

---

# ПЕТРОЛОГИЯ, ВУЛКАНОЛОГИЯ, ГЕОХИМИЯ

---

УДК 553.411+551.311.231

ISSN 1609-0691

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/4/24-34>

Поступила в редакцию: 14.04.2024

Принята к публикации: 22.11.2024

Опубликована онлайн: 27.12.2024

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

©2024 В. Г. Ворошилов<sup>✉</sup>, 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 началась в последние годы и многие вопросы их генезиса и критериев прогнозирования оруденения решены не в полной мере. Кроме того, Сохатинское месторождение по составуrudовмещающих 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 связанный плазмой (ICP-MS) и силикатный анализ методом плазменно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанный 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub>, 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.

<sup>✉</sup> Ворошилов Валерий Гаврилович, e-mail: v\_g\_v@tpu.ru

## Введение

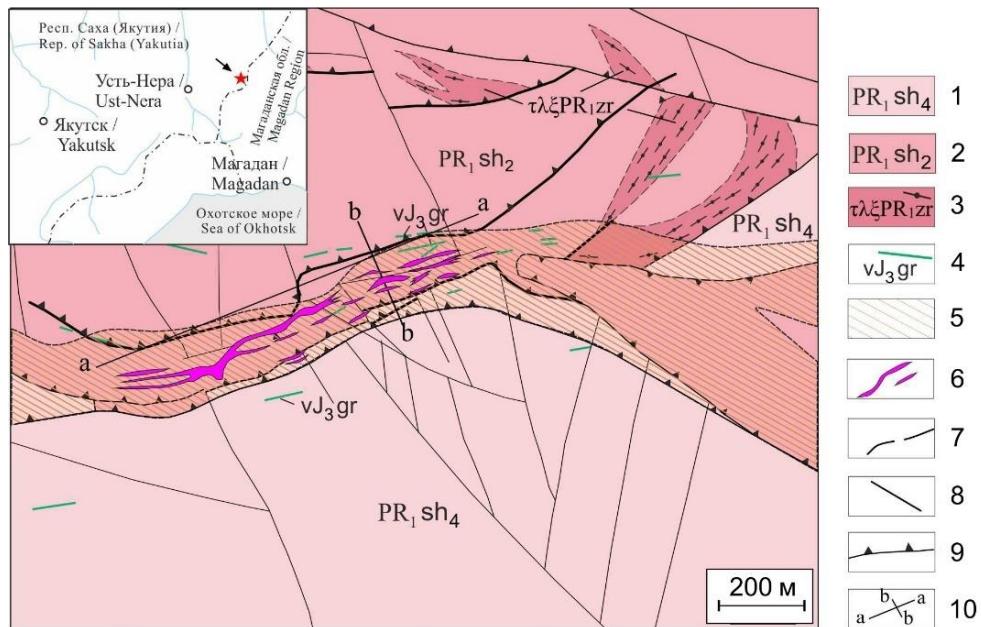
Сохатиное золоторудное месторождение расположено в пределах Приколымского террейна пассивной континентальной окраины и входит в состав Шаманихо-Столбовского рудно-rossыпного района [1–3]. Выявленные в районе коренные месторождения и проявления золота (Надежда, Сохатиное, Глухаринское, Тый-Юрья, Темный 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 кварците-песчаниках, на Тый-Юрья – только в метаролитах, на рудопроявлении Темном – в доломитах, на Сохатином 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.

Сохатиное 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-серийтовых, кварцево-серийт-карбонатных, кварцево-серийт-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 метатрахириодакит-трахириолит-порфиров зурнинского комплекса ( $\tau\lambda\xi PR_1 zr$ ) и юрскими дайками микродолеритов грязнинского комплекса ( $vJ_3 gr$ ).



**Рис. 1.** Схема геологического строения Сохатиного 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 метатрахириодакит-трахириолит-порфиров ( $\tau\lambda\xi PR_1 zr$ ); 4 – дайки долеритов ( $vJ_3 gr$ ); 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. Sokhaty 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) – metatracryhyodacite-trachyrhyolite-porphry sills ( $\tau\lambda\xi PR_1 zr$ ); (4) – dolerite dikes ( $vJ_3 gr$ ); (5) – areas of distribution of metasomatic rocks 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 оценивается невысоко [9], но для Сохатиного 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 Сохатиное месторождение благоприятно для накопления гипогенного 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 руддается по результатам силикатного и ICP-MS анализов, выполненных ООО «Дюамель» в 2017–2019 гг.

