

УДК 553.411+551.311.231
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4659
Шифр специальности ВАК: 1.6.10

Геохимические критерии золотоносности кор выветривания Томь-Яйского междуречья

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

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉timkin@tpu.ru

Аннотация. Актуальность. Золотоносные коры выветривания широко распространены в Томь-Яйском междуречье, но критерии прогнозирования их золотоносности, в том числе геохимические, в должной мере не разработаны. **Цель:** выявить геохимические особенности кор выветривания Томь-Яйского междуречья для решения вопросов прогнозирования их золотоносности. **Объект:** коры выветривания по породам палеозойского фундамента Томь-Яйского междуречья. **Методы.** Химический состав продуктов выветривания определялся методом ИСП-масс-спектрометрии. Выполнен анализ керновых проб 36 скважин на 20 элементов. Обработка полученных результатов осуществлялась в программном комплексе для статистического анализа Statistica. Рассчитаны основные параметры распределения химических элементов в профилях золотоносной и незолотоносной кор выветривания, проведены дискриминантный и факторный анализы. **Результаты.** Установлены статистически значимые различия в химическом составе зон профиля выветривания. В процессе выветривания незолотоносных пород происходит вынос Р, Мп, Со, Ni, Zn и накопление Cr, Мо, Ag, Sn, Sb, Hf, Tl, Pb, Bi при индифферентном поведении Au, As, Fe, Cu. Золотоносные коры выветривания формируются по минерализованным зонам и изначально обогащены Au, As, W, Sb, в меньшей мере – Cu, Zn, Pb, Bi, Tl, Hf, Sn. Среднее содержание золота и большинства элементов-спутников (кроме Pb) в процессе выветривания минерализованных зон снижается, но дисперсия многократно возрастает, вследствие чего в пределах зон гидролиза и гидратации возникают участки вторичного обогащения золотом и элементами-спутниками Sb, As, Ag, Sn, Tl, Co, Cu, Zn, Cd, Bi. Геохимические ассоциации, характерные для остаточных кор выветривания, в значительной степени сохраняются и в переотложенных корах, где совместно с золотом накапливаются As, Sb, W, Cd, Ag, Sn, Hf.

Ключевые слова: золото, остаточная кора выветривания, переотложенная кора выветривания, геохимические критерии, Томь-Яйское междуречье.

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

Для цитирования: 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

UDC 553.411+551.311.231
DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4659

Geochemical criteria of the gold content of the Tom-Yaya interfluvial weathering crusts

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

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉timkin@tpu.ru

Abstract. Relevance. Gold-bearing weathering crusts are widespread in the Tom-Yaya interfluvial, but the criteria for predicting their gold content, including geochemical ones, have not been adequately developed. **Aim.** To identify the geochemical features of the weathering crusts of the Tom-Yaya interfluvial to resolve issues of predicting their gold content. **Object.** Weathering crusts from the rocks of the Paleozoic basement of the Tom-Yaya interfluvial. **Methods.** The chemical composition of

weathering products was determined by ICP-mass spectrometry. Core samples of 36 wells for 20 elements were analyzed. The results obtained were processed in the statistical analysis software package Statistica. The main parameters of the distribution of chemical elements in the profiles of gold-bearing and non-gold-bearing weathering crusts were calculated, discriminant and factor analyzes were carried out. **Results.** Statistically significant differences in the chemical composition of the weathering profile zones were established. In weathering of non-gold-bearing rocks, the removal of P, Mn, Co, Ni, Zn and the accumulation of Cr, Mo, Ag, Sn, Sb, Hf, Tl, Pb, Bi occur with the indifferent behavior of Au, As, Fe, Cu. Gold-bearing weathering crusts are formed in mineralized zones and are initially enriched in Au, As, W, Sb, and, to a lesser extent, Cu, Zn, Pb, Bi, Tl, Hf, Sn. The average content of gold and most satellite elements (except Pb) decreases during the weathering of mineralized zones, but the dispersion increases many times, as a result of which areas of secondary enrichment in gold and satellite elements Sb, As, Ag, Sn, Tl, Co, Cu, Zn, Cd, Bi appear within the zones of hydrolysis and hydration. Geochemical associations characteristic of residual weathering crusts are largely preserved in redeposited crusts, where As, Sb, W, Cd, Ag, Sn, and Hf are accumulated together with gold.

Keywords: gold, residual weathering crust, redeposited weathering crust, geochemical criteria, Tom-Yaya interfluvial

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

For citation: 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. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4659

Введение

Актуальной задачей в области рационального природопользования в целом на территории России и Томской области в частности является расширение минерально-сырьевой базы стратегически важных металлов за счет выявления новых перспективных площадей. Потенциальный Томский рудный район имеет все геологические предпосылки для формирования золоторудных месторождений промышленного масштаба. Вследствие ориентирования геологических работ в регионе преимущественно на нефть и газ поисковая изученность района на рудное и гипергенное золото недостаточна. Поэтому изучение потенциально перспективных золотоносных кор выветривания является актуальной задачей для экономического развития Томской области. Интерес к золотоносным корам выветривания, располагающимся в близповерхностных условиях и характеризующимся высокой степенью дезинтеграции вещества, определяется рядом причин: возможностью открытой разработки, отсутствием необходимости дробления руды, простой технологией и высокой экономической эффективностью извлечения золота при низких его содержаниях [1–6].

За последнее время в Томь-Яйском междуречье выявлен ряд золоторудных объектов, общие ресурсы драгоценного металла которых оцениваются в десятки тонн. Так, в 2011–2015 гг. компанией ООО ГРК «Геосфера» в результате поисковых работ были оценены прогнозные ресурсы золота в линейных корях выветривания в количестве более 38 т по категории P_2 [3]. Этим перспективы района не ограничиваются, поэтому актуальным является вопрос дальнейшего исследования закономерностей концентрирования золота в корях выветривания и разработки критериев прогнозирования и поисков гипергенных месторождений золота.

Целью данного исследования является обоснование геохимических критериев золотоносности кор выветривания Томь-Яйского междуречья.

Геолого-структурная позиция золотоносных кор выветривания

В региональном плане изучаемый район находится в области сочленения крупных геологических структур – Колывань-Томской складчатой зоны, Западно-Сибирской плиты, Кузнецкого прогиба и Кузнецкого Алатау [7].

