones of the Sokhatin deposit: (*a*) – longitudinal section; (*b*) – cross section. (1) – intensity of manifestation of the association Pb, Cu, Te, Se, W (in units of factor No. 3 values); (2) – areas of maximum development of the Au, Ag, As, Bi, Mo association (ore bodies); (3) – area of manifestation of the Be, Sb, Tl association (values of factor No. 4 are more than 0.5); (4) – boreholes and their numbers.]

Таким образом, элементы-индикаторы золотого оруденения формируют концентрически зональные аномальные геохимические поля с накоплением в рудных телах Au, Ag, As, Bi, Mo (центральная зона) на фоне более обширных комплексных аномалий Pb, Cu, Te, Se, W (промежуточная зона), связанных с зонами березитов. Внешний контур рудных зон маркируется ассоциацией Be, Sb, Tl.

Выводы

Рудовмещающими породами на Сохатинском месторождении являются кварц-эпидот-хлоритовые и мусковит-кварцевые сланцы, существенно различающиеся по содержаниям Fe, Mn, P, Co, Ni, Pb, Zn, Cu, V.

Руды, образованные по мусковит-кварцевым и кварц-эпидот-хлоритовым сланцам, также статистически значительно различаются между собой по содержаниям Fe, Mn, P, Co, Ni, Pb, Zn, Cu, V. Накопление этих элементов в рудах по мусковит-кварцевым сланцам

свидетельствует о заимствовании их из рудовмещающих толщ.

Комплекс элементов-индикаторов золотого оруденения для всех типов руд включает в себя Au, Ag, Bi, Te, Pb, As, Cu, Se, W, Mo, Sb, Cd, Zn, Sn, Tl, Fe.

При окислении руд происходит накопление Al_2O_3 , P_2O_5 , TiO_2 , Pb, Zn, Cd, As, Sb, Sn и вынос S, Cr. В зоне гипергенеза возрастает дисперсия содержания Au с появлением участков его концентрированного накопления, средняя проба самородного золота повышается с 744 ‰ до 858 ‰. Процессы выветривания и окисления руд происходили вдоль рудовмещающих разрывных нарушений. Степень окисления изменяется от 60–95 % на поверхности до 2–5 % на глубине 40–60 м.

Элементы-индикаторы золотого оруденения формируют концентрически зональные аномальные геохимические поля с накоплением в рудных телах Au, Ag, As, Bi, Mo (центральная зона) на фоне более обширных комплексных аномалий Pb, Cu, Te, Se, W (промежуточная