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

Минеральный состав первичных и окисленных руд изучался по образцам, отобранным авторами из канав и керна 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 Брегга-Брентано.

Электронно-зондовый микронализ 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 Сохатиного месторождения является наличие в составе золото-висмут-теллуридной минерализации только сульфовисмутитов и полное отсутствие сульфосолей на основе сульфоарсенитовой и сульфоантимонитовой составляющих (блеклых руд, энаргита, прустита, пираргирита) [15].

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

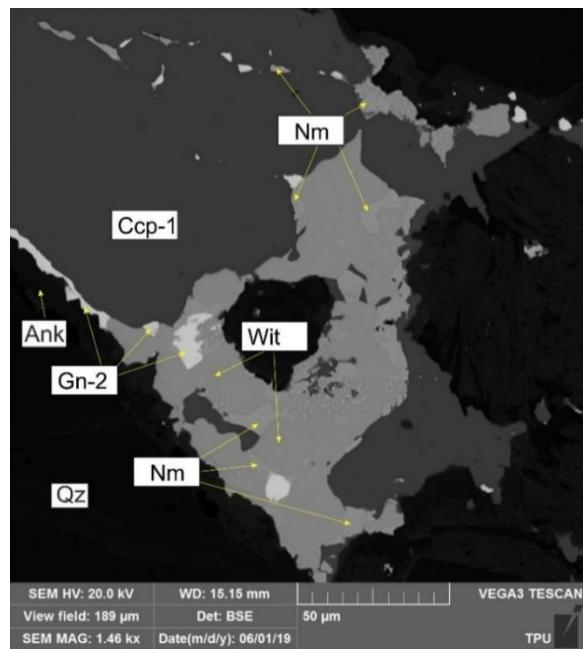


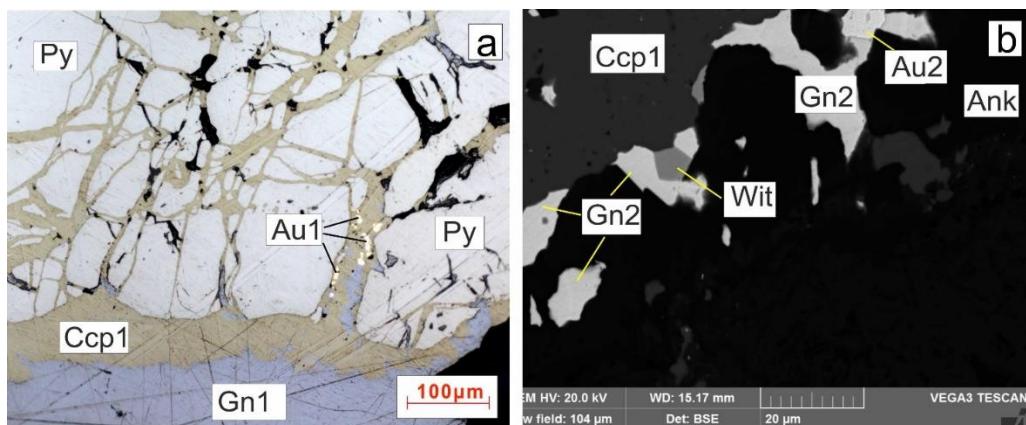
Рис. 2. Селенид серебра (науманнит) в составе поздней теллуро-висмутовой минерализации, цементирующей зерна халькопирита-1 (Ccp1): Nm – науманнит, Wit – виттихенит, Gn2 – галенит-2, Ank – анкерит, Qz – кварц.

[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 Сохатиного месторождения: *a* – золото-1 (Au1) с халькопиритом-1 (Ccp1) и галенитом-1 (Gn1), цементирующих пирит (Py); *b* – золото-2 (Au2) в составе поздней теллуро-висмутовой минерализации, (галенит-2 (Gn2), виттихенит (Wit), 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 (Wit), 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. 3б).

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 гипогенного 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 Сохатиного 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-вкрашенный 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 Сохатином 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/серы 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  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  и  $\text{TiO}_2$ . Окисление сульфидов, дальнейший гидролиз сульфатов (ярозита) и образование гидроокислов (лимонита) сопровождались 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 удается.