Коры выветривания сформированы по вулканогенно-терригенным отложениям и дайкам основного состава. Вулканогенные отложения среднедевонского возраста митрофановской свиты (D_2mt) представлены лавами базальтов, базальтовых порфиритов, их туфами, в меньшем количестве кислыми вулканитами, линзами известняков и известковистых туфоосадочных пород. На участках повышенной проницаемости породы преобразованы в metabазальты и метаморфизованы до хлорит-серицитовых сланцев. Терригенные породы на площади работ представлены пачинской, юргинской свитами, нерасчлененной саламатовской и ярской толщей, лагерносадской и басандайской свитами. Пачинская свита ($D_3pč$) сложена отложениями трех подсвит. Нижняя подсвита представлена аргиллитами кремнистого состава с тонкими прослоями кварц-полевошпатовых песчаников и алевролитов с примесью туфогенного материала. Средняя подсвита образована битуминозными аргиллитами и алевролитами с конкрециями фосфоритов. Верхняя подсвита представлена алевролитами с редкими прослоями глинистых и алевритистых известняков. В зонах тектонической нарушения породы свиты преобразованы в филлиты. Юргинская свита (D_3jur) подразделена на две подсви-

ты. Нижняя подсвита сложена кварц-полевошпатовыми, полимиктовыми мелко-, средне-грубозернистыми, гравелитистыми песчаниками с прослоями алевролитов, аргиллитов и глинистых сланцев. Саламатовская и ярская толщи ($D_{3sl}-C_{1jar}$) сложены алеврито-глинистыми, известково-глинистыми, углеродисто-глинистыми сланцами и глинистыми, слабоизвестковистыми алевролитами с тонкими прослоями тонко- и мелкозернистых известковистых полевошпат-кварцевых песчаников, в зонах метаморфизма породы часто филлитизированы. В составе лагерьносадской свиты (C_{1lg}) установлены алеврито-глинистые, реже углисто-глинистые сланцы с прослоями мелкозернистых песчаников и алевролитов. Басандайская свита (C_{1-2bs}) сложена средне-, мелко- и крупнозернистыми массивными кварц-полевошпатовыми, аркозовыми, иногда полимиктовыми песчаниками с прослоями алевролитов и глинистых сланцев. Интрузивные образования характеризуются значительным петрографическим разнообразием и представлены дайками томского ареала изылинского базитового комплекса ($\mu-\epsilon vT_{1-2t}$) [8, 9].

Сформировавшиеся коры выветривания по генезису делятся на остаточные (ОКВ) и переотложенные (ПКВ), по морфологии – на площадные и линейные. Коры выветривания характеризуются зональным строением профиля, в полном профиле остаточной коры выветривания присутствует три зоны: дезинтеграции, гидратации и гидролиза. В нижней части постоянно присутствует зона дезинтеграции, представленная слабыветрелыми, в различной степени трещиноватыми исходными терригенными породами с развивающимися по трещинам гидрослюдами и монтмориллонитом. Для зоны дезинтеграции по магматическим породам, сложенной темно-серыми в разной степени выветрелыми долеритами, характерно развитие по трещинам монтмориллонита, минералов группы гидрослюд и хлорита. Выше по разрезу зона дезинтеграции сменяется зоной гидратации, состав которой преимущественно каолинит-гидрослюдистый с дресвой и щебнем в различной степени выветрелых терригенных пород и кварца. В зоне гидратации магматических пород развиты следующие глинистые минералы: каолинит, минералы группы гидрослюд и в меньшей степени монтмориллонит. Наиболее преобразованная часть остаточной коры выветривания, зона гидролиза, представлена, как правило, бесструктурными глинами каолинит-гидрослюдистого состава с небольшим количеством минералов группы хлорита. В результате эрозии остаточных кор выветривания и плоскостного делювиального смыва происходит переотложение остаточных кор выветривания в виде аллювиально-пролювиальных отложений. Продукты переотложения остаточных кор выветривания

представлены пестрыми бесструктурными глинами. Наибольшие содержания золота приурочены к зоне гидролиза остаточной коры и переотложенной коре выветривания [7, 10, 11].

Фактический материал и методы исследования

Фактическим материалом для проведения исследования послужили более 1300 керновых проб из 36 скважин, пройденных ООО ГРК «Геосфера». Керновые пробы анализировались в Химико-аналитическом центре «Плазма» (г. Томск) методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на Ag, As, Au, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hf, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Sb, Sn, Tl, W и Zn. Анализ проводился на масс-спектрометрах ELAN-9000 DRC-e, Agilent-7700x, Agilent-7900. Изучен химический состав продуктов выветривания осадочных пород юргинской свиты позднедевонского возраста и магматических пород томского ареала изылинского базитового комплекса ранне-среднетриасового возраста.

Обработка всех геохимических данных и статистический анализ выполнены с использованием программного комплекса Statistica 12 (StatSoft). Определены основные параметры распределения химических элементов в профилях золотоносной и незолотоносной кор выветривания с использованием общепринятых статистических методов. Рассчитаны параметры распределения анализируемых элементов в сформированных выборках, с использованием рангового критерия Манна–Уитни оценено поведение элементов в процессах выветривания и накопления золота [12–15].

В рамках многомерной статистики проведены дискриминантный и факторный анализы, которые широко используются при интерпретации геохимических данных [16–20].

Результаты и обсуждение

Оценивая геохимические особенности золотоносных кор выветривания, необходимо иметь в виду, что речь идет о двух самостоятельных процессах: 1) образовании кор выветривания как региональных геологических продуктов и 2) формировании обогащенных золотом остаточных вторичных ореолов.

Для оценки поведения химических элементов в зоне гипергенеза сформированы выборки по всем выделенным зонам профиля выветривания, отдельно для золотоносных и незолотоносных участков. Расчеты показывают, что во всех выборках распределение всех исследованных элементов не соответствует нормальному закону, поэтому в качестве оценки средних содержаний выбраны средние геометрические значения. Соответственно, для проверки гипотез о равенстве неизвестных средних

использован непараметрический критерий Манна–Уитни. Распределение химических элементов в профиле незолотоносной коры выветривания иллюстрирует табл. 1.

Таблица 1. Сравнение содержаний химических элементов в зонах профиля незолотоносной коры выветривания

Table 1. Comparison of the contents of chemical elements in the profile zones of non-gold-bearing weathering crust

Элемент Element	Средние геометрические содержания, г/т Geometric averages, ppb			Значения критерия Манна–Уитни Mann–Whitney test		
	Зона дезинтеграции (a) Zone of disintegration (a)	Зона гидратации (b) Zone of hydration (b)	Зона гидролиза (c) Zone of hydrolysis (c)	Сравниваемые выборки Comparable samples		
				b–a	c–b	c–a
P	681	327	369	–1,65	0,63	–2,86
Cr	61,8	84,4	87,3	5,30	2,00	5,09
Mn	590	52	127	–4,82	2,74	–3,42
Fe	30496	24297	27111	0,39	0,20	0,31
Co	13,5	9,54	5,96	–0,42	–2,08	–2,86
Ni	34,0	36,2	25,5	0,70	–3,18	–2,34
Cu	30,4	25,2	30,3	–1,66	2,70	1,15
Zn	81,4	62,4	36,1	0,40	–2,94	–4,01
As	7,42	5,27	5,59	–1,06	1,56	0,31
Mo	0,38	0,39	0,52	–0,02	3,23	2,35
Ag	0,04	0,05	0,06	2,45	1,19	3,08
Cd	0,11	0,12	0,10	–0,99	0,30	–0,62
Sn	1,27	1,48	1,51	2,67	1,20	2,52
Sb	0,39	0,63	0,62	3,33	0,08	3,38
Hf	1,57	2,72	2,75	3,15	0,47	3,18
W	0,59	0,17	0,22	–4,47	3,90	–3,29
Au	0,001	0,001	0,001	1,07	–1,51	–0,31
Tl	0,29	0,43	0,43	2,67	–0,05	2,60
Pb	6,85	12,3	11,4	3,85	–1,24	3,44
Bi	0,15	0,19	0,20	2,68	1,98	2,62

Примечание: При значении критерия Манна–Уитни >1,96 (по модулю) средние значения различаются с вероятностью >95 %.

