

УДК 553.411+551.311.231
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5227
Шифр специальности ВАК 1.6.10
Научная статья

Геохимические критерии золотоносности кор выветривания Сухаринского рудного поля (Горная Шория)

В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин✉, Д.К. Молукпаева

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉timkin@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. В последние десятилетия в скарново-магнетитовых месторождениях Горной Шории выявлены высокие концентрации золота, которым не уделялось должного внимания в процессе отработки железорудных месторождений. Особый интерес представляют широко развитые здесь коры выветривания, в которых содержания золота иногда на порядок превышают его концентрацию в первичных рудах и ореолах рассеяния. Промышленное освоение этих объектов сдерживается, в том числе, нерешенностью ряда теоретических вопросов, включая взаимосвязь золотоносности кор выветривания и формирования аномальных геохимических полей. **Цель.** Выявить геохимические особенности кор выветривания Сухаринского рудного поля для решения вопросов прогнозирования их золотоносности. **Объект:** коры выветривания по породам, метасоматитам и рудам Сухаринского рудного поля. **Методы.** Химический состав пород определялся полуколичественным спектральным анализом на 24 элемента (Ag, Pb, Cu, Zn, Cd, As, Sn, Bi, Te, Mn, Co, Ni, Ti, V, Cr, P, Mo, W, B, Zr, Li, Sr, Ba, Fe) и спектрохимическим анализом на Au. В пробах с содержанием Au более 0,1 г/т дополнительно определялись Au и Ag атомно-абсорбционным и пробирным методами. Сравнение выборок с применением непараметрических критериев, дискриминантного и факторного анализов проведено с использованием программы STATISTICA. **Результаты и выводы.** Линейные золотоносные коры выветривания в Сухаринском рудном поле образовались в результате процессов окисления золотоносных березит-сульфидно-кварцевых и магнетит-сульфидных руд на фоне формирования мезозойских кор выветривания площадного типа. При образовании золотоносных кор выветривания происходило дополнительное накопление, в сравнении с исходными рудами, Au, Ag, As, Pb, Cu, Zn, Ni, Co, Fe, Mn, P, Bi, W, Mo, в меньшей мере – V, Zr, Ba, и существенное снижение концентраций Sr. Среднее содержание золота в бурых железняках, сформировавшихся по золотоносным магнетит-сульфидным рудам, возрастает при окислении на порядок. В охристо-глинистых корах выветривания по березит-сульфидно-кварцевым рудам среднее содержание Au существенно не изменяется, но резко возрастает дисперсия, что приводит к образованию локальных участков накопления металла.

Ключевые слова: коры выветривания, золото, геохимические критерии поисков, прогнозирование, Сухаринское рудное поле

Благодарности: исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 24-27-00022).

Для цитирования: Ворошилов В.Г., Тимкин Т.В., Молукпаева Д.К. Геохимические критерии золотоносности кор выветривания Сухаринского рудного поля (Горная Шория) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 9. – С. 71–84. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5227

UDC 553.411+551.311.231
DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5227
Scientific paper

Geochemical criteria of gold-bearing content of weathering crusts of the Sukharinskoe ore field (Gornaya Shoria)

V.G. Voroshilov, T.V. Timkin✉, D.K. Molukpaeva

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉timkin@tpu.ru

Abstract. Relevance. In recent decades, high concentrations of gold have been identified in the skarn-magnetite deposits of Gornaya Shoria. However, these deposits have not received due attention in developing iron ore deposits. Of particular interest are the weathering crusts that are extensively developed in this region, in which the gold content occasionally exceeds its concentration in primary ores and dispersion halos by an order of magnitude. The industrial development of these objects is constrained by a number of theoretical issues, including the relationship between the gold content of weathering crusts and the formation of anomalous geochemical fields. **Aim.** To identify the geochemical features of the weathering crusts of the Sukharinskoe ore field in order to resolve issues of predicting their gold content. **Object.** Weathering crusts in the rocks, metasomatites and ores of the Sukharinskoe ore field. **Methods.** Chemical composition of the weathering products was determined using semi-quantitative spectral analysis for 24 elements (Ag, Pb, Cu, Zn, Cd, As, Sn, Bi, Te, Mn, Co, Ni, Ti, V, Cr, P, Mo, W, B, Zr, Li, Sr, Ba and Fe), as well as spectrochemical analysis for gold (Au). In samples containing greater than 0.1 g/t of Au, the presence of Au and Ag was confirmed using atomic absorption and fire assay methods. The samples were then compared using non-parametric criteria, discriminant and factor analyses. These were carried out using the STATISTICA program. **Results and conclusions.** Linear gold-bearing weathering crusts in the Sukharinskoe ore field were formed as a result of oxidation of gold-bearing beresite-sulfide-quartz and magnetite-sulfide ores against the background of the formation of Mesozoic weathering crusts of the areal type. During the formation of gold-bearing weathering crusts, there was an additional accumulation, in comparison with the original ores, of Au, Ag, As, Pb, Cu, Zn, Ni, Co, Fe, Mn, P, Bi, W, Mo, to a lesser extent – V, Zr, Ba, and a significant decrease in Sr concentrations. The mean gold content in brown iron ores, which are formed subsequent to gold-bearing magnetite-sulfide ores, undergoes an increase by an order of magnitude during oxidation. In ochre-clay weathering crusts on beresite-sulfide-quartz ores, the average Au content remains relatively constant. However, dispersion exhibits a marked increase, resulting in the formation of localised areas of metal accumulation.

Keywords: weathering crusts, gold, geochemical criteria of exploration, forecasting, Sukharinskoe ore field

Acknowledgements: The research was funded by the Russian Science Foundation (project no. 24-27-00022).

For citation: Voroshilov V.G., Timkin T.V., Molukpaeva D.K. Geochemical criteria of gold-bearing content of weathering crusts of the Sukharinskoe ore field (Gornaya Shoria). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 9, pp. 71–84. DOI: 10.18799/24131830/2025/9/5227

Введение

Золотоносные коры выветривания являются важным источником расширения сырьевой базы золотодобывающей отрасли России. Несмотря на очевидные плюсы при разработке таких объектов (возможность открытой добычи, отсутствие необходимости дробления руд, достаточно простая технология извлечения золота при невысоких содержаниях), массовое вовлечение их в промышленное освоение сдерживается в том числе нерешенностью ряда теоретических вопросов накопления золота в глинистых корках выветривания [1–5].

Скарново-магнетитовые месторождения Горной Шории в течение многих лет разрабатывались как железорудные объекты. Выполненными в последние десятилетия исследованиями установлено, что большинство этих месторождений содержит значительные ресурсы золота, в том числе в корках выветривания [6]. Проведенными с участием авторов статьи поисково-ревизионными работами в Сухаринском рудном поле установлено широкое развитие как коренной золоторудной минерализации, так и кор выветривания с промышленными концентрациями золота.

Целью данного исследования является выявление геохимических критериев золотоносности кор выветривания Сухаринского рудного поля.

Геолого-структурная позиция золотоносных кор выветривания

Сухаринское рудное поле является западным флангом Тельбесского железорудного пояса, вытя-

нутого в широтном направлении на 50 км, и типичным представителем скарново-магнетитовых месторождений Горной Шории.

В основании стратиграфического разреза Сухаринского рудного поля залегают объединенные самарская и пасекская толщи (V_{sm+ps}), сложенные метаморфическими сланцами зеленосланцевой фации, алевролитами, известняками, вулканитами основного и кислого состава. Контакты с вышележащими породами тектонические.

Основную роль в геологическом строении Сухаринского рудного поля играют отложения сухаринской свиты (C_{1sh}), в пределах которой локализуется основная часть железорудной и золото-сульфидной минерализации. Свита подразделяется на две пачки: верхнюю (C_{1sh2}), сложенную алевролитами и аргиллитами с прослоями известняков, и нижнюю (C_{1sh1}), в которой преобладают карбонатные породы. Выше по разрезу залегают отложения адиакской свиты, подразделяемой на нижнюю (C_{1ad1}) и верхнюю (C_{1ad2}) подсвиты. Нижняя сложена конгломератами, с прослоями базальтов, верхняя – темно-серыми слоистыми известняками.

Магматические породы, занимающие значительную часть рудного поля, относятся к тельбесскому монцодиорит-гранодиорит-меланогранитовому комплексу. В рудном поле преобладают диориты (δD_{1t}) первой фазы комплекса, на восточном фланге площади они сменяются гранодиоритами ($\gamma \delta D_{1t}$) второй фазы. Дайки в рудном поле представлены преимущественно диабазами. В прикон-

тактовой зоне интрузий широко проявлены процессы скарнирования с образованием гранатовых, пироксеновых и пироксен-гранатовых скарнов. Завершился процесс скарнирования формированием магнетитовых месторождений, в настоящее время частично отработанных.

Золотое оруденение ассоциируется с зонами березит-кварцево-сульфидной минерализации, развивающейся как по периферии скарново-магнетитовых залежей, так и далеко за их пределами. Парагенетически золоторудная минерализация связана со становлением тельбесского гранитоидного комплекса. В структурном плане основное рудоконтролирующее значение имеют субширотные тектонические нарушения, являющиеся фрагментами региональных структур, контролирующих Тельбесско-Сухаринское горстовое поднятие [7].

Кварцево-золото-сульфидное оруденение формировалось в две стадии: пропилитовую и березитовую. С первой стадией, завершающей скарнообразование, ассоциируют магнетит-золото-сульфидные и золото-сульфидные руды с окolorудной актинолитизацией, эпидотизацией, хлоритизацией. Со второй стадией связано образование линейных зон золото-сульфидно-кварцевого состава с окolorудной березитизацией. Березиты преобладают в восточной части

рудного поля, пропилитовое оруденение проявлено на всей площади, но в максимальной степени – на ее западном фланге. Подобная зональность позволяет предполагать связь скарново-пропилитового процесса с формированием диоритов, а березитизации – со становлением гранодиоритовой фазы тельбесского комплекса. По характеру размещения и особенностям минерального состава в рудном поле выделяется около десяти объектов ранга месторождений, которые, в соответствии с задачами настоящего исследования, мы объединили в восемь участков, с сохранением их прежних названий (рис. 1): 1) Аргыш-Таг, 2) Дегтярный, 3) Малиновы, 4) Сухаринка Левобережная, 5) Сухаринка Западная, 6) Романовско-Кедровский, 7) Самарский I-II, 8) Самарский V.

