

УДК 550.84

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2025-64-4-62-70

ВЕРТИКАЛЬНАЯ ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ РУДОПРОЯВЛЕНИЯ ТУТХЛИВАЯМ И КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ЭРОЗИОННОГО СРЕЗА НА ТЕРРИТОРИИ ЭРУВАЯМСКОГО РУДНОГО УЗЛА (КАМЧАТКА)

Петр Евгеньевич Швейгерт^{1✉}, Илдар Анатольевич Калько²,
Дарья Сергеевна Буханова³, Константин Андреевич Грибушин⁴

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия; schweigertpe@gmail.com ✉

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ildarkalko@ya.ru

³ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия; dasha-snejinka@yandex.ru

⁴ Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, Россия; konst.gribushin@yandex.ru

Аннотация. Изучена вертикальная геохимическая зональность эпитермального золото-серебряного рудопроявления Тутхливаям (Оссорский рудный район, Камчатка). Химический состав руд изучен по результатам сколового опробования, определены коэффициенты концентрации химических элементов и геохимические ассоциации в погоризонтных выборках. Определен вертикальный ряд геохимической зональности (снизу вверх): Cd–Pb–Zn–Cu–Ag–Mo–Sb–As–Hg–Fe–Ba–K–Mn–Au–Sr–Ca. Предложены показатели для оценки уровня эрозионного среза рудопроявления, рекомендуемые для золото-серебряных объектов Оссорского рудного района и аналогичных месторождений вулканогенных поясов.

Ключевые слова: вертикальная геохимическая зональность, эрозионный срез, эпитермальные золото-серебряные месторождения, Тутхливаям, Оссорский рудный район, Камчатка

Для цитирования: Швейгерт П.Е., Калько И.А., Буханова Д.С., Грибушин К.А. Вертикальная геохимическая зональность рудопроявления Тутхливаям и критерии оценки эрозионного среза на территории Эруваямского рудного узла (Камчатка) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2025. № 4. С. 62–70.

VERTICAL GEOCHEMICAL ZONATION OF THE TUTKHLIVAYAM ORE OCCURRENCE AND EROSIONAL TRUNCATION ESTIMATE CRITERIA FOR THE ERUVAYAM ORE CLUSTER (KAMCHATKA)

Petr E. Schweigert^{1✉}, Ildar A. Kalko², Darya S. Bukhanova³, Konstantin A. Gribushin⁴

¹ Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; schweigertpe@gmail.com ✉

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ildarkalko@ya.ru

³ Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; dasha-snejinka@yandex.ru

⁴ Geotechnological Research Center FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia; konst.gribushin@yandex.ru

Abstract. The vertical geochemical zonation of the Tutkhlivayam epithermal gold-silver ore occurrence (Ossora ore district, Kamchatka) has been studied. The chemical composition of the ores was studied based on the results of chip sampling, the concentration coefficients of chemical elements and geochemical associations in horizon samples were determined. The vertical series of geochemical zonation was determined (bottom to top): Cd–Pb–Zn–Cu–Ag–Mo–Sb–As–Hg–Fe–Ba–K–Mn–Au–Sr–Ca. The indicators for estimating the level of erosional truncation of the Tutkhlivayam ore occurrence, other gold-silver objects of the Ossora ore district and similar deposits of volcanogenic belts are proposed.

Keywords: vertical geochemical zonation, erosional truncation, epithermal gold-silver deposits, Tutkhlivayam, Ossora ore district, Kamchatka

For citation: Schweigert P.E., Kalko I.A., Bukhanova D.S., Gribushin K.A. Vertical geochemical zonation of the Tutkhlivayam ore occurrence and erosional truncation estimate criteria for the Eruvayam ore cluster (Kamchatka). *Moscow University Geol. Bull.* 2025; 4: 62–70. (In Russ.).

Введение. Камчатка является одной из наиболее перспективных золотодобывающих провинций Российской Федерации [Бортников, Толстых, 2023]. В последние годы прирост запасов и добыча золота на Камчатке осуществляются главным образом за счет вовлечения в разработку объектов, расположенных в Южно-Камчатском и Центральном-Камчатском рудных районах [Государственный..., 2023],

что связано со слабой экономической освоенностью северной части региона. Металлогенический потенциал Северо-Камчатского (Оссорского) рудного района связан с кластерами эпитермальных золото-серебряных рудопроявлений, объединяемыми в несколько рудных узлов [Карта..., 1999]. На сегодняшний день для большинства рудопроявлений района прогнозные ресурсы оценены только по