Note: If the Mann–Whitney test value is >1.96 (modulo), the probability of difference in average contents exceeds 95%.

Отдельно для золотоносной и незолотоносной части остаточной коры выветривания проведен дискриминантный анализ для подтверждения различия между выделенными в разрезе зонами коры выветривания. Дискриминантный анализ показывает, что выделенные зоны незолотоносной коры выветривания уверенно различаются по своим геохимическим особенностям (рис. 1). Статистическая значимость различий превышает 99 %.

Сравнение средних значений показывает, что при гидратации дезинтегрированных пород происходит вынос Mn, W и накопление Cr, Ag, Sn, Sb,

Hf, Tl, Pb, Bi. В процессе дальнейшего гидролиза пород происходит перераспределение элементов с выносом Zn, Co, Ni и накоплением относительно зоны гидратации Cr, Mn, Mo, W. В итоге можно говорить о выносе в процессе выветривания P, Mn, Co, Ni, Zn и накоплении Cr, Mo, Ag, Sn, Sb, Hf, Tl, Pb, Bi при индифферентном поведении Au, As, Fe, Cu (табл. 2). Перераспределение элементов в целом незначительное (средние содержания изменяются не более чем в 1,5–2 раза) и вполне объясняется различиями в их гипергенной подвижности.

Таблица 2. Сравнение содержаний химических элементов в зонах профиля золотоносной коры выветривания

Table 2. Comparison of the contents of chemical elements in the profile zones of gold-bearing weathering crust

Элемент Element	Средние геометрические содержания, г/т Geometric averages, ppb			Значения критерия Манна–Уитни Mann–Whitney test		
	Зона дезинтеграции (a) Zone of disintegration (a)	Зона гидратации (b) Zone of hydration (b)	Зона гидролиза (c) Zone of hydrolysis (c)	Сравниваемые выборки Comparable samples		
				b–a	c–b	c–a
P	535	432	326	–2,32	–3,66	–3,77
Cr	71,7	68,7	68,3	0,16	–0,46	–0,24
Mn	312	146	160	–3,21	0,84	–2,39
Fe	34060	27830	24097	–1,78	–1,57	–2,48
Co	13,37	11,34	9,65	–1,32	–1,06	–1,30
Ni	36,10	31,04	23,99	–1,18	–2,59	–2,53
Cu	43,97	38,35	32,15	–1,44	–1,76	–2,06
Zn	90,85	87,77	56,54	–0,11	–4,03	–2,62
As	186,3	53,7	103,3	–4,91	3,94	–3,19
Mo	0,48	0,46	0,61	–0,72	2,77	1,49
Ag	0,07	0,06	0,07	–0,66	0,10	–0,55
Cd	0,23	0,22	0,23	0,13	–0,50	–0,36
Sn	2,32	2,16	2,09	–1,25	–0,20	–0,79
Sb	7,62	3,10	4,55	–4,74	2,80	–3,25
Hf	3,88	3,42	3,73	–2,93	2,36	–0,93
W	13,8	4,8	4,04	–3,51	–0,69	–3,31
Au	0,020	0,004	0,005	–4,66	0,38	–4,46
Tl	0,67	0,57	0,55	–2,49	0,07	–1,84
Pb	11,01	13,63	19,66	2,19	5,72	4,77
Bi	0,23	0,21	0,24	–1,14	0,89	–0,36

Примечание: При значении критерия Манна–Уитни >1,96 (по модулю) средние значения различаются с вероятностью >95 %.

Note: If the Mann–Whitney test value is >1.96 (modulo), the probability of difference in average contents exceeds 95%.

Коры выветривания сульфидных месторождений («железные шляпы») традиционно являются источником легкоизвлекаемого золота. На территории Сибири извлечение этого золота началась еще в XVIII в., раньше, чем из россыпей.

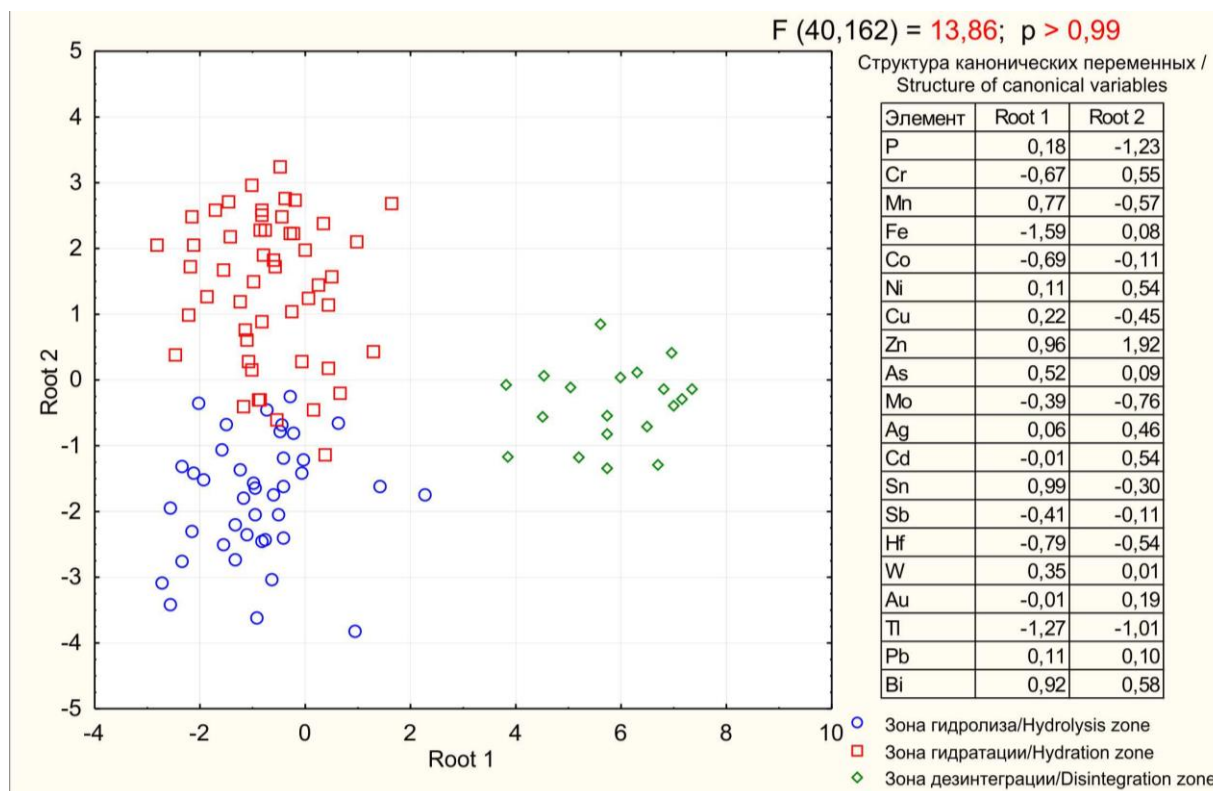


Рис. 1. Результат дискриминантного анализа эталонных выборок из незолотоносной коры выветривания
Fig. 1. Result of the discriminant analysis of reference samples from non-gold-bearing weathering crust