зона), связанных с зонами березитов. Внешний контур рудных зон маркируется ассоциацией Be, Sb, Ti.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горячев Н. А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. Магадан: Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 1998. 210 с.
2. Glukhov A. N. Geochemical specialization of the Upper Proterozoic complexes of the Kolyma Terrane in Northeast Russia // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2014. Vol. 8. No. 3. P. 177–186. DOI:10.1134/S1819714014030026
3. Глухов А. Н., Бирюков А. А. Геохимическая специализация гидротермального оруденения Приколымского террейна (Северо-Восток России) и ее связь со структурой и составом вмещающих комплексов // *Тихоокеанская геология*. 2022. Т. 41. № 2. С. 75–89. DOI:10.30911/0207-4028-2022-41-2-75-88
4. Шпикерман В. И. Домеловая минерализация Северо-Востока Азии. Магадан: Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 1998. 333 с.
5. Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). Ред. Л. М. Парфенов, М. И. Кузьмин. М.: МАИК «Наука/Интерпериодика», 2001. 571 с.
6. Фридовский В. Ю., Полуфунтикова Л. И., Горячев Н. А., Кудрин М. В. Рудоконтролирующие надвиги золоторудного месторождения Базовское (Восточная Якутия) // *Докл. АН*. 2017. Т. 474. № 4. С. 462–464.
7. Татаринов А. В., Яловик Л. И., Яловик Г. А. Золотое оруденение в надвиговых структурах Монголо-Охотского коллизийного шва (Пришилкинская и Онон-Турунская зоны) // *Тихоокеанская геология*. 2004. Т. 23. № 3. С. 22–31.
8. Goldfarb R. J., Baker T., Dube B. Distribution, character and genesis of Gold Deposits in Metamorphic terranes // *Economic Geology*. 2005. Vol. 100. P. 407–450. DOI:10.5382/AV100.14
9. Глухов А. Н., Калинин Ю. А., Буляков Г. Х. Коры выветривания Глухаринского рудно-россыпного узла (Приколымское поднятие, Северо-Восток Азии) и их золотоносность // *Литология и полезные ископаемые*. 2020. № 5. С. 461–484. DOI:10.31857/S0024497X20050043
10. Калинин Ю. А., Росляков Н. А., Прудников С. Г. Золотоносные коры выветривания юга Сибири. Новосибирск: "Гео", 2006. 339 с.
11. Янченко О. М., Ворошилов В. Г., Тимкин Т. В., Зияи М. Минерально-геохимическая зональность золотоносных кор выветривания Томь-Яйского междуречья // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019. Т. 330. № 2. С. 83–94. DOI:10.18799/24131830/2019/2/98
12. Янченко О. М., Ворошилов В. Г., Тимкин Т. В., Мартыненко И. В., Зияи М. Морфология и состав золота кор выветривания Томь-Яйского междуречья // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2019. Т. 330. № 3. С. 84–92. DOI:10.18799/24131830/2019/3/166
13. Pires G. L. C., Renac C., Bongioiolo E. M., Neumann R. Gossan mineralogy, textures, and gold enrichment over the Au (As, Bi, Ag) deposit in the Buracao Area (Brasilia Fold Belt, Brazil): Implications for gold prospecting in weathering profiles // *Journal of Geochemical Exploration*. 2020. Vol. 218. DOI:10.1016/j.gexplo.2020.106615
14. Dunn S., Von der Heyden B. Gold remobilization in gossans of the Amani area, southwestern Tanzania // *Ore Geology Reviews*. 2021. Vol. 131. DOI:10.1016/j.oregeorev.2021.104033
15. Тимкин Т. В., Ворошилов В. Г., Юркова М. В., Зияи М. Минералогия руд Сохатинского золоторудного месторождения (Северо-Восток Азии, Россия) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022. Т. 333. № 4. С. 53–65. DOI:10.18799/24131830/2022/4/3585
16. Craw D, MacKenzie DJ, Grieve P. Supergene gold mobility in orogenic gold deposits, Otago Schist, New Zealand // *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*. 2015. Vol. 58. P. 123–136. DOI:10.1080/00288306.2014.997746
17. Wierchowicz J., Mikulski S. Z., Zieliński K. Supergene gold mineralization from exploited placer deposits at Dziwiszów in the Sudetes (NE Bohemian Massif, SW Poland) // *Ore Geology Reviews*. 2021. Vol. 131. DOI:10.1016/j.oregeorev.2021.104049
18. Глухов А. Н., Савва Н. Е., Буляков Г. Х., Фомина М. И., Бирюков А. А. Самородное золото в рудах и россыпях Глухаринского рудно-россыпного узла, Магаданская область // *Руды и металлы*. 2018. № 2. С. 55–65.
19. Глухов А. Н., Савва Н. Е., Колова Е. Е. Вещественный состав и генезис золотых руд месторождения Надежда, Магаданская область // *Руды и металлы*. 2016. № 4. С. 60–71.

Geochemical criteria for gold content of primary and oxidized ores of the Sokhatin deposit (North-East Russia)

©2024 V. G. Voroshilov✉, T. V. Timkin, D. K. Molukpaeva, O. V. Savinova

*National Research Tomsk Polytechnic University, pr. Lenina, 30,
634050, Tomsk, Russian Federation*

Abstract

Introduction: the Sokhatin gold deposit is localized in the Proterozoic metamorphic strata of one of the blocks of the Prikolyma terrane, where until recently gold was mined only from placers. The development of primary deposits has begun in recent years, and many issues of their genesis and criteria for predicting mineralization have not been fully resolved. In addition, the Sokhatinoye deposit differs from analogous objects in the region in the composition of ore-hosting rocks, ore mineralogy, their geochemical characteristics and the degree of preservation of weathering crusts, which determines the need to develop criteria for the gold content of primary and oxidized ores.

Methodology: multielement inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) and silicate analysis using inductively coupled plasma emission spectrometry (ICP-OES) were used to study the composition of ores and host rocks. The composition of primary and oxidized ore minerals was studied using a TESCAN VEGA 3 electron microscope with an Oxford energy dispersive attachment. To study the mineralogy of primary and oxidized ores, a RIGAKU ULTIMA IV X-ray diffractometer was used. To assess the degree of sulfide oxidation, a phase analysis of total sulfur and sulfate sulfur was performed.

Results and discussion: as a result of the studies, a complex of indicator elements associated with gold mineralization was established, including Ag, Bi, Te, Pb, As, Cu, Se, W, Mo, Sb, Cd, Zn, Sn, Tl. Ores formed from muscovite-quartz and quartz-epidote-chlorite schists differ significantly in the contents of Pb, Zn, Cu, V, Mn, P, Co, Ni, Fe. During the oxidation of ores, Al_2O_3 , P_2O_5 , TiO_2 , Pb, Zn, Cd, As, Sb, Sn accumulate and S, Cr are removed. In the hypergenesis zone, the dispersion of Au contents increases, the average sample of native gold increases from 744 ‰ to 858 ‰.