Оба типа золоторудной минерализации сходны по набору рудных минералов и последовательности их отложения: пирит–арсенопирит–(сфалерит, халькопирит, галенит, пирротин, золото-1) – (теллуриды Ag, Bi, Pb, золото-2). Золото, встречающееся в пирите и арсенопирите, всегда находится в виде прожилков и в сростках с более поздними сульфидами. Наиболее ранняя магнетит-пирротиновая минерализация в березитах не выявлена. С другой стороны, характерным минералом кварцево-березитовых зон является турмалин, не встречающийся в пропилитах.

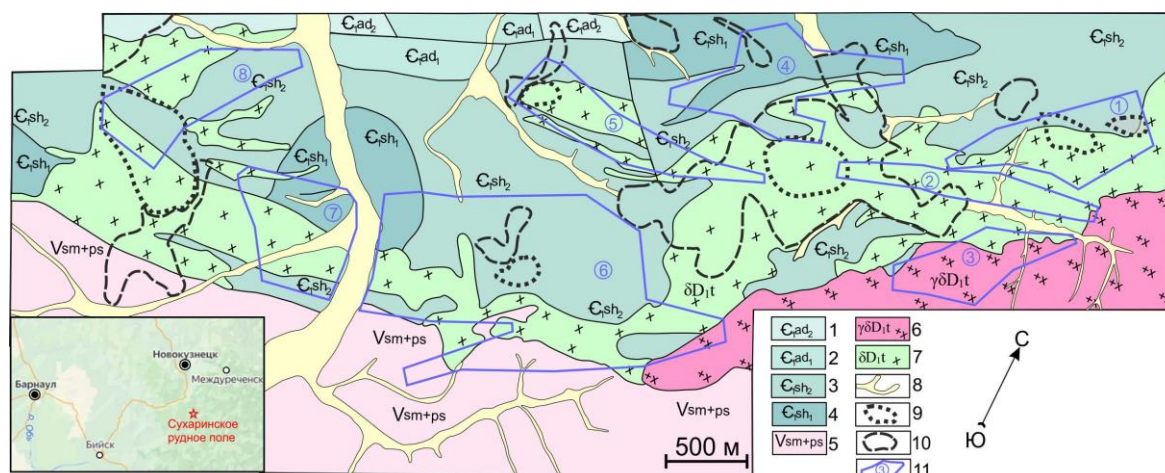


Рис. 1. Схема геологического строения Сухаринского рудного поля (по материалам ООО «Тетис-Т»): стратифицированные отложения: адиакая свита: 1 – верхняя подсвита (ϵ_{1ad_2}), известняки; 2 – нижняя подсвита (ϵ_{1ad_1}), известняки, алевролиты, конгломераты, базальты; сухаринская свита: 3 – верхняя пачка (ϵ_{1sh_2}), алевролиты, аргиллиты, известняки; 4 – нижняя пачка (ϵ_{1sh_1}), известняки, доломиты; 5 – объединенные самарская и пасекская толщи ($Vsm+ps$), метаморфические сланцы, алевролиты, известняки, вулканы основного и кислого состава; тельбесский магматический комплекс: 6 – гранодиориты; 7 – диориты; 8 – аллювиальные отложения; 9 – карьеры для добычи магнетитовой руды; 10 – отвалы карьеров; 11 – участки с выявленной золоторудной минерализацией: 1 – Аргыш-Таг, 2 – Дегтярный, 3 – Малиновы, 4 – Сухаринка Левобережная, 5 – Сухаринка Западная, 6 – Романовско-Кедровский, 7 – Самарский I-II, 8 – Самарский V

Fig. 1. Scheme of the geological structure of the Sukharinskoe ore field (based on materials from Tetis-T LLC): stratified deposits: Adiaka suite: 1 – upper subsuite (ϵ_{1ad_2}), limestones; 2 – lower subsuite (ϵ_{1ad_1}), limestones, siltstones, conglomerates, basalts; Sukharinskaya suite: 3 – upper member (ϵ_{1sh_2}), siltstones, argillites, limestones; 4 – lower member (ϵ_{1sh_1}), limestones, dolomites; 5 – combined Samara and Pasek strata ($Vsm+ps$), metamorphic schists, siltstones, limestones, basic and acid volcanics; Telbes igneous complex: 6 – granodiorites; 7 – diorites; 8 – alluvial deposits; 9 – magnetite ore quarries; 10 – quarry dumps; 11 – areas with identified gold ore mineralization: 1 – Argyshtag, 2 – Degtyarny, 3 – Malinovy, 4 – Sukharinka Levoberezhnaya, 5 – Sukharinka Zapadnaya, 6 – Romanovsko-Kedrovsky, 7 – Samarsky I-II, 8 – Samarsky V

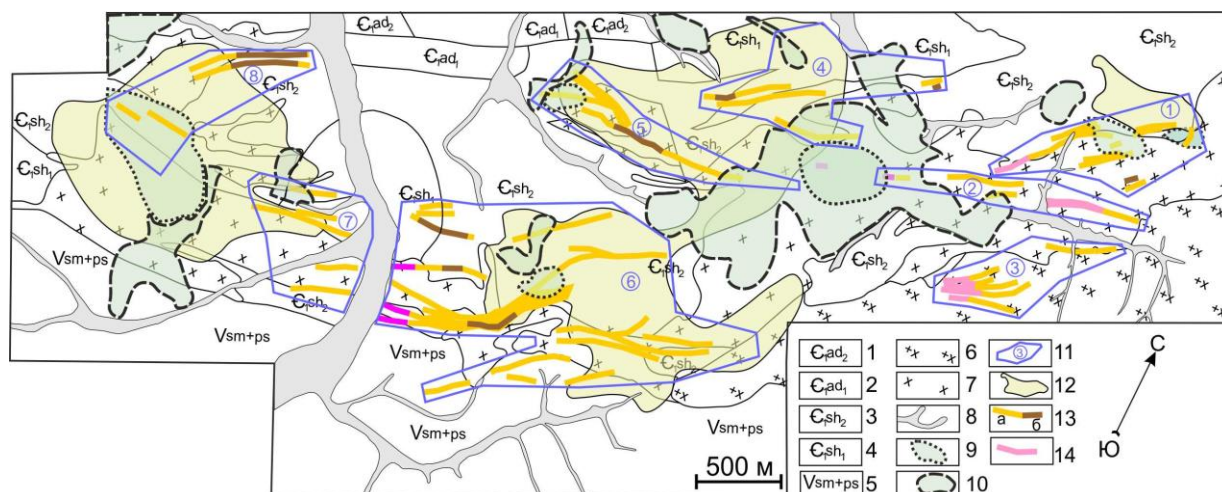


Рис. 2. Коры выветривания Сухаринского рудного поля: 1-11 – условные обозначения на рис. 1; 12 – площадные глинистые коры выветривания; 13 – линейные коры выветривания: а) охристо-глинистые, б) «железные шляпы»; 14 – выходы слабоокисленных золото-сульфидно-кварцевых руд

Fig. 2. Weathering crusts of the Sukharinskoe ore field: 1-11 – symbols are in Fig. 1; 12 – area clay weathering crusts; 13 – linear weathering crusts: a) ocher-clay, 6) gossan; 14 – outcrops of weakly oxidized gold-sulfide-quartz ores

Золото в первичных рудах очень мелкое, микронного размера, состав его практически не изучен. По результатам технологических исследований, выполненных ЦНИГРИ, в зоне окисления золото укрупняется до 0,1–0,3 мм, проба его в центральных частях зерен колеблется в пределах 700–880 промиле. На поверхности зерен проба золота либо достигает 1000 ‰, либо снижается до 500–600 ‰ (за счет образования вторичного сульфида серебра при окислении богатых серебром сульфидных руд).

На площади Сухаринского рудного поля широко развиты глинистые коры выветривания мелопалеогенового возраста. По морфологическим признакам их можно разделить на площадные и линейные (рис. 2). Среди линейных кор, с определенной долей условности, можно выделить линейно-трещинные и контактово-карстовые [8]. Площадные относятся к остаточным и переотложенным в карстовых полостях. Верхняя часть древней коры выветривания в значительной степени эродирована. Тем не менее мощность глинистых кор на водораздельных пространствах достигает 50 м, в карстовых полостях – до 100 и более метров. По классификации ЦНИГРИ эти сохранившиеся от эрозии коры можно отнести к щебнисто-глинистому типу [9]. В долинах водотоков площадные коры выветривания в существенной степени сэродированы и представлены только своей нижней, щебнистой, отчасти глинисто-щебнистой, частью.

Линейные коры выветривания развиваются над минерализованными зонами, содержащими сульфиды. Над березит-сульфидно-кварцевыми зонами формируются охристо-глинистые коры, магнетит-сульфидные и сульфидные руды окисляются до бурых железняков («железные шляпы»). В мине-

ральном составе продуктов выветривания преобладают кварц, каолинит, гетит, что позволяет отнести их к стадии гидратации, начального гидролиза [10].

Накопление золота в первичных рудах, а затем в корях выветривания и окисленных рудах сопровождается перераспределением широкого ряда элементов-спутников, что позволяет использовать структуру аномальных геохимических полей для прогнозирования площадей, перспективных для промышленного освоения золотоносных кор выветривания [11–20].

Фактический материал и методы исследования

В основу выполненных геохимических исследований положены результаты опробования, проведенного ООО Тетис-Т в ходе поисково-ревизионных работ на золото в 2006–2008 гг., в которых авторы статьи принимали участие в качестве исполнителей геохимической части проекта. Используются результаты анализов около 8000 бороздовых и керновых проб из скважин и горных выработок.