В то же время глинистые коры выветривания до 80-х гг. XX в. вообще не рассматривались в качестве возможных объектов промышленной добычи металла. В последние десятилетия в латеритных и каолиновых корах выветривания всего мира, включая Россию, открыты десятки месторождений золота, в том числе крупных, что позволило объединить их в самостоятельный геолого-промышленный тип. Характерной особенностью таких месторождений является их развитие не только по первичным золотым рудам, но и по слабозолотоносным гидротермально измененным породам и минерализованным зонам с бедной сульфидно-кварцевой минерализацией [21].

Золотоносные коры выветривания Томь-Яйского междуречья, в сравнении с незолотоносными, характеризуются резким повышением (на порядок и более) концентраций Au, As, W, Sb и незначительным (до 1,5–2 раз) возрастанием содержания других элементов-спутников золота: Cu, Zn, Pb, Bi, Tl, Hf, Sn, по всему профилю выветривания. Это свидетельствует о том, что золотоносные коры выветривания являются, по сути, остаточными вторичными ореолами гидротермальных зон минерализации. В частности, теми же элементами фиксируются зоны золоторудной минерализации в коренном залегании на Батуринском рудопроявлении золота, где минералами-спутниками

золота являются сульфиды – пирит, пирротин, арсенопирит, сфалерит, галенит и халькопирит. Все это подтверждает известное положение о том, что формирование рудоносных кор выветривания определяется в первую очередь присутствием рудного компонента в субстрате [21–23]. Такое условие является обязательным, но недостаточным. Имеются многочисленные примеры как наличия, так и отсутствия обогащенных гипергенным золотом зон на золоторудных месторождениях разных типов. Поэтому выяснение условий возникновения таких зон является важнейшим вопросом как в теоретическом, так и в прикладном аспектах.

Среднее содержание золота и большинства элементов-спутников (кроме Pb) от зоны дезинтеграции к зоне гидролиза снижается, но дисперсия возрастает на 1–2 порядка. Это означает, что участки выщелачивания сопряжены с областями переотложения элементов, и позволяет предполагать наличие зон вторичного обогащения золотом и элементами-спутниками. Золото может в этой ситуации осаждаться на частицах минерального субстрата, адсорбироваться глинистыми минералами либо непосредственно осаждаться из коллоидного раствора [24]. Такие интервалы с промышленно интересными содержаниями золота действительно вскрыты поисковыми скважинами в пределах зон гидролиза и гидратации.

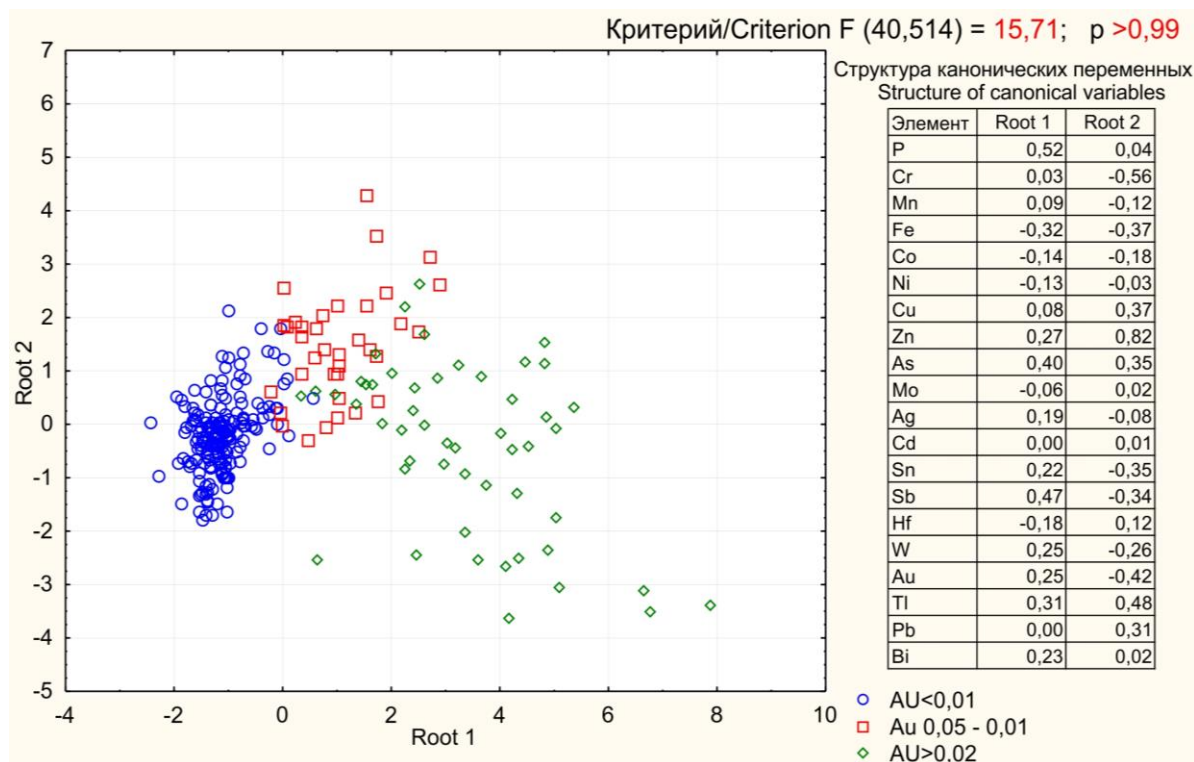


Рис. 2. Результат дискриминантного анализа эталонных выборок с разной золотоносностью коры выветривания
Fig. 2. Result of the discriminant analysis of reference samples with different gold content of the weathering crust

С целью выявления геохимических особенностей обогащенных золотом локальных интервалов сформированы три выборки из остаточных кор выветривания с содержаниями золота: 1) менее 1 мг/т; 2) от 5 до 10 мг/т; 3) более 20 мг/т.