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

Окислы и минералы [Oxides and minerals]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub>	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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	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 <sub>2</sub> 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 Сохатиное  
**[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	<b>-3.48</b>
P	2080	535	1366	554	1576	384	<b>19.58</b>	<b>-4.54</b>	0.01	<b>3.85</b>	1.26	-1.94
V	166	39	160	56	154	47	<b>20.90</b>	-1.01	<b>2.67</b>	<b>4.84</b>	0.13	-0.92
Cr	206	239	220	226	139	142	<b>-6.73</b>	0.41	-0.95	-0.56	<b>-2.70</b>	<b>-2.46</b>
Mn	893	264	908	363	1072	156	<b>20.34</b>	-0.29	<b>2.02</b>	<b>3.51</b>	1.05	<b>-4.05</b>
Fe	57322	20184	74817	41704	82672	40707	<b>20.40</b>	<b>4.38</b>	<b>6.79</b>	<b>4.50</b>	1.89	-0.23
Co	28.91	6.89	33.44	16.15	31.46	5.62	<b>20.82</b>	0.49	<b>6.19</b>	<b>4.17</b>	-0.10	<b>-6.14</b>
Ni	41.95	17.11	43.80	21.57	41.08	12.47	<b>18.91</b>	-1.81	<b>2.27</b>	<b>3.81</b>	0.61	<b>-4.13</b>
Cu	12.4	4.0	120.4	55.0	237.1	70.8	<b>14.58</b>	<b>5.19</b>	<b>8.26</b>	1.26	0.85	1.05
Zn	102.4	30.6	153.0	49.9	321.1	61.4	<b>19.60</b>	<b>2.62</b>	<b>3.50</b>	<b>3.85</b>	<b>3.83</b>	0.86
As	2.4	1.33	26.4	36.7	52.8	55.7	<b>9.92</b>	<b>7.04</b>	<b>9.29</b>	-0.94	<b>2.28</b>	<b>2.11</b>
Se	0.53	0.62	1.39	1.08	1.31	0.47	<b>-5.41</b>	<b>8.50</b>	<b>4.14</b>	1.07	0.38	<b>-3.27</b>
Nb	7.66	4.25	4.94	2.99	5.23	2.22	<b>16.95</b>	<b>-3.81</b>	<b>-5.07</b>	<b>3.43</b>	0.68	<b>-2.18</b>
Mo	0.97	1.29	3.73	4.20	4.80	10.51	<b>-8.08</b>	<b>4.96</b>	<b>7.12</b>	-0.21	0.31	<b>3.42</b>
Ag	0.02	0.01	0.99	0.63	1.06	1.35	<b>9.47</b>	<b>7.16</b>	<b>9.57</b>	1.59	0.13	<b>3.14</b>
Cd	0.07	0.05	0.15	0.09	0.47	0.20	<b>11.89</b>	<b>2.64</b>	<b>6.20</b>	1.13	<b>1.99</b>	<b>2.98</b>
Sn	0.89	0.80	1.53	1.33	2.12	1.27	<b>6.30</b>	<b>4.87</b>	<b>6.32</b>	0.43	<b>1.98</b>	-0.69
Sb	0.52	0.40	0.93	0.73	1.44	0.93	<b>3.49</b>	<b>3.01</b>	<b>4.48</b>	1.49	<b>2.17</b>	1.68
Te	0.003	0.006	0.07	0.05	0.06	0.06	<b>-8.28</b>	<b>7.70</b>	<b>7.85</b>	0.84	-0.58	0.34
Hf	0.12	0.14	0.10	0.11	0.12	0.16	<b>-4.24</b>	-0.77	<b>-2.56</b>	-0.36	0.27	<b>3.11</b>
W	1.19	2.51	4.37	3.73	6.01	2.37	<b>-16.93</b>	<b>6.16</b>	<b>4.33</b>	1.59	1.61	<b>-2.13</b>
Au	0.0005	0.0005	1.27	1.45	1.21	1.87	-0.95	<b>19.58</b>	<b>20.42</b>	-0.64	-0.78	0.57
Tl	0.11	0.27	0.16	0.23	0.14	0.23	<b>-18.12</b>	<b>2.70</b>	<b>-1.83</b>	<b>-2.35</b>	-1.12	0.02
Pb	10	5	120	25	103	125	<b>15.29</b>	<b>6.37</b>	<b>5.89</b>	<b>2.68</b>	-0.15	<b>3.59</b>
Bi	0.05	0.05	1.71	2.03	3.13	3.42	-1.80	<b>17.59</b>	<b>17.90</b>	-0.28	1.49	<b>2.29</b>

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%.]