Conclusions: indicator elements of gold mineralization form zonally constructed anomalous geochemical fields with concentrations of Au, Ag, As, Bi, and Mo in ore bodies against the background of more extensive complex anomalies of Pb, Cu, Te, Se, and W associated with beresite zones. The outer contour of the ore zones is marked by the Be, Sb, Tl association.

Keywords: gold deposits, geochemical criteria, supergene gold, Prikolyma terrane.

Funding: The work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation. Project No. 24-27-00022.

For citation: Voroshilov V. G., Timkin T. V., Molukpaeva D. K., Savinova O. V. Geochemical criteria for gold content of primary and oxidized ores of the Sokhatin deposit (North-East Russia) // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2024, no. 4, pp. 24-34. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/4/24-34>

Conflict of interests: The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Valery G. Voroshilov, e-mail: v_g_v@tpu.ru

REFERENCES

1. Goryachev N. A. *Geologiya mezozoiskikh zoloto-kvartsevykh zhil'nykh poiasov Severo-Vostoka Azii* [Geology of mesozoic gold-quartz vein belts of North-East of the Asia]. Magadan, NEISRI FEB RUS publ., 1998, 210 p. (In Russ.)
2. Glukhov A. N. Geochemical specialization of the Upper Proterozoic complexes of the Kolyma Terrane in Northeast Russia. *Russian Journal of Pacific Geology*, 2014, vol. 8, no. 3, pp. 177–186. DOI:10.1134/S1819714014030026
3. Glukhov A. N., Biryukov A. A. Geokhimicheskaya spetsializatsiya gidrotermal'nogo orudneniya Prikolymnskogo terrena (Severo-Vostok Rossii) i yeye svyaz' so strukturoy i sostavom vmeshchayushchikh kompleksov [Geochemical specialization of hydrothermal mineralization of the Kolyma terrane (North-East Russia) and its connection with the structure and composition of host complexes] *Tihookeanskaya geologiya – Pacific Geology*, 2022, vol. 41, no. 2, pp. 75–89. DOI:10.30911/0207-4028-2022-41-2-75-88 (In Russ.)
4. Shpikerman V. I. *Domelovaya minerageniya Severo-Vostoka Azii* [Pre-cretaceous metallogeny of Northeastern Asia]. Magadan, NEISRI FEB RUS publ., 1998, 333 p. (In Russ.)
5. Tektonika, geodinamika i metallogeniya territorii Respubliki Sakha (Yakutiya) [Tectonics, geodynamics and metallogenesis of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)]. Ed. L. M. Parfenov, M. I. Kuzmin. Moscow, MAIK "Science/Interperiodics" publ., 2001, 571 p. (In Russ.)
6. Fridovsky V. Yu., Polufuntikova L. I., Goryachev N. A., Kudrin M. V. Rudokontroliruyushchiye nadvigi zolotorudnogo mestorozhdeniya Bazovskoye (Vostochnaya Yakutiya) [Ore-controlling thrusts of the Bazovskoye gold deposit (Eastern Yakutia)] *Dokl. RAN – Doklady Earth Sciences*, 2017, vol. 474, no. 4, pp. 462–464 (In Russ.)
7. Tatarinov A. V., Yalovik L. I., Yalovik G. A. Zolotoye orudneniye v nadvigovykh strukturakh Mongolo-Okhotskogo kollizionnogo shva (Prishilkinskaya i Onon-Turinskaya zony) [Gold mineralization in thrust structures of the Mongol-Okhotsk collision suture (Prishilka and Onon-Turin zones)]. *Tihookeanskaya geologiya – Pacific Geology*, 2004, vol. 23, no. 3, pp. 22–31 (In Russ.)
8. Goldfarb R. J., Baker T., Dube B. Distribution, character and genesis of Gold Deposits in Metamorphic terranes. *Economic Geology*, 2005, vol. 100, pp. 407–450. DOI:10.5382/AV100.14
9. Glukhov A. N., Kalinin Yu. A., Bulyakov G. Kh. Kory vyvetrivaniya Glukharinskogo rudno-rossypnogo uzla (Prikolymnskoye podnyatiye, Severo-Vostok Azii) i ikh zolotonosnost' [Weathering crusts of the Glukharinsky ore-placer cluster (Prikolymsky uplift, Northeast Asia) and their gold content]. *Litologiya i poleznyye iskopayemye – Lithology and Mineral Resources*, 2020, no. 5, pp. 461–484. DOI:10.31857/S0024497X20050043 (In Russ.)
10. Kalinin Yu. A., Roslyakov N. A., Prudnikov S. G. Zolotonosnyye kory vyvetrivaniya yuga Sibiri [Gold-bearing weathering crusts of southern Siberia]. Novosibirsk, "Geo" publ., 2006, 339 p. (In Russ.)
11. Yanchenko O. M., Voroshilov V. G., Timkin T. V., Ziaii M. Mineral'no-geokhimicheskaya zonal'nost' zolotonosnykh kor vyvetrivaniya Tom'-Yayskogo mezhdurech'ya [Mineral-geochemical zonality of golden bearing weathering crust of the Tom-Yaya interfluv]. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 83–94. DOI:10.18799/24131830/2019/2/98 (In Russ.)
12. Yanchenko O. M., Voroshilov V. G., Timkin T. V., Martynenko I. V., Ziaii M. Morfologiya i sostav zolota kor vyvetrivaniya Tom'-Yayskogo mezhdurech'ya [Morphology and composition of gold in weathering crust of the Tom-Yaya interfluv]. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 332, no. 9, pp. 74–91. DOI:10.18799/24131830/2019/3/166 (In Russ.)
13. Pires G. L. C., Renac C., Bongiolo E. M., Neumann R. Gossan mineralogy, textures, and gold enrichment over the Au (As, Bi, Ag) deposit in the Buracao Area (Brasília Fold Belt, Brazil): Implications for gold prospecting in weathering profiles. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, vol. 218. DOI:10.1016/j.jexplo.2020.106615
14. Dunn S., Von der Heyden B. Gold remobilization in gossans of the Amani area, southwestern Tanzania. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 131. DOI:10.1016/j.oregeorev.2021.104033
15. Timkin T. V., Voroshilov V. G., Yurkova M. V., Ziaii M. Mineralogiya rud Sokhatinogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Severo-Vostok Azii, Rossiya) [Mineralogy of ores of the Sokhatin gold deposit (North-East Asia, Russia)]. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 4, pp. 53–65. DOI:10.18799/24131830/2022/4/3585 (In Russ.)
16. Craw D., MacKenzie DJ, Grieve P. Supergene gold mobility in orogenic gold deposits, Otago Schist, New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 2015, vol. 58, pp. 123–136. DOI:10.1080/00288306.2014.997746
17. Wierchowiec J., Mikulski S. Z., Zieliński K. Supergene gold mineralization from exploited placer deposits at Dziwiszów in the Sudetes (NE Bohemian Massif, SW Poland). *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 131. DOI:10.1016/j.oregeorev.2021.104049
18. Glukhov A. N., Savva N. E., Bulyakov G. Kh., Fomina M. I., Biryukov A. A. Samorodnoye zoloto v rudakh i rossypnykh Glukharinskogo rudno-rossypnogo uzla, Magadanskaya oblast' [Native gold in ores and placers of the Glukharinsky ore-placer cluster, Magadan region]. *Rudy i metally – Ores and metals*, 2018, no. 2, pp. 55–65 (In Russ.)
19. Glukhov A. N., Savva N. E., Kolova E. E. Veshchestvennyy sostav i genezis zolotykh rud mestorozhdeniya Nadezhda, Magadanskaya oblast' [Ore mineralogy and genesis of Nadezhda gold deposit, Magadan region]. *Rudy i metally – Ores and metals*, 2016, no. 4, pp. 60–71 (In Russ.)