Все пробы проанализированы полуколичественным спектральным анализом на 24 элемента (Ag, Pb, Cu, Zn, Cd, As, Sn, Bi, Te, Mn, Co, Ni, Ti, V, Cr, P, Mo, W, B, Zr, Li, Sr, Ba, Fe) и спектрохимическим анализом на Au. В пробах с содержанием Au более 0,1 г/т дополнительно определялись Au и Ag атомно-абсорбционным и пробирным методами. Спектральный, спектрохимический и атомно-абсорбционный анализы выполнены в Аналитико-технологическом центре ОАО «НГПЭ» г. Новосибирска, все пробирные анализы выполнены в Аналитическом центре ОАО «ИРГИРЕДМЕТ» г. Иркутска.

Сравнение выборок с использованием непараметрических критериев и многомерных методов проведено с применением программы STATISTICA.

Результаты и обсуждения

В рудном поле распространены четыре основных типа рудовмещающих пород: 1) гранитоиды (диориты, гранодиориты); 2) алевролиты; 3) порфириды; 4) известняки. Их состав влияет на геохимические особенности локализованного в них оруденения и состав кор выветривания, поэтому для исследования поведения химических элементов в рудно-метасоматических и гипергенных процессах сформировано 18 выборок:

- I) первичные породы: 1) гранитоиды; 2) алевролиты; 3) порфириды; 4) известняки;
II) прожилково-вкрапленные руды в породах: 5) в гранитоидах; 6) в алевролитах; 7) в порфиридах; 8) в известняках;

- III) сливные золотоносные руды: 9) магнетит-сульфидные залежи;
IV) площадные щебнисто-глинистые коры выветривания: 10) по гранитоидам; 11) по алевролитам; 12) по порфиридам; 13) по известнякам;
V) линейные глинисто-охристые коры выветривания по зонам прожилково-вкрапленного оруденения: 14) в гранитоидах; 15) в алевролитах; 16) в порфиридах; 17) в известняках;
VI) «железные шляпы»: 18) бурые железняки по магнетит-сульфидным залежам.

Расчеты статистических параметров показывают, что во всех выборках распределение химических элементов не соответствует нормальному закону, поэтому для проверки гипотез о равенстве неизвестных средних использован непараметрический критерий Манна–Уитни [21, 22].

Перераспределение химических элементов при формировании площадной коры выветривания по породам различного состава отражает табл. 1.

Таблица 1. Сравнение содержаний химических элементов в исходных породах и площадных корях выветривания по этим породам

Table 1. Comparison of the contents of chemical elements in the original rocks and the areal weathering crusts of these rocks

Элемент Element	Средние арифметические значения Arithmetic mean values								Значения критерия Манна–Уитни Mann-Whitney test values			
	a	b	c	d	e	f	g	h	K(b/a)	K(d/c)	K(f/e)	K(h/g)
Au	0,006	0,005	0,010	0,009	0,008	0,004	0,007	0,007	-1,74	-0,94	-1,12	0,26
Ag	0,08	0,07	0,08	0,13	0,08	0,10	0,11	0,33	-2,36	2,84	2,53	2,60
Pb	1,2	1,4	1,2	1,4	1,3	1,6	1,6	5,3	-0,55	1,35	2,41	3,16
Cu	5,6	5,2	6,3	28,3	1,9	3,8	8,3	8,0	-0,42	3,90	4,42	-0,32
Zn	8,9	45,6	9,2	23,3	4,1	10,5	9,7	31,7	6,82	3,67	4,84	3,69
Cd	0,06	0,06	0,07	0,07	0,08	0,07	0,06	0,05	-0,06	2,19	0,40	-0,51
As	3,3	13,3	2,5	11,5	1,3	4,0	2,6	1,8	5,62	3,40	5,24	-0,80
Sn	0,22	0,12	0,44	0,14	0,13	0,19	0,20	0,2	-5,84	-1,73	5,97	-0,55
Bi	0,06	0,08	0,06	0,06	0,02	0,06	0,08	0,05	0,01	0,22	5,87	-1,81
Te	<0,50	<0,50	<0,50	<0,50	0,50	0,50	<0,50	<0,50	-	-	-	-
Mn	62	72	125	103	382	91	87	38	2,60	0,71	-4,78	-3,10
Co	1,2	1,7	1,2	1,8	0,5	2,1	1,4	0,6	4,31	2,74	5,25	-2,73
Ni	1,3	1,6	1,4	2,9	0,3	2,7	1,8	1,5	3,34	3,40	6,08	-0,60
Ti	151	313	229	283	36	341	185	383	6,53	1,50	5,08	4,04
V	7,2	7,9	7,2	14,2	5,0	10,8	8,6	15,5	2,00	3,86	3,81	3,17
Cr	11,3	1,5	2,9	4,1	1,2	4,3	6,8	1,8	-6,88	-0,60	5,38	-3,32
P	71,1	58,7	56,6	53,3	16,2	48,7	55,9	45,0	-1,71	-0,31	5,68	-1,94
Mo	0,13	0,10	0,16	0,14	0,05	0,10	0,15	0,09	-2,02	1,22	3,88	-2,72
W	0,27	0,28	0,27	0,21	0,48	0,22	0,36	0,28	-1,51	-0,19	7,11	0,29
B	17,8	8,5	4,5	2,6	0,9	4,5	4,9	1,8	-1,13	0,52	5,50	-0,66
Zr	7,9	13,3	9,4	13,0	2,5	14,7	7,2	8,7	2,91	2,44	5,94	2,08
Li	1,67	1,17	1,69	1,08	0,70	1,63	1,42	1,17	-5,06	-3,13	6,84	-1,28
Sr	21,3	6,8	27,5	8,5	19,6	8,5	24,4	4,7	-5,39	-3,75	-4,70	-3,53
Ba	26,9	22,4	25,9	22,5	5,5	25,3	21,6	14,2	-1,12	0,19	7,28	-1,34
Fe	3,1	2,8	3,3	2,4	2,5	2,7	3,4	2,5	-1,25	-0,19	0,43	-2,07

Примечание: выборки: a – гранитоиды; b – площадная кора выветривания по гранитоидам; c – алевролиты; d – площадная кора выветривания по алевролитам; e – известняки; f – площадная кора выветривания по известнякам; g – порфириды; h – площадная кора выветривания по порфиридам; K(b/a) – значение критерия Манна–Уитни при сравнении выборок b и a; при значении критерия более 1,96 (по модулю) выборки различаются с вероятностью >0,95 (выделено жирным шрифтом). Содержания Au и Ag – в г/т, Fe – в %, остальные элементы – в $n \cdot 10^{-3}$ %.

Note: samples: a – granitoids; b – areal weathering crust after granitoids; c – siltstones; d – areal weathering crust after siltstones; e – limestones; f – areal weathering crust after limestones; g – porphyrites; h – areal weathering crust after porphyrites; K(b/a) – Mann-Whitney criterion value for comparison of samples b and a; if the criterion value is more than 1.96 (by absolute value), the samples differ with probability >0.95 (highlighted in bold). Au and Ag contents – in g/t, Fe – in %, other elements – in $n \cdot 10^{-3}$ %.

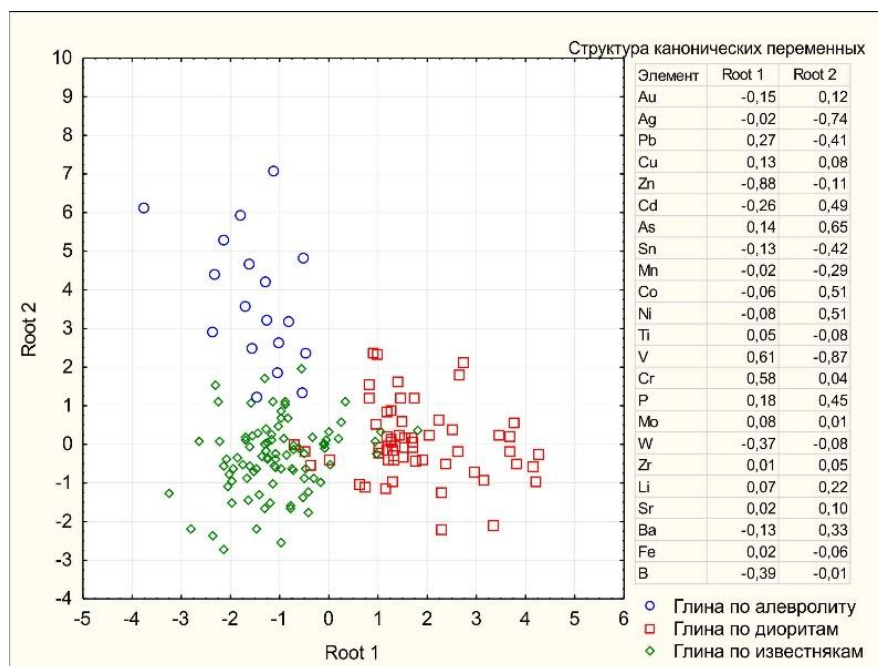


Рис. 3. Результат дискриминантного анализа выборок из площадных глинистых кор выветривания по различным субстратам

Fig. 3. Result of discriminant analysis of samples from areal clay weathering crusts on different substrates

Таблица 2. Сравнение содержаний химических элементов в исходных породах и прожилково-вкрапленных золотоносных рудах

Table 2. Comparison of the contents of chemical elements in the original rocks and vein-disseminated gold-bearing ores