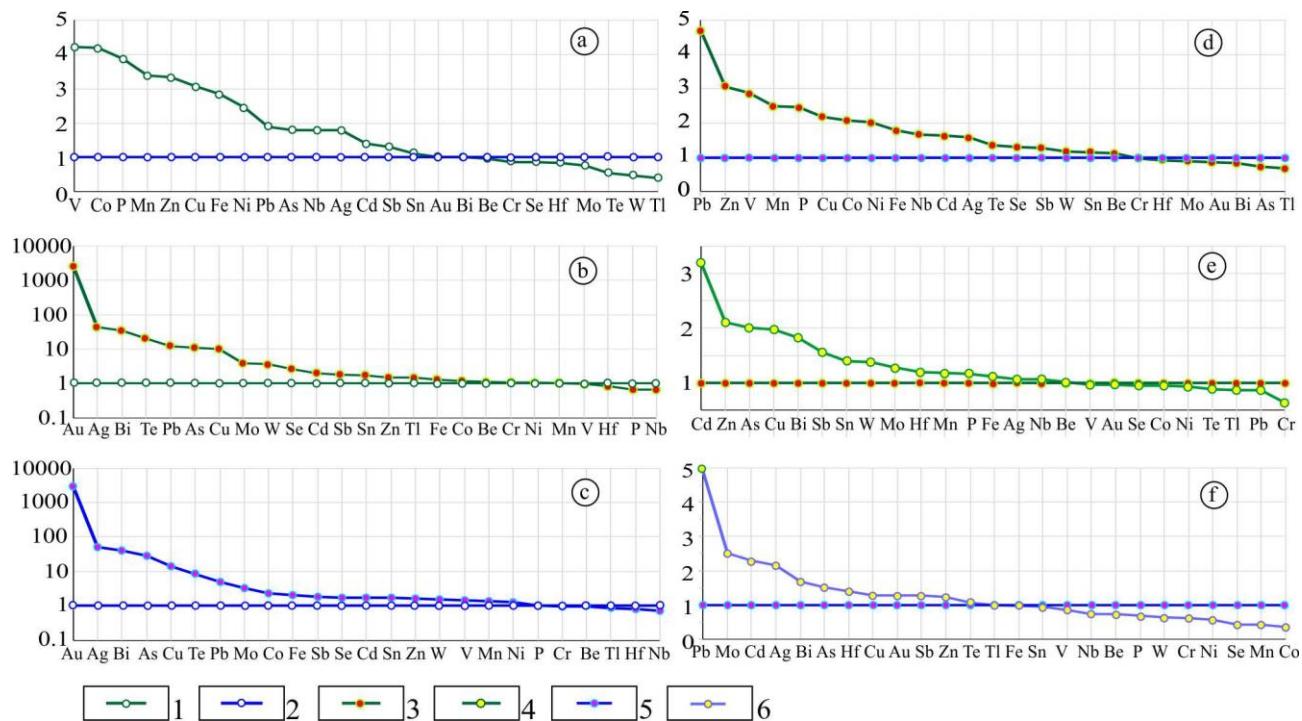
Из приведенных данных следует, что кварц-эпидот-хлоритовые сланцы отличаются от мусковит-кварцевых повышенными в 2.5–4 раза содержаниями V, Co, Mn, Zn, Cu, Fe, Ni, в 1.5–2 раза – Pb, As, Nb, Ag, Cd, Sb, Sn и пониженными в 1.5–2 раза концентрациями Te, Tl, W, Mo, Hf, Se (рис. 4a).

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. 4b). 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. 4c). 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 изrudовмещающей толщи (табл. 2, рис. 4d). 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, невскрытый массив гранитоидов, учитывая накопление в рудах коровых элементов W, Mo, Sn.



**Рис. 4.** Соотношение средних геометрических содержаний элементов в исходных породах и рудах Сохатиного месторождения: 1 – безрудные кварцево-эпидот-хлоритовые сланцы; 2 – безрудные мусковит-кварцевые сланцы; руды в кварцево-эпидот-хлоритовых сланцах: 3 – неокисленные, 4 – окисленные; руды в мусковит-кварцевых сланцах: 5 – неокисленные, 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 shales; ores in quartz-epidote-chlorite schists: (3) – unoxidized, (4) – oxidized; ores in muscovite-quartz shales: (5) – unoxidized, (6) – oxidized.]

При окислении руд, образованных по кварц-эпидот-хлоритовым сланцам, происходит полутора-двухкратное возрастание содержаний Zn, Cd, As, Sb, Sn на фоне выноса Cr (рис. 4e). 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. 4f).