Дискриминантный анализ показывает, что по геохимическим данным эти выборки различаются с вероятностью более 99,9 %, следовательно, прогноз золотоносности можно успешно осуществлять по данным геохимического опробования с использованием программ распознавания образов (рис. 2).

Сравнение выборок с использованием рангового критерия Манна–Уитни показывает, что синхронно с золотом устойчиво накапливаются Sb, As, Ag, Sn, Tl, в меньшей степени Co, Cu, Zn, Cd, Bi, обладающие высокой подвижностью в гипергенных условиях, в связи с чем содержание их в зоне гидролиза ниже, чем в зоне гидратации (табл. 2, 3). Фосфор, железо и марганец в процессе накопления золота частично перераспределяются, входя в состав новообразованных фосфатов, гидроокислов и карбонатов, но в целом среднее содержание их существенно не изменяется.

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

Результатом факторного анализа является матрица факторных нагрузок, которая содержит коэффициенты, представляющие взаимосвязи между факторами и переменными. Коэффициент с высоким абсолютным значением показывает, что фактор и переменная тесно взаимосвязаны. Для упрощения интерпретации факторов проведено вращение факторных осей методом варимакс [15, 17]. Критериев статистической значимости коэффициентов матрицы факторных нагрузок не существует, для удобства восприятия жирным шрифтом выделены их значения от 0,4 и выше, объединяющие, по опыту работ, наиболее информативные для данной ассоциации химические элементы (табл. 4).

По результатам факторного анализа по остаточным корам выветривания получена матрица факторных нагрузок, включающая четыре группы (фактора), объединяющих химические элементы, сходные по поведению в геологических процессах.

Факторный анализ показывает, что в остаточной коре выветривания золото тесно коррелируется с Sb, W, As, Cu (фактор 4). Вероятнее всего, эта ассоциация сохранилась от первичных руд, представляет собой остаточный вторичный ореол и может рассматриваться как геохимический признак золотого оруденения в коре выветривания. Мышьяк, сурьма, медь отмечаются в составе сульфидов, сопровождающих коренное оруденение и являются типичными элементами-спутниками золота [10, 25–28].

Таблица 3. Сравнение по критерию Манна–Уитни выборок с различной степенью золотоносности из остаточных кор выветривания

Table 3. Comparison by the Mann–Whitney test of samples with different degrees of gold content from residual weathering crusts

Элемент Element	Средние геометрические содержания, г/т Geometric averages, ppb			Значения критерия Манна–Уитни Mann–Whitney test		
	Выборка (a) Sampling (a)	Выборка (b) Sampling (b)	Выборка (c) Sampling (c)	Сравнимые выборки Comparable samples		
				b–a	c–b	c–a
P	325	412	411	–0,56	–0,28	–0,78
Cr	87,6	66,9	75,7	1,83	3,85	4,20
Mn	69	154	146	2,06	–2,27	0,59
Fe	24476	28341	26384	2,77	–2,56	1,01
Co	6,63	10,68	15,43	3,51	–0,20	4,11
Ni	29,0	31,0	29,6	2,54	–2,61	1,57
Cu	26,4	35,5	52,3	3,02	1,79	4,91
Zn	45,3	84,7	84,3	3,34	–1,97	2,54
As	5,1	56,5	123,2	3,99	2,15	4,95
Mo	0,45	0,49	0,49	1,92	–0,18	2,22
Ag	0,05	0,06	0,09	2,57	2,54	4,62
Cd	0,11	0,23	0,24	2,44	–0,97	2,17
Sn	1,51	2,09	2,53	2,77	2,91	4,16
Sb	0,60	2,92	7,88	3,99	4,20	5,82
Hf	2,76	3,54	3,50	2,02	1,13	2,55
W	0,19	3,57	17,42	0,62	4,54	5,30
Au	0,001	0,003	0,063	6,86	8,39	7,18
Tl	0,43	0,55	0,72	3,33	2,89	4,59
Pb	12,4	14,9	13,7	2,92	–2,40	0,84
Bi	0,19	0,21	0,25	3,80	–0,18	3,26

Примечание: Выборка (a) – менее 1 мг/т; выборка (b) – от 5 до 10 мг/т; выборка (c) – более 20 мг/т. При значении критерия Манна–Уитни >1,96 (по модулю) средние значения различаются с вероятностью >95 %.
Note: Sample (a) – less than 1 mg/t; sample (b) – from 5 to 10 mg/t; sample (c) – more than 20 mg/t. If the Mann–Whitney test value is >1.96 (modulo), the probability of difference in average contents exceeds 95%.

Элементы Sn, Tl, Hf выделились в отдельную ассоциацию (фактор 2). Разрез вдоль типовой скважины Z35 показывает, что значения факторов 2 и 4 снизу вверх по профилю выветривания сначала синхронно возрастают, а в верхней зоне корреляция между ними становится обратная (рис. 3). То есть механизм накопления этих ассоциаций различный, соответственно, Sn, Tl, Hf прямыми индикаторами золотого оруденения в корях выветривания не являются.

Кора выветривания по дайке долеритов уверенно фиксируется повышенными концентрациями P, Hf, Zn, Fe (фактор 3), накопление фосфора связано с апатитом, гафния – обусловлено его примесью в цирконе [29, 30]. Золото с этой ассоциацией не коррелируется.

Фактор 1 объединяет группу элементов (Fe, Co, Ni, Mn, Cu, Zn), которые образуют повышенные содержания в основных породах. Fe, Co, Ni, Mn

относятся к сидерофильным, Cu, Zn – к халькофильным элементам. Повышенные значения фактора 1 отражают основность исходных пород и приурочены, прежде всего, к коре выветривания по дайкам долеритов. Рост интенсивности фактора 1 в верхней части скважины Z35 связан только с аномалиями Cu, Zn, Co, которые в данном случае отражают специфику первичного сульфидного оруденения (рис. 3).

Таблица 4. Результаты факторного анализа по остаточным и переотложенным корам выветривания

Table 4. Results of factorial analysis for residual and redeposited weathering crusts