Элемент Element	Средние арифметические значения Arithmetic mean values								Значения критерия Манна-Уитни Mann-Whitney test values			
	a	b	c	d	e	f	g	h	K(b/a)	K(d/c)	K(f/e)	K(h/g)
Au	0,006	0,172	0,010	0,342	0,011	0,200	0,007	0,465	11,81	11,17	10,45	9,58
Ag	0,09	0,90	0,08	3,91	0,16	1,55	0,11	2,11	8,68	9,82	9,93	8,27
Pb	1,3	5,7	1,2	57,5	4,4	49,1	1,6	13,2	2,69	5,64	8,16	7,57
Cu	6,2	163,4	6,3	319,2	3,1	141,1	8,3	57,4	9,56	10,75	10,50	7,92
Zn	9,9	30,2	9,2	53,3	7,7	146,6	9,7	24,9	7,15	3,83	10,63	5,36
Cd	0,06	0,09	0,07	0,24	0,08	0,27	0,06	0,08	3,35	2,91	4,34	0,81
As	3,6	62,5	2,5	58,5	1,7	22,9	2,6	99,9	4,68	3,58	6,56	11,09
Sn	0,22	0,65	0,44	0,75	0,12	0,37	0,20	0,30	5,35	4,23	6,81	5,49
Bi	0,07	0,22	0,06	0,73	0,04	0,24	0,08	0,75	4,45	5,39	6,44	4,99
Te	0,50	0,53	0,50	0,50	0,50	0,51	0,50	0,58	2,46	–	1,32	3,44
Mn	61	117	125	230	389	342	87	198	5,96	4,75	–1,57	3,56
Co	1,3	6,1	1,2	10,7	0,5	4,0	1,4	38,8	7,78	8,82	9,56	8,22
Ni	1,3	1,6	1,4	1,6	0,3	1,0	1,8	2,3	1,62	0,64	7,34	1,64
Ti	159	174	229	124	33	65	185	163	1,72	– 6,90	4,87	– 2,55
V	7,2	7,0	7,2	4,7	4,8	4,7	8,6	8,7	– 2,94	– 7,56	1,03	0,61
Cr	10,9	3,1	2,9	2,1	1,4	2,3	6,8	5,9	– 8,15	– 3,81	3,05	–0,71
P	70,6	82,0	56,6	39,9	15,4	34,3	55,9	64,1	2,82	– 4,97	5,52	2,07
Mo	0,13	0,12	0,16	0,14	0,06	0,09	0,15	0,40	– 3,36	–1,14	4,65	4,19
W	0,27	0,70	0,27	0,26	0,40	0,59	0,36	3,17	0,50	1,06	6,61	7,12
B	17,5	53,4	4,5	2,6	0,8	3,0	4,9	66,3	3,56	– 4,49	3,68	3,91
Zr	8,0	6,5	9,4	7,3	2,5	3,3	7,2	8,0	– 4,66	– 5,31	5,52	2,06
Li	1,67	1,71	1,69	1,29	0,71	0,97	1,42	1,69	0,90	– 4,79	4,81	1,60
Sr	20,1	20,6	27,5	30,9	20,8	22,9	24,4	14,7	0,17	0,47	1,52	– 4,78
Ba	26,5	27,9	25,9	19,0	5,4	11,4	21,6	22,3	0,07	– 3,83	5,78	1,47
Fe	3,1	5,1	3,3	7,3	2,6	4,5	3,4	4,7	5,04	7,11	6,90	5,20

Примечание: выборки: a – гранитоиды; b – прожилково-вкрапленные руды по гранитоидам; c – алевролиты; d – прожилково-вкрапленные руды по алевролитам; e – известняки; f – прожилково-вкрапленные руды по известнякам; g – порфириды; h – прожилково-вкрапленные руды по порфиридам. Остальные примечания – в табл. 1.

Note: samples: a – granitoids; b – veinlet-disseminated ores after granitoids; c – siltstones; d – veinlet-disseminated ores after siltstones; e – limestones; f – veinlet-disseminated ores after limestones; g – porphyrites; h – veinlet-disseminated ores after porphyrites. Other notes are in Table 1.

Состав глинистых кор выветривания в значительной степени определяется составом пород субстрата, что подтверждается результатами дискриминантного анализа: сформированные выборки занимают обособленные поля в координатах многомерных канонических переменных (рис. 3).

Кроме того, площадные коры выветривания заражены рядом «рудных» элементов (Zn, As, Cu, Ag), что связано с обилием линейных охристо-глинистых зон окисления минерализованных зон. Коры выветривания в известняках являются преимущественно карстовыми, часто переотложенными, поэтому обогащены комплексом элементов, не характерных для известняков. С процессом площадного корообразования можно уверенно связывать только остаточное накопление во всех выборках Ti, Co, Ni, Zr поскольку оно не противоречит общим закономерностям геохимии кор выветривания [23, 24].

Привнос-вынос элементов при березит-сульфидном оруденении различных типов исходных пород иллюстрирует табл. 2.

Во всех типах исходных пород формирование минерализованных золотоносных зон сопровождалось интенсивным привносом Au, Ag, Cu, Zn, As, Fe, Pb, Cd. Отмечается также устойчивое повышение в рудах содержаний Co, Sn, Bi, иногда Te. Источником этих элементов являлись, видимо, глубинные флюиды. Что касается Mo, W, Zr, Ti, Li, Ba, накопление их в рудах по известнякам сопровождалось синхронным выносом из диоритов и алевролитов. Миграция указанных элементов в гидротермальном процессе, видимо, связана с местным заимствованием из вмещающих пород и частичным переотложением в метасоматитах и рудах.

При формировании охристо-глинистых кор выветривания по зонам прожилково-вкрапленной минерализации отмечается существенное перераспределение химических элементов (табл. 3). Как и в площадных корах, установлено остаточное накопление Ti, Zr, Ni и интенсивный вынос Sr при выветривании всех типов пород.

Таблица 3. Сравнение содержаний химических элементов в прожилково-вкрапленных золотоносных рудах и сформированных по ним линейных охристо-глинистых корах выветривания

Table 3. Comparison of the contents of chemical elements in vein-disseminated gold-bearing ores and the linear ochre-clay weathering crusts formed on them

Элемент Element	Средние арифметические значения Arithmetic mean values								Значения критерия Манна-Уитни Mann-Whitney test values			
	a	b	c	d	e	f	g	h	K(b/a)	K(d/c)	K(f/e)	K(h/g)
Au	0,172	0,431	0,342	0,586	0,200	0,058	0,465	3,614	1,28	1,83	-6,13	4,32
Ag	0,90	3,39	3,91	3,56	1,55	0,86	2,11	3,48	6,33	0,60	-4,53	3,40
Pb	5,7	11,1	57,5	115,8	49,1	5,1	13,2	68,3	1,15	1,54	-5,53	0,10
Cu	163,4	179,3	319,2	274,9	141,1	35,1	57,4	307,0	2,76	-1,21	-1,33	6,11
Zn	30,2	63,8	53,3	73,2	146,6	38,5	24,9	77,9	3,24	4,44	-4,07	4,98
Cd	0,09	0,17	0,24	0,34	0,27	0,14	0,08	0,36	2,67	1,86	-0,08	5,92
As	62,5	81,4	58,5	145,7	22,9	60,4	99,9	104,1	4,84	4,94	8,07	0,54
Sn	0,65	0,65	0,75	0,81	0,37	0,27	0,30	0,31	-0,76	2,57	-0,70	-1,70
Bi	0,22	0,33	0,73	0,22	0,24	0,17	0,75	0,43	-1,16	1,10	3,33	1,97
Te	0,53	0,51	0,50	0,52	0,51	0,50	0,58	0,58	-1,29	1,55	-1,16	-0,78
Mn	117	148	230	155	342	253	198	107	1,07	-4,88	-2,96	-0,60
Co	6,1	9,0	10,7	5,8	4,0	6,5	38,8	8,6	4,56	-1,58	4,90	-0,69
Ni	1,6	2,1	1,6	2,7	1,0	3,2	2,3	2,4	2,44	6,31	10,15	2,01
Ti	174	206	124	249	65	339	163	298	1,33	6,36	10,91	6,30
V	7,0	6,7	4,7	7,6	4,7	11,9	8,7	8,6	-0,08	6,21	10,05	-0,24
Cr	3,1	2,5	2,1	2,5	2,3	4,7	5,9	2,1	-0,04	3,12	8,93	-6,02
P	82	100	40	139	34	105	64	106	-1,07	9,07	9,52	4,10
Mo	0,12	0,28	0,14	0,30	0,09	0,18	0,40	0,23	4,02	3,10	7,09	-0,43
W	0,70	2,20	0,26	0,33	0,59	0,71	3,17	0,48	6,76	3,10	7,57	-3,44
B	53,4	124,4	2,6	2,6	3,0	10,5	66,3	9,4	4,43	1,81	8,16	-1,96
Zr	6,5	9,5	7,3	10,5	3,3	12,6	8,0	10,2	5,73	4,09	11,39	3,62
Li	1,71	1,81	1,29	1,75	0,97	1,37	1,69	1,53	1,07	2,91	5,85	-0,27
Sr	20,6	8,1	30,9	7,3	22,9	7,4	14,7	10,8	-9,04	-9,02	-9,79	-2,07
Ba	27,9	29,4	19,0	48,8	11,4	24,9	22,3	25,1	0,71	1,39	7,76	0,92
Fe	5,1	4,7	7,3	7,2	4,5	5,8	4,7	5,1	-1,10	0,06	1,91	0,65

Примечание: выборки: а – прожилково-вкрапленные руды по гранитоидам; b – линейные коры по гранитоидам; c – прожилково-вкрапленные руды по алевролитам; d – линейные коры выветривания по алевролитам; e – прожилково-вкрапленные руды по известнякам; f – линейные коры выветривания по известнякам; g – прожилково-вкрапленные руды по порфиридам; h – линейные коры выветривания по порфиридам; Остальные примечания – в табл. 1.

Note: samples: a – veinlet-disseminated ores after granitoids; b – linear crusts after granitoids; c – veinlet-disseminated ores after siltstones; d – linear weathering crusts after siltstones; e – veinlet-disseminated ores after limestones; f – linear weathering crusts after limestones; g – veinlet-disseminated ores after porphyrites; h – linear weathering crusts after porphyrites; Other notes are in Table 1.