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.

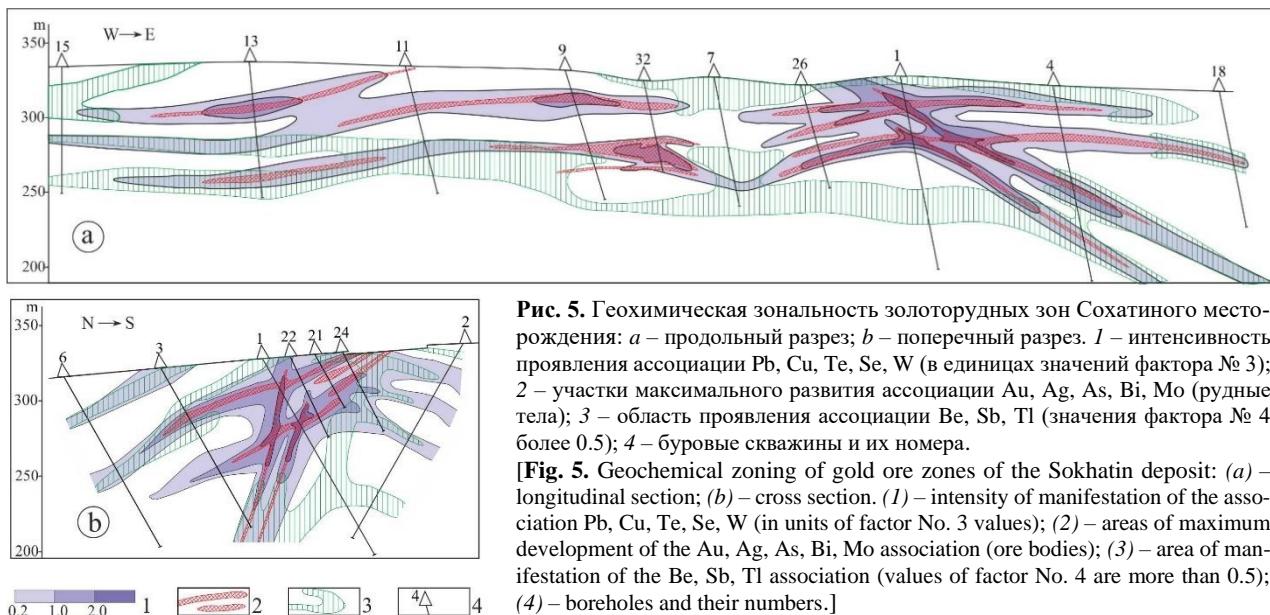
**Табл. 3.** Матрица факторных нагрузок для первичных ореолов Сохатиного месторождения

[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	<b>0.86</b>
P	<b>0.87</b>	-0.05	-0.12	0.19
V	<b>0.95</b>	-0.03	-0.02	0.04
Mn	<b>0.91</b>	-0.02	0.02	-0.02
Fe	<b>0.95</b>	0.11	0.08	0.12
Co	<b>0.97</b>	0.01	0.04	0.00
Ni	<b>0.71</b>	-0.05	0.09	-0.21
Cu	0.21	0.09	<b>0.77</b>	0.00
Zn	<b>0.91</b>	-0.02	0.11	0.16

Продолжение Табл. 3  
[Continued Table 3]

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



**Рис. 5.** Геохимическая зональность золоторудных зон Сохатиного месторождения: а – продольный разрез; б – 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 Сохатином 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<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, TiO<sub>2</sub>, Pb, Zn, Cd, As, Sb, Sn и вынос S, Cr. В зоне гипергенеза возрастает дисперсия содержаний Au с появлением участков его концентрированного накопления, средняя пробы 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, Tl.