Элемент Element	Остаточная кора выветривания Residual weathering crusts				Переотложенная кора выветривания Redeposited weathering crusts			
	F1	F2	F3	F4	F1	F2	F3	F4
P	0,30	0,01	0,74	–0,06	0,65	0,52	–0,25	–0,13
Cr	–0,13	0,12	–0,80	–0,04	0,30	–0,75	0,23	0,05
Mn	0,73	–0,03	0,01	0,07	0,77	0,17	–0,09	–0,11
Fe	0,69	–0,11	0,40	–0,10	0,82	–0,04	–0,19	–0,23
Co	0,81	–0,01	0,13	0,16	0,81	–0,07	–0,18	–0,07
Ni	0,43	0,37	0,04	–0,18	0,73	0,05	0,21	–0,22
Cu	0,40	0,10	–0,37	0,46	0,73	–0,20	0,00	0,21
Zn	0,56	0,24	0,50	–0,10	0,58	0,62	0,09	–0,14
As	–0,09	0,32	0,28	0,54	0,08	0,38	–0,10	0,73
Mo	0,14	–0,11	0,39	0,15	0,72	0,04	–0,05	0,15
Ag	0,03	0,18	–0,03	0,04	0,64	–0,01	0,02	0,35
Cd	0,39	0,21	0,19	–0,01	0,40	0,78	0,04	0,18
Sn	–0,09	0,82	0,16	0,14	–0,34	0,42	0,72	0,01
Sb	–0,03	0,28	0,17	0,76	0,05	0,53	0,15	0,51
Hf	–0,13	0,53	0,65	0,02	–0,21	0,83	0,21	0,19
W	0,16	–0,04	–0,10	0,60	0,01	0,02	–0,02	0,49
Au	–0,10	0,13	–0,01	0,67	–0,03	–0,07	0,08	0,63
Tl	0,44	0,62	–0,24	0,24	–0,13	0,02	0,84	0,10
Pb	0,06	0,25	0,09	0,14	0,70	–0,15	–0,06	0,25
Bi	0,00	0,74	–0,27	0,05	0,17	–0,48	0,64	–0,13

Таким образом, геохимическими признаками золотого оруденения в остаточных корях выветривания служат аномалии Au, As, Sb, W. Менее надежными индикаторами являются Zn, Cu, Co, Bi. Наблюдаемое иногда синхронное с золотом поведение Sn, Tl, Hf отражает, видимо, литологический контроль оруденения, поскольку эта ассоциация присутствует и в незолотоносной коре выветривания.

Характерной особенностью золотоносных кор выветривания во многих регионах является их тесная пространственная связь с переотложенными корами, также золотоносными. В Томь-Яйском междуречье в результате интенсивных тектонических движений в олигоцене и эоплейстоцене произошла существенная эрозия кор выветривания и их переотложение в виде аллювиально-пролювиальных отложений. Породы основания кирсановской свиты (pdN₂–Q_Ekr_s) являются типич-

ным примером переотложенных золотоносных кор выветривания. С практической точки зрения эти образования представляют несомненный интерес, поскольку содержания золота в них достигают 6,3 г/т [10]. Пространственно они часто тесно ассоциируют с золотоносными остаточными корами.

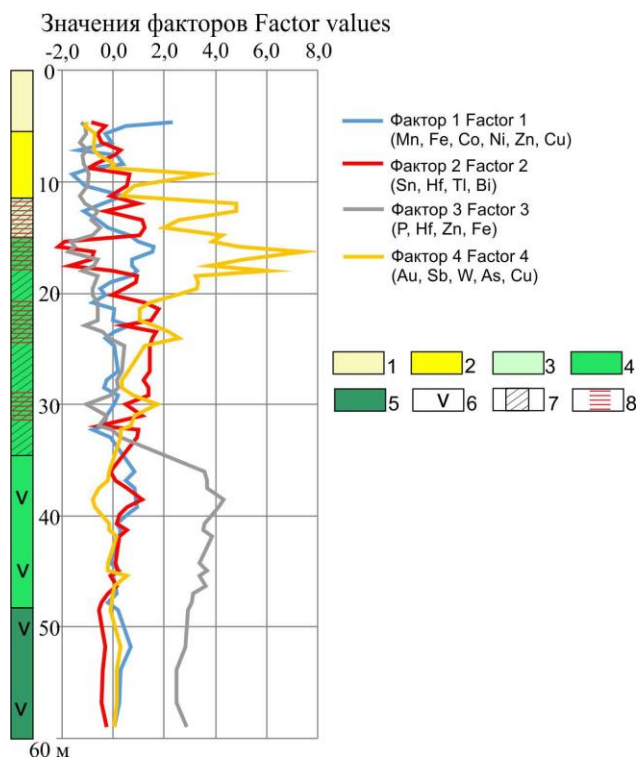


Рис. 3. Распределение геохимических ассоциаций в профиле золотоносной коры выветривания по скважине Z35: 1 – глинистые отложения тайгинской свиты (Q_{1-2tg}); 2 – близко- и дальнеприносные отложения кирсановской свиты (pdN_2-Q_{Ekr}); зоны остаточной мел-палеогеновой коры выветривания: 3 – гидролиза; 4 – гидратации; 5 – дезинтеграции; состав исходных пород: 6 – дайка долеритов ($\mu-\epsilon vT_{1-2t}$); 7 – песчаники с прослоями алевролитов, аргиллитов и глинистых сланцев юргинской свиты (D_{3jur}); 8 – дресва и щебень кварца

Fig. 3. Distribution of geochemical associations in the profile of the gold-bearing weathering crust: 1 – argillaceous deposits of the Taiga suite (Q_{1-2tg}); 2 – near- and far-bearing deposits of the Kirsanovskaya suite (pdN_2-Q_{Ekr}); zones of residual Cretaceous-Paleogene weathering crust: 3 – hydrolysis; 4 – hydration; 5 – disintegration; composition of the product: 6 – dolerite dike ($\mu-\epsilon vT_{1-2t}$); 7 – sandstones with interlayers of siltstones, mudstones and shales of the Yurga suite (D_{3jur}); 8 – gruss and crushed stone of quartz

Факторный анализ показывает, что геохимические ассоциации, характерные для остаточных кор выветривания, во многом сохраняются и в переот-

ложенных корах (табл. 4). В совокупности со слабой окатанностью золота это указывает на очень незначительные расстояния его переноса и позволяет рассматривать золотоносные объекты как комплексные корово-россыпные.

Таблица 5. Сравнение по критерию Манна–Уитни выборок с различной степенью золотоносности из переотложенных кор выветривания

Table 5. Comparison by the Mann–Whitney test of samples with different degrees of gold content from redeposited weathering crusts

Элемент Element	Средние геометрические содержания, г/т Geometric averages, ppb		Значения критерия Манна–Уитни Mann-Whitney test
	Незолотоносные отложения Non-gold-bearing rocks	Золотоносные отложения Gold-bearing deposits	
P	384	438	1,24
Cr	75,4	72,2	-1,45
Mn	517	323	-2,47
Fe	43258	31708	-2,10
Co	18,23	14,57	-0,83
Ni	36,16	32,91	0,40
Cu	33,58	32,27	-0,27
Zn	70,26	84,07	1,67
As	11,63	36,14	5,97
Mo	0,85	0,75	-1,32
Ag	0,05	0,06	2,00
Cd	0,10	0,21	5,39
Sn	1,89	2,20	3,39
Sb	1,14	3,62	5,92
Hf	2,06	3,06	3,92
W	0,84	3,87	4,64
Au	0,001	0,046	8,27
Tl	0,49	0,54	1,91
Pb	17,51	20,29	1,97
Bi	0,26	0,26	-1,25

Примечание: При значении критерия Манна–Уитни $>1,96$ (по модулю) средние значения различаются с вероятностью $>95\%$.