Ворошилов Валерий Гаврилович, д.г.-м.н., профессор, Инженерная школа природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Томск, РФ; e-mail: v_g_v@tpu.ru; ORCID 0000-0003-0955-5750

Тимкин Тимофей Васильевич, к.г.-м.н., доцент, Инженерная школа природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Томск, РФ; e-mail: timkin@tpu.ru; ORCID 0000-0002-8113-3555

Молукпаева Диана Калибековна, аспирант, Инженерная школа природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Томск, РФ; e-mail: dkm3@tpu.ru; ORCID 0000-0002-0495-4456

Савинова Олеся Вячеславовна, к.г.-м.н., доцент, Инженерная школа природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Томск, РФ; e-mail: logvinenkoov@tpu.ru; ORCID 0000-0002-7925-6150

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Valery G. Voroshilov, Dr. habil. in Geol.-Min., Professor, School of Natural Resources of the National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation; e-mail: v_g_v@tpu.ru; ORCID 0000-0003-0955-5750

Timofey V. Timkin, PhD in Geol.-Min., Associate professor, School of Natural Resources Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation; e-mail: timkin@tpu.ru ORCID 0000-0002-8113-3555

Diana K. Molukpaeva, Graduate student, School of Natural Resources Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation; e-mail: dkm3@tpu.ru; ORCID 0000-0002-0495-4456

Olesya V. Savinova, PhD in Geol.-Min., Associate professor, School of Natural Resources Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation; e-mail: logvinenkoov@tpu.ru; ORCID 0000-0002-7925-6150

Authors have read and approved the final manuscript.