Для других элементов столь однозначной картины не получается. Au, Ag, As, Zn в большинстве случаев при окислении руд накапливаются, но в линейных корах выветривания по известнякам содержания золота и его элементов-спутников ниже, чем в исходных прожилково-вкрапленных рудах. Судя по всему, это связано с трещинно-карстовым характером линейных зон выветривания в известняках и значительным количеством в них переотложенных незолотоносных глин.

Отдельного рассмотрения заслуживает анализ геохимических особенностей бурых железняков («железных шляп»), наиболее перспективных в плане накопления значительных концентраций легко извлекаемого золота [25–30]. Образуются бурые железняки по магнетит-сульфидным залежам. Эти руды формируются в скарнах или околоскарновом пространстве и к конкретному виду исходных пород не привязаны. Поэтому для оценки поведения химических элементов при формировании таких руд их состав сравнивается с усредненным составом всего объема вмещающих пород.

Целесообразно также сравнить с вмещающими породами усредненный состав прожилково-

вкрапленных руд и кор выветривания, что позволяет снивелировать влияние состава исходных пород и более объективно оценить геохимические особенности процесса корообразования (табл. 4).

Обобщенный характер перераспределения химических элементов в процессах золотого оруденения, окисления руд и выветривания отражен на рис. 4. Средние содержания каждого из элементов в исходных породах приняты здесь за 1,0.

Приведенные в табл. 4 и на рис. 4 результаты показывают, что при образовании магнетит-сульфидных руд происходил интенсивный привнос Fe, Co, Au, Ag, Cu, As, Zn, P, в меньшей мере – Sn, Bi, Mn. При образовании по магнетит-сульфидным рудам «железных шляп» происходило дополнительное накопление того же комплекса элементов (за исключением Mn), а также Ni, Mo, W, Te. Особо следует отметить, что содержание Au в «железных шляпах» на порядок выше, чем в магнетит-сульфидных рудах, по которым они образовались. Наряду с положительными аномалиями указанных элементов золотоносные бурые железняки выделяются на фоне вмещающих пород пониженными концентрациями Cг и Sr.

Таблица 4. Сравнение содержаний химических элементов в исходных породах, рудах и корах выветривания

Table 4. Comparison of the contents of chemical elements in the original rocks, ores and weathering crusts

Элемент Element	Средние арифметические значения Arithmetic mean values						Значения критерия Манна–Уитни Mann–Whitney test values				
	a	b	c	d	e	f	K(b/a)	K(d/c)	K(f/e)	K(c/a)	K(e/a)
Au	0,007	0,008	0,586	0,528	0,102	6,378	0,61	–1,04	9,99	8,99	11,21
Ag	0,08	0,09	1,12	2,08	1,60	6,14	1,42	0,21	5,93	8,79	11,91
Pb	1,1	1,3	17,1	14,7	14,6	78,0	1,47	–1,98	5,29	8,45	6,03
Cu	5,0	5,0	47,1	219,9	126,1	211,2	0,96	5,47	2,64	6,93	14,01
Zn	7,1	9,8	15,3	103,0	46,0	175,5	7,46	5,57	7,05	6,45	6,53
Cd	0,06	0,06	0,05	0,49	0,24	1,20	0,87	4,66	6,45	–0,93	4,54
As	2,4	2,9	22,4	89,2	44,4	231,8	1,64	3,86	8,61	9,54	6,78
Sn	0,22	0,20	0,42	0,70	0,57	0,71	1,70	–0,52	0,16	7,03	5,11
Bi	0,05	0,07	0,10	0,22	0,96	1,55	1,99	1,06	4,52	6,67	5,09
Te	<0,50	0,52	<0,50	0,53	<0,50	0,71	–	–	–	–	–
Mn	150	84	73	243	170	183	–4,06	4,14	1,65	–2,98	3,46
Co	1,1	1,6	2,3	9,0	17,8	22,3	6,10	5,18	2,56	4,89	14,8
Ni	1,3	2,7	1,2	2,7	1,3	2,8	12,05	5,96	6,84	0,29	–0,79
Ti	148	431	170	219	101	149	15,25	0,85	2,65	1,78	–4,05
V	7,3	11,9	10,0	8,4	3,2	6,1	9,98	–3,04	7,30	4,55	–11,2
Cr	5,9	3,9	5,7	2,4	1,3	1,9	–0,88	–5,75	3,83	1,11	–8,91
P	51	60	75	117	61	121	2,78	3,11	7,04	5,07	2,46
Mo	0,12	0,13	0,34	0,24	0,08	0,53	1,24	–3,40	9,00	6,91	–4,89
W	0,33	0,23	4,80	1,03	0,39	0,63	–1,60	–6,42	5,33	8,78	1,93
B	7,3	3,2	167,9	30,4	3,6	41,4	–1,54	–7,63	0,97	8,50	–6,41
Zr	6,6	13,3	9,7	9,3	6,3	6,7	11,89	–1,78	0,33	5,47	–1,16
Li	1,3	1,7	1,4	1,4	1,1	2,2	5,99	–0,60	3,64	0,89	–1,14
Sr	23,5	8,4	11,0	7,8	12,1	9,8	–14,17	–4,40	–5,70	–5,75	–8,20
Ba	20,1	25,6	32,9	26,6	14,0	22,2	6,48	–3,42	1,12	4,55	–4,06
Fe	3,0	2,7	3,6	9,4	13,0	15,8	–2,95	5,78	1,85	2,80	15,35

Примечание: выборки: a – усредненный состав вмещающих пород; b – усредненный состав площадных кор выветривания; c – усредненный состав прожилково-вкрапленных руд; d – усредненный состав линейных кор выветривания; e – магнетит-сульфидные руды; f – бурые железняки («железные шляпы»). Остальные примечания – в табл. 1.

Note: samples: a – average composition of host rocks; b – average composition of areal weathering crusts; c – average composition of veinlet-disseminated ores; d – average composition of linear weathering crusts; e – magnetite-sulfide ores; f – brown iron ores («gossan»). Other notes are in Table 1.

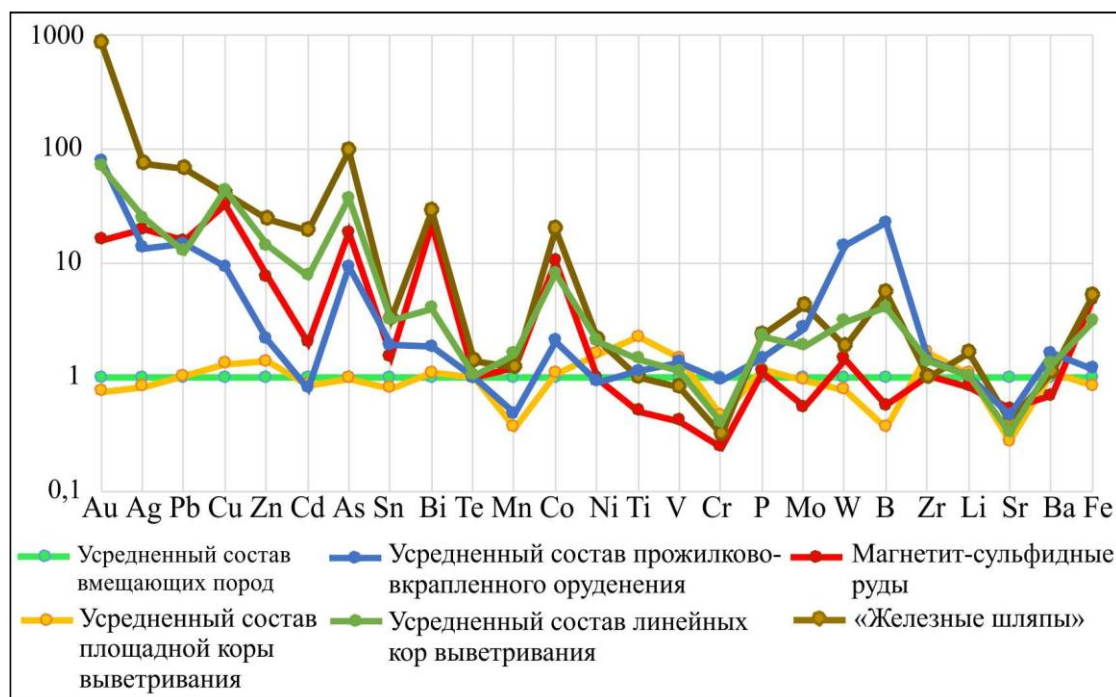


Рис. 4. Накопление и вынос химических элементов в процессах оруденения и выветривания относительно состава исходных пород

Fig. 4. Accumulation and removal of chemical elements in mineralization and weathering relative to the composition of the original rocks

Что касается прожилково-вкрапленного оруденения, можно отметить интенсивный, в сравнении с вмещающими породами, рост содержаний Au, Ag, As, Pb, Cu, Zn, Co, Bi, W, Mo, B, в меньшей мере – V, Zr, Ba, Fe, и существенное снижение концентраций Sr и Mn. При окислении этих руд происходило дополнительное накопление Cu, As, Zn, Cd, Ni, Co, Fe, Mn, P.

Площадные коры выветривания выделяются на фоне вмещающих пород повышенными в 2–3 раза содержаниями Ti, Ni, Zr и менее значительным остаточным накоплением V, Li, P. Повышенные концентрации в площадных корах Zn и Co следует, видимо, связывать с зараженностью кор продуктами окисления сульфидных руд. Статистически значимое, в сравнении с вмещающими породами, снижение концентрации Fe мы связываем с эрозией верхней, наиболее обогащенной железом, части площадной коры выветривания.

В рудном поле проявлена минерально-геохимическая зональность оруденения: с востока на запад, по мере удаления от интрузии гранодиоритов, исчезает турмалиновая минерализация, возрастает роль галенита и сфалерита относительно сульфидов меди. Факторным анализом в составе кор выветривания выявлено пять основных геохимических ассоциаций, размещение которых по площади рудного поля отражает исходную зональность первичных руд (табл. 5, рис. 5).