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

#### ЛИТЕРАТУРА

- Горячев Н. А. Геология мезозойских золото-кварцевых жильных поясов Северо-Востока Азии. Магадан: Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 1998. 210 с.
- 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
- 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
- Шпикерман В. И. Домовая минерагения Северо-Востока Азии. Магадан: Изд-во СВКНИИ ДВО РАН, 1998. 333 с.
- Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия). Ред. Л. М. Парфенов, М. И. Кузьмин. М.: МАИК «Наука/Интерperiодика», 2001. 571 с.
- 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.
- Татаринов А. В., Яловик Л. И., Яловик Г. А. Золотое оруденение в надвиговых структурах Монголо-Охотского коллизионного шва (Пришилkinsкая и Онон-Туринская зоны) // *Тихоокеанская геология*. 2004. Т. 23. № 3. С. 22–31.
- 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
- Глухов А. Н., Калинин Ю. А., Буляков Г. Х. Коры выветривания Глухаринского рудно-rossysipnogo узла (Приколымское поднятие, Северо-Восток Азии) и их золотоносность // *Литология и полезные ископаемые*. 2020. № 5. С. 461–484. DOI:10.31857/S0024497X20050043
- Калинин Ю. А., Росляков Н. А., Прудников С. Г. Золотоносные коры выветривания юга Сибири. Новосибирск: "Гео", 2006. 339 с.
- Янченко О. М., Ворошилов В. Г., Тимкин Т. В., Зиани М. Минерально-geoхимическая зональность золотоносных кор выветривания Томь-Яйского междуречья // *Известия Томского политехнического университета. Инжениринг георесурсов*. 2019. Т. 330. № 2. С. 83–94. DOI:10.18799/24131830/2019/2/98
- Янченко О. М., Ворошилов В. Г., Тимкин Т. В., Мартыненко И. В., Зиани М. Морфология и состав золота кор выветривания Томь-Яйского междуречья // *Известия Томского политехнического университета. Инжениринг георесурсов*. 2019. Т. 330. № 3. С. 84–92. DOI:10.18799/24131830/2019/3/166
- 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 (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
- 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
- Тимкин Т. В., Ворошилов В. Г., Юркова М. В., Зиани М. Минералогия руд Сохатиного золоторудного месторождения (Северо-Восток Азии, Россия) // *Известия Томского политехнического университета. Инжениринг георесурсов* 2022. Т. 333. № 4. С. 53–65. DOI:10.18799/24131830/2022/4/3585
- 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
- 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
- Глухов А. Н., Савва Н. Е., Буляков Г. Х., Фомина М. И., Бирюков А. А. Самородное золото в рудах и россыпях Глухаринского рудно-rossysipnogo узла, Магаданская область // *Руды и металлы*. 2018. № 2. С. 55–65.
- 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.

UDC 553.411+551.311.231

ISSN 1609-0691

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/4/24-34>

Received: 14.04.2024

Accepted: 22.11.2024

Published online: 27.12.2024

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

©2024 V. G. Voroshilov<sup>✉</sup>, 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,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ , 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. Serija: Geologija – 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.

<sup>✉</sup> Valery G. Voroshilov, e-mail: v\_g\_v@tpu.ru

## REFERENCES

1. Goryachev N. A. *Geologia mezozoiskikh zoloto-kvartsevykh zhil'nykh poiasov Severo-Vostoka Azii* [Geology of mezozoic 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 orudeniya Prikolymskogo terreyna (Severo-Vostok Rossii) i yeye svyaz' so strukturoy i sostavom vmeschayushchikh kompleksov [Geochemical specialization of hydrothermal mineralization of the Kolyma terrane (North-East Russia) and its connection with the structure and composition of host complexes] *Tihookeanskaja geologija – 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 orudeniye v nadvigovykh strukturakh Mongolo-Okhotskogo kolizionnogo shva (Prishilinskaya i Onon-Turinskaya zony) [Gold mineralization in thrust structures of the Mongol-Okhotsk collision suture (Prishilka and Onon-Turin zones)]. *Tihookeanskaja geologija – 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 (Prikolymskoye 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 poleznye 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. *Zolotonosnye 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., Ziai M. Mineral'no-geokhimicheskaya zonal'nost' zolotonosnykh kor vyvetrivaniya Tom'-Yayskogo mezhdureshch'ya [Mineral-geochemical zonality of golden bearing weathering crust of the Tom-Yaya interflue]. *Izvestija 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., Ziai M. Morfologiya i sostav zolota kor vyvetrivaniya Tom'-Yayskogo mezhdureshch'ya [Morphology and composition of gold in weathering crust of the Tom-Yaya interflue]. *Izvestija 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 (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. Timkin T. V., Voroshilov V. G., Yurkova M. V., Ziai M. Mineralogiyarud Sokhatinogo zolotorudnogo mestorozhdeniya (Severo-Vostok Azii, Rossiya) [Mineralogy of ores of the Sokhatin gold deposit (North-East Asia, Russia)]. *Izvestija 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 rossypyah 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. Veshchestvenny 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.)

Ворощилов 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: logvinenko@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: logvinenko@tpu.ru; ORCID 0000-0002-7925-6150

Authors have read and approved the final manuscript.