Note: If the Mann–Whitney test value is >1.96 (modulo), the probability of difference in average contents exceeds 95%.

Сравнение золотоносных и незолотоносных участков переотложенных кор выветривания показывает, что синхронно с золотом в них накапливаются As, Sb, W, Cd, Ag, Pb, Sn, Hf. Это практически тот же комплекс элементов, которым фиксируются золотоносные участки остаточных кор выветривания (табл. 3, 4). Значения критерия со знаком плюс в табл. 5 означают, что эти элементы (Au, As, Sb, W, Cd, Hf, Pb, Sn, Ag) накапливаются в золотоносных корах, в сравнении с незолотоносными. Знак минус характеризует обратную картину: содержания Mn и Fe в переотложенных золотоносных корах ниже, чем в незолотоносных.

Таким образом, общим геохимическим критерием золотоносности остаточных и переотложенных

кор выветривания является, в первую очередь, наличие аномалий Au, As, Sb, W, реже в комплексе с Sn, Hf, Cd. В остаточных корах с Au нередко коррелируют также Co, Zn, Cu; в переотложенных корах эта корреляция исчезает ввиду высокой подвижности Co, Zn и Cu в гипергенных условиях.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что зоны профиля выветривания статистически значимо различаются между собой по химическому составу. В процессе выветривания незолотоносных пород происходит вынос P, Mn, Co, Ni, Zn и накопление Cr, Mo, Ag, Sn, Sb, Hf, Tl, Pb, Bi. Содержания Au, As, Fe, Cu при этом не изменяются.

Золотоносные коры выветривания формируются по минерализованным зонам и изначально обогащены Au, As, W, Sb, в меньшей мере – Cu, Zn, Pb,

Bi, Tl, Hf, Sn. Из-за окисления сульфидов процессы выветривания здесь более интенсивные, что приводит к выносу и перераспределению многих элементов. Среднее содержание золота и большинства элементов-спутников (кроме Pb) в процессе выветривания минерализованных зон снижается, но дисперсия многократно возрастает, вследствие чего в пределах зон гидролиза и гидратации возникают участки вторичного обогащения золотом и элементами-спутниками Sb, As, Ag, Sn, Tl, Co, Cu, Zn, Cd, Bi. Этот комплекс элементов является индикаторным при поисках промышленных скоплений золота в остаточных корах выветривания.

Геохимические ассоциации, характерные для остаточных кор выветривания в значительной степени сохраняются и в переотложенных корах, где совместно с золотом накапливаются As, Sb, W, Cd, Ag, Pb, Sn, Hf.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Риндзюнская Н.М., Полякова Т.П., Берзон Р.О. Месторождения золота в корах выветривания // Руды и металлы. – 1992. – № 1. – С. 62–69.
2. Gold in the weathering crust at the Suzdal' deposit (Kazakhstan) / Y.A. Kalinin, K.R. Kovalev, E.A. Naumov, M.V. Kirillov // Russian Geology and Geophysics. – 2009. – Vol. 50. – № 3. – P. 174–187. DOI: 10.1016/j.rgg.2008.09.002
3. Черняев Е.В. Томское золото // Глобус: Геология и бизнес. – 2009. – № 1. – С. 26–28.
4. Калинин Ю.А., Росляков Н.А. Прогнозно-поисковые критерии золотоносных кор выветривания (районы юга Сибири), Россия // Геология рудных месторождений. – 2012. – Т. 54. – № 2. – С. 157–167.
5. Reich M., Vasconcelos P.M. Geological and economic significance of supergene metal deposits // Elements. – 2015. – Vol. 11. – № 5. – P. 305–310. DOI: 10.2113/gselements.11.5.305
6. Craw D., Lilly K. Gold nugget morphology and geochemical environments of nugget formation, southern New Zealand // Ore Geology Reviews. – 2016. – Vol. 79. – P. 301–315. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.06.001
7. Характер распределения фосфатов в золотоносных корах выветривания Томского района / О.М. Янченко, В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин, Т.Ю. Якич, М. Зиаи // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 9. – С. 74–91. DOI 10.18799/24131830/2021/9/3355
8. Гудымович С.С., Рычкова И.В., Рябчикова Э.Д. Геологическое строение окрестностей г. Томска (территории прохождения геологической практики). – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 84 с.
9. Парначев В.П., Парначев С.В. Геология и полезные ископаемые окрестностей города Томска. Материалы к полевой геологической экскурсии: справочное пособие. – Томск: ТГУ, 2010. – 144 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/20635> (дата обращения 15.04.2024).
10. Черняев Е.В. Генезис и золотоносность кор выветривания Томского района // Цветные металлы и минералы: Сборник тезисов докладов восьмого международного конгресса. – Красноярск, 2016. – С. 336–337. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_29399062_12133767.pdf (дата обращения 15.04.2024).
11. Минерально-геохимическая зональность золотоносных кор выветривания Томь-Яйского междуречья / О.М. Янченко, В.Г. Ворошилов, Т.В. Тимкин, М. Зиаи // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 2. – С. 83–94. DOI: 10.18799/24131830/2019/2/98
12. 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
13. 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
14. Боровиков В. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере: для профессионалов. – СПб.: Питер, 2003. – 688 с.
15. Поротов Г.С. Математические методы моделирования в геологии. – СПб: Изд-во Санкт-Петербургского горного института, 2006. – 223 с. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-matematicheskie-metody-modelirovaniya-v-geologii-gsporotov-2006.pdf> (дата обращения 15.04.2024).
16. Statistical data analysis explained: applied environmental statistics with R / C. Reimann, P. Filzmoser, R.G. Garrett, R. Dutter. – New Haven: John Wiley & Sons, 2008. – 362 p. DOI: 10.1002/9780470987605
17. 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
18. Environmental geochemical mapping and multivariate geostatistical analysis of heavy metals in topsoils of a closed steel smelter: Capital Iron & Steel Factory, Beijing, China / G.L. Yuan, T.H. Sun, P. Han, J. Li // Journal of Geochemical Exploration. – 2013. – Vol. 130. – P. 15–21. DOI: doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.02.010