Таблица 5. Матрица факторных нагрузок для кор выветривания Сухаринского рудного поля

Table 5. Matrix of factor loading for weathering crusts of Sukharinskoe ore field

Элемент/Element	F1	F2	F3	F4	F5
Au	-0,02	-0,10	0,79	0,05	0,14
Ag	0,42	-0,04	0,44	-0,05	0,13
Pb	0,67	0,03	0,07	-0,09	0,12
Cu	-0,07	-0,08	0,27	0,06	0,61
Zn	0,76	0,01	-0,05	0,04	0,12
Cd	0,67	0,02	0,05	0,01	0,03
As	0,22	-0,16	0,49	0,14	0,17
Sn	0,10	-0,11	-0,03	-0,14	0,44
Bi	0,02	-0,10	0,33	0,00	0,13
Mn	0,71	-0,09	-0,07	0,08	-0,11
Co	0,02	-0,13	0,06	0,81	0,05
Ni	0,36	0,45	-0,03	0,44	0,25
Ti	-0,15	0,79	-0,06	-0,06	0,07
V	0,10	0,72	-0,03	0,04	-0,04
Cr	-0,05	0,45	0,06	0,20	-0,02
P	0,26	0,17	0,12	0,02	0,60
Mo	0,01	0,04	0,08	0,09	0,13
W	-0,05	0,07	0,72	-0,05	0,02
B	-0,06	-0,02	0,52	-0,02	-0,28
Zr	0,38	0,58	-0,03	-0,07	0,02
Li	-0,02	0,07	-0,03	0,81	-0,04
Sr	0,07	-0,10	0,09	-0,03	-0,41
Ba	0,38	0,18	0,06	0,10	-0,14
Fe	0,22	-0,52	0,05	0,13	0,39

Фактор 3 (Au, W, B, As, Ag) коррелирует составу золото-березит-сульфидно-кварцевых руд.

Максимальные значения этого фактора геометризуются в восточной части рудного поля, на участках Малиновы, Дегтярный и Аргыш-Таг, где в березитах развита интенсивная турмалинизация.

Фактор 5 (Cu, P, Sn) отражает, прежде всего, существенное обогащение кор медью. Его максимальные значения сменяют аномалии фактора 3 при движении в западном направлении. Эта ассоциация является определяющей на участках Сухаринка Левобережная и Сухаринка Западная.

Аномалии фактора 1 (Zn, Pb, Cd, Mn, Ag), отражающего развитие галенит-сфалеритовой минерализации в первичных рудах, характерны для центральной и западной частей площади, знаменуя собой смену медной минерализации свинцово-цинковой. На участках Самарский I-II и Самарский V свинцово-цинковая ассоциация преобладает, в пределах Кедровско-Романовского участка оба типа аномалий развиты в равной мере.

Фактор 2 (Ti, Ni, V, Zr) объединяет элементы, накапливающиеся при площадном выветривании и характеризует интенсивность этого процесса. Соответственно, аномалии значений этого фактора близки к контурам сохранившегося от эрозии ареала глинистых кор выветривания.

Фактор 4 (Ni, Co) – классическая ассоциация фронтальных зон аномальных геохимических полей, связанных с сульфидсодержащими месторождениями. Она характерна для внешних границ месторождений и рудного поля в целом. Этот фактор образует локальные аномалии внутри контуров фактора 2 и отдельно на рис. 5 не показан.

В профиле коры выветривания наиболее высокие концентрации золота и интенсивные аномалии элементов-спутников соответствуют бурым железнякам (рис. 5, 6). Индикаторным элементом таких образований является Pb. Цинк тоже коррелируется со свинцом, но из-за высокой подвижности в гипергенных условиях этот элемент дает менее контрастные размытые аномалии, и на рис. 6 они не показаны. Более локальные линейные коры выветривания по зонам прожилково-вкрапленной минерализации фиксируются только аномалиями Cu. Свинец и цинк здесь в заметных концентрациях отсутствуют.

Аномально низкие концентрации Sr, как в площадных, так и в линейных корах выветривания, однозначно указывают на вынос этого элемента при корообразовании. Переотложение его в виде карбоната предполагается в нижней части зоны дезинтеграции, на глубинах 60–150 м, где по скважинам картируются субгоризонтальные положительные аномалии Sr (рис. 6). Примечательно, что именно на этой глубине геофизическими методами фиксируется нижняя граница коры выветривания.

Из приведенных данных следует, что при формировании золото-березит-сульфидно-кварцевых и золото-магнетит-сульфидных руд происходит принос сходного комплекса химических элементов, главными из которых являются Au, Ag, Zn, Cu, As, Pb, Fe, Co. При окислении руд происходит дальнейшее накопление элементов-спутников в коре выветривания. Поведение золота при этом различается в зависимости от типа исходного субстрата.

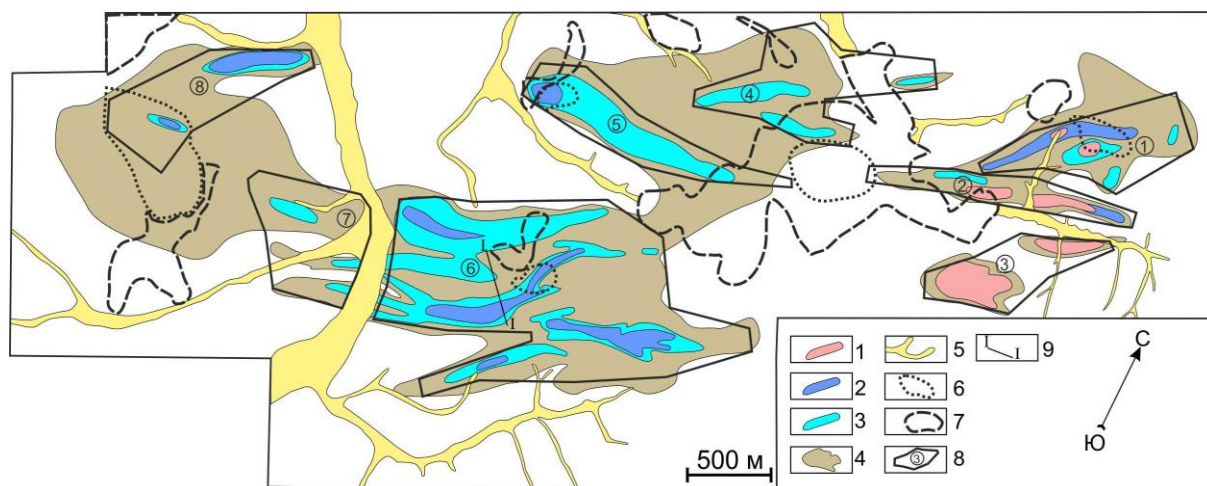


Рис. 5. Латеральная геохимическая зональность глинистых кор выветривания Сухаринского рудного поля: участки развития геохимических ассоциаций, выявленных факторным анализом (значения фактора $>0,5$): 1 – Au, W, B, As, Ag; 2 – Zn, Pb, Cd, Mn, Ag; 3 – Cu, P, Sn; 4 – Ti, Ni, V, Zr; 5 – аллювиальные отложения; 6 – карьеры для добычи магнетитовой руды; 7 – отвалы карьеров; 8 – участки с выявленной золоторудной минерализацией; 9 – линия геохимического разреза на рис. 6

Fig. 5. Lateral geochemical zoning of clay weathering crusts of the Sukharinskoe ore field: areas of development of geochemical associations revealed by factor analysis: 1 – Au, W, B, As, Ag; 2 – Zn, Pb, Cd, Mn, Ag; 3 – Cu, P, Sn; 4 – Ti, Ni, V, Zr; 5 – alluvial deposits; 6 – quarries for magnetite ore extraction; 7 – quarry dumps; 8 – areas with identified gold ore mineralization; 9 – line of geochemical section in Fig. 6

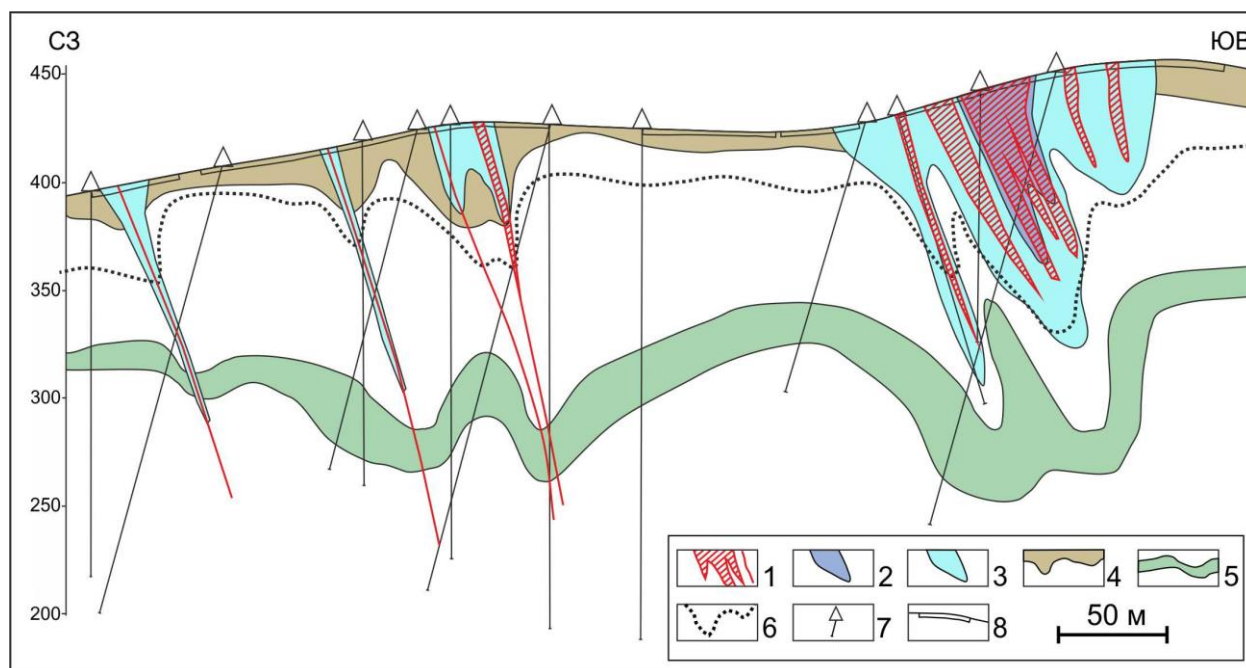


Рис. 6. Аномальные концентрации некоторых элементов в профиле площадной и линейных кор выветривания: 1 – $Au > 1,0$ г/т; 2 – $Pb > 20 \cdot 10^{-3}$ %; 3 – $C > 20 \cdot 10^{-3}$ %; 4 – участки развития геохимической ассоциации Ti, Ni, V, Zr (значения фактора $2 > 0,5$); 5 – аномальные концентрации Sr ($> 40 \cdot 10^{-3}$ %); 6 – нижняя граница глинистой коры выветривания (зоны гидратации-начального гидролиза); 7 – буровые скважины; 8 – канавы и траншеи

Fig. 6. Anomalous concentrations of some elements in the profile of the areal and linear weathering crusts: 1 – $Au > 1.0$ ppb; 2 – $Pb > 20 \cdot 10^{-3}$ %; 3 – $Cu > 20 \cdot 10^{-3}$ %; 4 – areas of development of geochemical associations of Ti, Ni, V, Zr (values of factor $2 > 0.5$); 5 – anomalous concentrations of Sr ($> 40 \cdot 10^{-3}$ %); 6 – lower boundary of the clay weathering crust (hydration-initial hydrolysis zones); 7 – boreholes; 8 – ditches and trenches

При окислении золото-березит-сульфидно-кварцевых руд среднее содержание Au существенно не меняется, но возрастает дисперсия, в результате чего образуются участки обогащения, где содержания гипергенного золота в разы превышают исходные концентрации металла.

При формировании по магнетит-сульфидным рудам «железных шляп» происходит интенсивное накопление Au, на порядок выше, чем в исходных рудах (до 190 г/т). При этом следует иметь в виду, что при образовании бурых железняков по бес-сульфидным магнетитовым рудам золото и перечисленные элементы-спутники не накапливаются, поскольку в первичных рудах их практически нет.

Таким образом, геохимическим критерием высокой золотоносности линейных кор выветривания являются комплексные интенсивные аномалии Au, Ag, Cu, Zn, Pb, As, Bi, Co, Ni. Как и для всех коровых образований, чрезвычайно характерным является интенсивный вынос Sr в нижележащие горизонты.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что линейные золотоносные коры выветривания в Сухаринском рудном поле образовались в результате процессов окисления золотоносных

березит-сульфидно-кварцевых и магнетит-сульфидных руд на фоне формирования мезозойских кор выветривания площадного типа.

При образовании золото-березит-сульфидных вкрапленных руд происходил привнос Au, Ag, As, Pb, Cu, Zn, Co, Bi, W, Mo, B, в меньшей мере – V, Zr, Ba, Fe, и существенное снижение концентраций Sr и Mn. При их окислении образуются линейные охристо-глинистые коры, дополнительно обогащенные, по сравнению с первичными рудами, Cu, As, Zn, Cd, Ni, Co, Fe, Mn, P. Среднее содержание Au, в сравнении с первичными рудами, существенно не меняется, но возрастает дисперсия, в результате чего образуются участки обогащения, где содержания гипергенного золота в разы превышают исходные концентрации металла.

При формировании золотоносных магнетит-сульфидных руд происходил интенсивный привнос Fe, Co, Au, Ag, Cu, As, Zn, P, в меньшей мере – Sn, Bi, Mn. При образовании по магнетит-сульфидным рудам «железных шляп» происходило дополнительное накопление того же комплекса элементов (за исключением Mn), а также Ni, Mo, W, Te. Наряду с положительными аномалиями этих элементов золотоносные бурые железняки выделяются на фоне вмещающих пород пониженными концентрациями Sr. Среднее содержание золота в бурых же-

лезняках, сформировавшихся по золотоносным магнетит-сульфидным рудам, возрастает при окислении на порядок, в локально обогащенных участках «железных шляп» содержание золота достигает сотен г/т.

Первоочередным геохимическим критерием высокой золотоносности линейных кор выветривания Сухаринского рудного поля являются комплексные интенсивные аномалии Au, Ag, Cu, Zn, As, Bi, Pb, Co, Ni, сопряженные с отрицательными аномалиями Sr.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Reich M., Vasconcelos P.M. Geological and economic significance of supergene metal deposits // *Elements*. – 2015. – Vol. 11. – № 5. – P. 305–310. DOI: 10.2113
2. Калинин Ю.А., Росляков Н.А., Прудников С.Г. Золотоносные коры выветривания юга Сибири. – Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2006. – 339 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/6493> (дата обращения 15.06.2025).
3. Craw D., MacKenzie D.J., 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
4. 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 (2). – 104049. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104049
5. Supergene gold enrichment in the Castromil-Serra da Quinta gold deposit, NW Portugal / C. Cruz, F. Noronha, P. Santos, J.K. Mortensen, A. Lima // *Mineralogical Magazine*. – 2018. – Vol. 82. – Supplement S1. – P. 307–320. DOI: <https://doi.org/10.1180/minmag.2017.081.063>.
6. Платонов А.Н., Санин В.Н. Золотоносность скарно-магнетитовых месторождений Алтае-Саянской складчатой области // *Руды и металлы*. – 1998. – № 2. – С. 57–66. URL: <https://elibrary.ru/zdmnng> (дата обращения 15.06.2025).
7. Корреляция магматических и метаморфических комплексов западной части Алтае-Саянской складчатой области / С.П. Шокальский, Г.А. Бабин, А.Г. Владимиров, С.М. Борисов и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 187 с.
8. Голенев В.Б. Геолого-методические основы разведки месторождений золота в глинистых корках выветривания. – М.: ЦНИГРИ, 2006. – 276 с.
9. Геолого-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений золота в корках выветривания / Н.М. Риндзюнская, Т.П. Зубова, В.Б. Голенев и др. / под ред. А.И. Иванова. – М.: ФГБУ «ЦНИГРИ», 2023. – 162 с.
10. Риндзюнская Н.М., Полякова Т.П., Берзон Р.О. Месторождения золота в корках выветривания // *Руды и металлы*. – 1992. – № 1. – С. 62–69.
11. Geochemical mapping by stream sediments of the NW portion of Quadrilátero Ferrífero, Brazil: application of the exploratory data analysis (EDA) and a proposal for generation of new gold targets in Pitangui gold district / E.D. Marques, C.C. Castro, R. de Assis Barros, J.C. Lombello, M. de Souza Marinho, J.C.S. Araújo, E.A.M. Santos // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2023. – Vol. 250. – P. 1–25. DOI: 10.1016/j.gexplo.2023.107232
12. Carranza E.J.M. Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2011. – Vol. 110. – № 2. – P. 167–185. DOI: 10.1016/j.gexplo.2011.05.007
13. Grunsky E.C. The interpretation of geochemical survey data // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2010. – Vol. 10. – P. 27–74. DOI: 10.1144/1467-7873/09-210
14. Позднякова Н.Н., Зубова Т.П. Типоморфизм самородного золота как критерий определения типа золоторудной минерализации в корках выветривания Еравнинского рудного района (Республика Бурятия) // *Отечественная геология*. – 2024. – № 1. – С. 43–52. DOI: 10.47765/0869-7175-2024-10004
15. Зубова Т.П., Позднякова Н.Н. Минералого-геохимические поисковые признаки золото-полисульфидно-кварцевого оруденения в ряду «коренной источник – кора выветривания – россыпь» (на примере Урала) // *Отечественная геология*. – 2022. – № 1. – С. 49–58. DOI: 10.47765/0869-7175-2022-10003
16. Агибалов О.А., Зубова Т.П., Позднякова Н.Н. Отражение особенностей вещественного состава золотоносной коры выветривания в минералогических ореолах и геохимических аномалиях на примере отдельных участков Еравнинской перспективной площади (Республика Бурятия) // *Отечественная геология*. – 2023. – № 1. – С. 34–45. DOI: 10.47765/0869-7175-2023-10003
17. Геохимические критерии золотоносности кор выветривания Томь-Яйского междуречья / В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин, О.В. Савинова, Д.К. Молукпаева // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 37–48. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4659.
18. Геохимические критерии золотоносности первичных и окисленных руд Сохатинского месторождения (Северо-Восток России) / В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин, Д.К. Молукпаева, О.В. Савинова // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия Геология*. – 2024. – № 4. – С. 24–34. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/4/24-34>
19. Изменения минерального состава пород в ряду «коренной источник – кора выветривания – россыпь» на примере золоторудного месторождения Хлебобёк (Бодайбинский район, Иркутская область) / Ю.А. Кузнецов, В.П. Грибанов, С.Д. Варфоломеев, В.Н. Калиниченко, А.А. Дубков, А.А. Гулин, А.В. Жабин, Г.С. Золотарева // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. – 2024. – № 1. – С. 32–48. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/1/32-48>
20. Reimann C., Filzmoser P., Garrett R. Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities // *Applied Geochemistry*. – 2002. – Vol. 17. – № 3. – P. 185–206. DOI: 10.1016/S0883-2927(01)00066-X
21. Ворошилов В.Г. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. – Томск: ТПУ, 2011. – 104 с. URL: https://portal.tpu.ru/SHARED/v/V_G_V/1/Tab1/Posobie_GHM.pdf (дата обращения 15.06.2025).
22. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/37751> (дата обращения 15.06.2025).