19. Geochemical exploration for lithium in NE Iran using the geochemical mapping prospectivity index, staged factor analysis, and a fractal model / H. Saadati, P. Afzal, H. Torshizian, A. Solgi // *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*. – 2020. – Vol. 20. – №. 4. – P. 461–472. DOI: 10.1144/geochem2020-020
20. 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
21. Росляков Н.А. Геохимия золота в зоне гипергенеза, – Новосибирск: Наука, 1981. – 240 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/13869> (дата обращения 15.04.2024).
22. 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 15.04.2024).
23. 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 15.04.2024).
24. 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
25. 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. – 106615. DOI: 10.1016/j.gexplo.2020.106615
26. Dunn S., Von der Heyden B. Gold remobilization in gossans of the Amani area, southwestern Tanzania // *Ore Geology Reviews*. – 2021. – 131:1040334. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104033
27. 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
28. Минералого-геохимическая характеристика и вероятные коренные источники самородного золота россыпей Кельбес-Золотокитатского района (северная часть Кузнецкого Алатау) / В.В. Колпаков, Г.В. Нестеренко, П.А. Неволько, С.М. Жмодик // *Геосферные исследования*. – 2021. – № 3. – С. 42–55. DOI: 10.17223/25421379/20/3
29. Родыгина В.Г. Курс геохимии. – Томск: Изд-во НТЛ, 2006. – 288 с. URL: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-rodyginakursgeohimii2006v2.pdf> (дата обращения 15.04.2024).
30. Clift P.D., Wan Sh., Blusztajn J. Reconstructing chemical weathering, physical erosion and monsoon intensity since 25 Ma in the northern South China Sea: a review of competing proxies // *Earth-Science Reviews*. – 2014. – Vol. 130. – P. 86–102. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.01.002

Информация об авторах

Валерий Гаврилович Ворошилов, доктор геолого-минералогических наук, профессор отделения геологии 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>

Олеся Вячеславовна Савинова, кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. logvinenkoov@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7925-6150>

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: 18.04.2024

Поступила после рецензирования: 23.04.2024

Принята к публикации: 16.05.2024

REFERENCES

1. 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.)
2. Kalinin Y.A., Kovalev K.R., Naumov E.A., Kirillov M.V. Gold in the weathering crust at the Suzdal’ deposit (Kazakhstan). *Russian Geology and Geophysics*, 2009, vol. 50, no. 3, pp. 174–187. DOI: 10.1016/j.rgg.2008.09.002
3. Chernyaev E.V. Tomsk gold. *Globe: Geology and business*, 2009, no. 1, pp. 26–28. (In Russ.)
4. Kalinin Yu.A., Roslyakov N.A. Forecasting and prospecting criteria for gold-bearing weathering crusts (regions of southern Siberia), Russia. *Geology of ore deposits*, 2012, vol. 54, no. 2, pp. 157–167. (In Russ.)

5. 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/gselements.11.5.305
6. Craw D., Lilly K. Gold nugget morphology and geochemical environments of nugget formation, southern New Zealand. *Ore Geology Reviews*, 2016, vol. 79, pp. 301–315. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2016.06.001
7. Yanchenko O.M., Voroshilov V.G., Timkin T.V., Yakich T. Yu., Ziaii M. The nature of the distribution of phosphates in gold-bearing weathering crusts of the Tomsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 9, pp. 74–91. (In Russ.) DOI 10.18799/24131830/2021/9/3355
8. Gudymovich S.S., Rychkova I.V., Ryabchikova E.D. *Geological structure of the environs of Tomsk (territories of geological practice)*. Tomsk, Tomsk Polytechnic University Publ. House, 2009. 84 p. (In Russ.)
9. Parnachev V.P., Parnachev S.V. *Geology and minerals of the environs of the city of Tomsk. Materials for a geological field excursion: reference guide*. Tomsk, TSU Publ., 2010. 144 p. (In Russ.) Available at: <http://geokniga-geologiya-i-poleznye-iskopaemye-okrestnostey-goroda-tomska.pdf> (accessed 15 April 2024).
10. Chernyaev E.V. Genesis and gold content of weathering crusts in the Tomsk region. *Non-ferrous metals and minerals: Collection of abstracts of the eighth international congress*. Krasnoyarsk, 2016. pp. 336–337. (In Russ.) Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_29399062_12133767.pdf (accessed 15 April 2024).
11. Yanchenko O.M., Voroshilov V.G., Timkin T.V., Ziai M. Mineral-geochemical zoning of gold-bearing weathering crusts of the Tom-Yaya interfluvium. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2019, vol. 330, no. 2, pp. 83–94. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2019/2/98
12. 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
13. 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
14. Borovikov V. *STATISTICA. The art of data analysis on a computer: for professionals*. St. Petersburg, Piter Publ., 2003. 688 p. (In Russ.)
15. Porotov G.S. *Mathematical modeling methods in geology*. St. Petersburg, St. Petersburg Mining Institute Publ. House, 2006. 223 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-matematicheskie-metody-modelirovaniya-v-geologii-gsporotov-2006.pdf> (accessed 15 April 2024).
16. Reimann C., Filzmoser P., Garrett R.G., Dutter R. *Statistical data analysis explained: applied environmental statistics with R*. New Haven, John Wiley & Sons, 2008. 362 p. DOI: 10.1002/9780470987605
17. 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
18. Yuan G.L., Sun T.H., Han P., Li J. Environmental geochemical mapping and multivariate geostatistical analysis of heavy metals in topsoils of a closed steel smelter: Capital Iron & Steel Factory, Beijing, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, vol. 130, pp. 15–21. DOI: doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.02.010
19. Saadati H., Afzal P., Torshizian H., Solgi A. Geochemical exploration for lithium in NE Iran using the geochemical mapping prospectivity index, staged factor analysis, and a fractal model. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 461–472. DOI: 10.1144/geochem2020-020
20. 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
21. Roslyakov N.A. *Geochemistry of gold in the hypergenesis zone*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 240 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/books/13869> (accessed 15 April 2024).
22. 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 April 2024).
23. 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://www.geokniga.org/books/6493> (accessed 15 April 2024).
24. 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
25. 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, 106615. DOI: 10.1016/j.gexplo.2020.106615
26. Dunn S., Von der Heyden B. Gold remobilization in gossans of the Amani area, southwestern Tanzania. *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 131, 1040334. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104033
27. Zubova T.P., Pozdnyakova N.N. Mineralogical and geochemical prospecting signs of gold-polysulfide-quartz mineralization in the series “root source – weathering crust – placer” (using the example of the Urals). *Domestic Geology*, 2022, no. 1, pp. 49–58. (In Russ.) DOI: 10.47765/0869-7175-2022-10003
28. Kolpakov V.V., Nesterenko G.V., Nevolko P.A., Zhmodik S.M. Mineralogical and geochemical characteristics and probable primary sources of native gold from placers in the Kelbes-Zolotokitatsky region (northern part of Kuznetsk Alatau). *Geosphere Research*, 2021, no. 3, pp. 42–55. (In Russ.) DOI: 10.17223/25421379/20/3
29. Rodygina V.G. *Geochemistry course*. Tomsk, NTL Publ. House, 2006. 288 p. (In Russ.) Available at: <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-rodyginakursgeohimii2006v2.pdf> (accessed 15 April 2024).
30. Clift P.D., Wan Sh., Blusztajn J. Reconstructing chemical weathering, physical erosion and monsoon intensity since 25 Ma in the northern South China Sea: a review of competing proxies. *Earth-Science Reviews*, 2014, vol. 130, pp. 86–102. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.01.002

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>

Olesya V. Savinova, Cand. Sc., Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. logvinenkoov@tpu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7925-6150>

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: 18.04.2024

Revised: 23.04.2024

Accepted: 16.05.2024