23. Михайлов Б.М. Принципы и методы оценки рудоносности геологических формаций. Рудоносные коры выветривания. – Л.: Недра, 1986. – 238 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/3630> (дата обращения 15.06.2025).
24. Кора выветривания. Вып. 6: Региональное развитие кор выветривания в СССР. – М.: АН СССР, 1963. – 320 с.
25. Dos Santos P.H.C., Da Costa M.L., Roerdink D.L. Geochemical and isotopic fractionation in the hypogene ore, gossan, and saprolite of the Alvo 118 deposit: implications for copper exploration in the regolith of the Carajás Mineral Province // *Minerals*. – 2023. – Vol. 13 (11). DOI: 10.3390/min13111441
26. 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
27. 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 / G.L.C. Pires, C. Renac, E.M. Bongioiolo, R. Neumann // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2020. – Vol. 218. DOI: /10.1016/j.gexplo.2020.106615
28. Ozdemir A., Sahinoglu A. Important of gossans in mineral exploration: a case study in Northern Turkey // *International Journal of Earth Science and Geophysics*. – 2018. – Vol. 4 (1). DOI: 10.35840/2631-5033/1819
29. Supergene features and evolution of gossans capping massive sulphide deposits in the Iberian Pyrite Belt / F. Velasco, J.M. Herrero, S. Suárez, I. Yusta, A. Alvaro, F. Tornos // *Ore Geology Reviews*. – 2013. – Vol. 53. – P. 181–203. DOI: [org/10.1016/J.OREGEOREV.2013.01.008](https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2013.01.008)
30. Scott K.M., Ashley P.M., Lawie D.C. The geochemistry, mineralogy and maturity of gossans derived from volcanogenic Zn–Pb–Cu deposits of the eastern Lachlan Fold Belt, NSW, Australia // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2001. – Vol. 72 (3). – P. 169–191. DOI: 10.1016/S0375-6742(01)00159-5

Информация об авторах

Валерий Гаврилович Ворошилов, доктор геолого-минералогических наук, профессор Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; v_g_v@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0955-5750>

Тимофей Васильевич Тимкин, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; timkin@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-8113-3555>

Диана Калибековна Молукпаева, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; dkm3@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0495-4456>

Поступила в редакцию: 30.06.2025

Поступила после рецензирования: 14.07.2025

Принята к публикации: 04.08.2025

REFERENCES

1. Reich M., Vasconcelos P.M. Geological and economic significance of supergene metal deposits. *Elements*, 2015, vol. 11, no. 5, pp. 305–310. DOI: 10.2113
2. Kalinin Yu.A., Roslyakov N.A., Prudnikov S.G. *Gold-bearing weathering crusts of southern Siberia*. Novosibirsk, Geo Academic Publ. House, 2006. 339 p. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/qkgacp> (accessed 15 June 2025).
3. Craw D., MacKenzie D.J., 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
4. 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 (2), 104049. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104049
5. Cruz C., Noronha F., Santos P., Mortensen J.K., Lima A. Supergene gold enrichment in the Castromil-Serra da Quinta gold deposit, NW Portugal. *Mineralogical Magazine*, 2018, vol. 82, supplement S1, pp. 307–320. DOI: <https://doi.org/10.1180/minmag.2017.081.063>
6. Platonov A.N., Sanin V.N. Gold-bearing skarn-related magnetite deposits of the Altai-Sayan fold area. *Ores and metals*, 1998, no. 2, pp. 57–66. (In Russ.) Available at: <https://elibrary.ru/zdmnng> (accessed 15 June 2025).
7. Shokalskiy S.P., Babin G.A., Vladimirov A.G., Borisov S.M. *Correlation of igneous and metamorphic complexes of the western part of the Altai-Sayan folded region*. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ. house, 2000. 187 p. (In Russ.)
8. Golenev V.B. *Geological and methodological principles of exploration of gold deposits in clay weathering crusts*. Moscow, TSNIGRI Publ., 2006. 276 p. (In Russ.)
9. Rindzyunskaya N.M., Zubova T.P., Golenev V.B. *Geological and methodological foundations for forecasting, prospecting and evaluating gold deposits in weathering crusts*. Moscow, TSNIGRI Publ., 2023. 162 p. (In Russ.)
10. Rindzyunskaya N.M., Polyakova T.P., Berzon R.O. Gold deposits in weathering crusts. *Ores and metals*, 1992, no. 1, pp. 62–69. (In Russ.)
11. Marques E.D., Castro C.C., De Assis Barros R., Lombello J.C., De Souza Marinho M., Araújo J.C.S., Santos E.A.M. Geochemical mapping by stream sediments of the NW portion of Quadrilátero Ferrífero, Brazil: application of the exploratory data analysis (EDA) and a proposal for generation of new gold targets in Pitangui gold district. *Journal of Geochemical Exploration*, 2023, vol. 250, pp. 1–25. DOI: 10.1016/j.gexplo.2023.107232
12. Carranza E.J.M. Analysis and mapping of geochemical anomalies using logratio-transformed stream sediment data with censored values. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, vol. 110, no. 2, pp. 167–185. DOI: 10.1016/j.gexplo.2011.05.007

13. Grunsky E.C. The interpretation of geochemical survey data. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2010, vol. 10, pp. 27–74. DOI: 10.1144/1467-7873/09-210
14. Pozdnyakova N.N., Zubova T.P. Typomorphism of native gold as a criterion for determining the type of gold ore mineralization in the weathering crusts of the Eravninsky ore region (Republic of Buryatia). *Domestic geology*, 2024, no. 1, pp. 43–52. (In Russ.) DOI: 10.47765/0869-7175-2024-10004
15. Zubova T.P., Pozdnyakova N.N. Mineralogical and geochemical search features of gold-polysulfide-quartz mineralization in the series "original source – weathering crust – placer" (on the example of the Urals). *Domestic geology*, 2022, no. 1, pp. 49–58. (In Russ.) DOI: 10.47765/0869-7175-2022-10003
16. Agibalov O.A., Zubova T.P., Pozdnyakova N.N. Reflection of the features of the material composition of the gold-bearing weathering crust in mineralogical halos and geochemical anomalies on the example of individual sections of the Eravninskaya prospective area (Republic of Buryatia). *Domestic geology*, 2023, no. 1, pp. 34–45. (In Russ.) DOI: 10.47765/0869-7175-2023-10003
17. Voroshilov V.G., Timkin T.V., Savinova O.V., Molukpaeva D.K. Geochemical criteria of the gold content of the Tom-Yaya interfluvial weathering crusts. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 8, pp. 37–48. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4659
18. Voroshilov V.G., Timkin T.V., Molukpaeva D.K., Savinova O.V. Geochemical criteria for gold content of primary and oxidized ores of the Sokhatino deposit (North-East Russia). *Bulletin of Voronezh State University. Geology series*, 2024, no. 4, pp. 24–34. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/4/24-34>
19. Kuznetsov Yu.A., Gribanov V.P., Varfolomeev S.D., Kalinichenko V.N., Dubkov A.A., Gulina A.A., Zhabina A.V., Zolotareva G.S. Changes in the mineral composition of rocks in the series "original source – weathering crust – placer" on the example of the Khlebopek gold deposit (Bodaibo district, Irkutsk region). *Bulletin of Voronezh State University. Geology series*, 2024, no. 1, pp. 32–48. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2024/1/32-48>
20. Reimann C., Filzmoser P., Garrett R. Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 2002, vol. 17, no. 3, pp. 185–206. DOI: 10.1016/S0883-2927(01)00066-X
21. Voroshilov V.G. *Geochemical methods of mineral deposits exploration*. Tomsk, TPU Publ. house, 2011. 104 p. (In Russ.) Available at: https://portal.tpu.ru/SHARED/v/V_G_V/1/Tab1/Posobie_GHM.pdf (accessed 15 June 2025).
22. Borovikov V. *STATISTICA. The art of data analysis on a computer: for professionals*. St Petersburg, Piter Publ., 2003. 688 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/37751> (accessed 15 June 2025).
23. Mikhailov B.M. *Principles and methods for assessing the ore content of geological formations. Ore-bearing weathering crusts*. Leningrad, Nedra Publ., 1986. 238 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/3630> (accessed 15 June 2025).
24. *Weathering crust. Part 6: Regional development of weathering crusts in the USSR*. Moscow, USSR Academy of Sciences Publ., 1963. 320 p. (In Russ.)
25. Dos Santos P.H.C., Da Costa M.L., Roerdink D.L. Geochemical and isotopic fractionation in the hypogene ore, gossan, and saprolite of the Alvo 118 deposit: implications for copper exploration in the regolith of the Carajás Mineral Province. *Minerals*, 2023, vol. 13 (11). DOI: 10.3390/min13111441
26. 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
27. 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 (Brasília Fold Belt, Brazil): Implications for gold prospecting in weathering profiles. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, vol. 218. DOI: 10.1016/j.gexplo.2020.106615
28. Ozdemir A., Sahinoglu A. Important of gossans in mineral exploration: a case study in Northern Turkey. *International Journal of Earth Science and Geophysics*, 2018, vol. 4 (1). DOI: 10.35840/2631-5033/1819
29. Velasco F., Herrero J.M., Suárez S., Yusta I., Alvaro A., Tornos F. Supergene features and evolution of gossans capping massive sulphide deposits in the Iberian Pyrite Belt. *Ore Geology Reviews*, 2013, vol. 53, pp. 181–203. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2013.01.008
30. Scott K.M., Ashley P.M., Lawie D.C. The geochemistry, mineralogy and maturity of gossans derived from volcanogenic Zn–Pb–Cu deposits of the eastern Lachlan Fold Belt, NSW, Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, 2001, vol. 72 (3), pp. 169–191. DOI: 10.1016/S0375-6742(01)00159-5

Information about the authors

Valery G. Voroshilov, Dr. Sc., Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; v_g_v@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0955-5750>

Timofey V. Timkin, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; timkin@tpu.ru; <http://orcid.org/0000-0002-8113-3555>

Diana K. Molukpaeva, Postgraduate Student, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; dkm3@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0002-0495-4456>

Received: 30.06.2025

Revised: 14.07.2025

Accepted: 04.08.2025