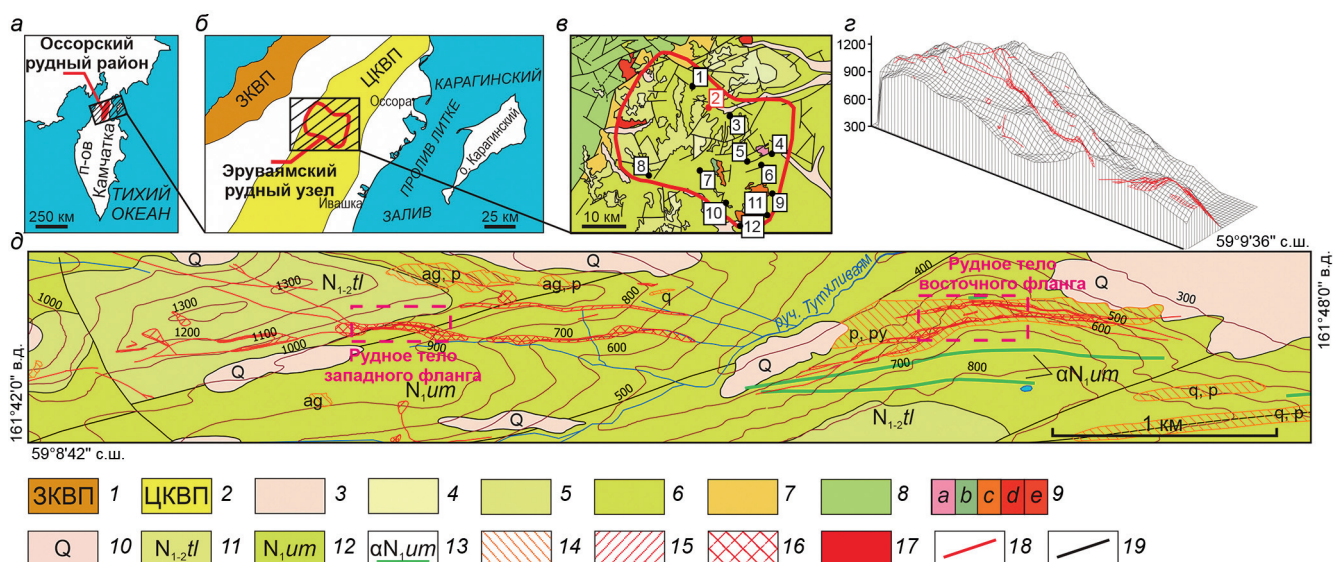


Рис. 1. Обзорные и геологические схемы Эруваймского рудного узла и проявления Тутхливаям. Схемы размещения Оссорского рудного района (а) и Эруваймского рудного узла (б); геологические схемы Эруваймского рудного узла (в) и рудопроявления Тутхливаям (г); проекция гидротермальных жил на модель рельефа (з). Условные обозначения: 1 — Западно-Камчатский вулканический комплекс; 2 — Центрально-Камчатский вулканический комплекс; 3 — четвертичные образования; 4–6 — неогеновые вулканические комплексы: 4 — веемгетверский, 5 — толятоваямский, 6 — умуваямский; 7–8 — отложения Лесновского антиклинория: 7 — палеогеновые, 8 — меловые; 9 — субвулканические тела: а–д — неогеновые: а — диорит-порфиры, б — базальты, с — монцодиориты, d — диорит-порфиры, е — меловые гранодиориты; 10 — рыхлые четвертичные образования, нерасчлененные; 11 — толятоваямские базальты, андезибазальты, андезиты, дациты, туфы; 12 — умуваямские андезиты, дациандезиты, андезибазальты, дациты, туфы среднего-кислого состава; 13 — дайки андезитов умуваямского комплекса; 14 — метасоматические изменения пород: ag — аргиллизация, q — окварцевание, p — пропилитизация, py — пиритизация; 15–16 — зоны кварцевого и карбонат-кварцевого прожилкования: 15 — слабо проявленного, 16 — интенсивного; 17–18 — кварцевые и карбонат-кварцевые жилы и жильные зоны: 17 — мощностью от 5 м, 18 — мощностью до 5 м; 19 — разрывные нарушения.

Цифрами в квадратах показаны рудопроявления в составе Эруваймского рудного узла (в): 1 — Эрувайям, 2 — Тутхливаям, 3 — Какевхутанваям, 4 — Солнечное, 5 — Северное, 6 — Надежда, 7 — Каньон, 8 — Тыхливаям, 9 — Ветвистое, 10 — Развилоч, 11 — Прямое, 12 — Гольцовое

результатам региональных поисковых и геологосъемочных работ (от первых тонн до десятков тонн золота), буровые работы, позволяющие достоверно установить вертикальный размах оруденения, проводились в незначительном объеме и только на единичных объектах. Исследование геохимической зональности для оценки степени эродированности рудных объектов и прогноза оруденения на глубину является актуальной задачей [Николаев и др., 2022], а уровень эрозионного среза — одним из ведущих критериев практической значимости золото-серебряного оруденения [Николаев, Аплеталин, 2005]. В статье рассмотрена геохимическая зональность и предложены показатели для оценки уровня эрозионного среза одного из наиболее изученных на сегодняшний день эпitherмальных золото-серебряных объектов Оссорского рудного района — рудопроявления Тутхливаям.

Характеристика объекта исследований. Рудопроявление Тутхливаям расположено в северной части Центрально-Камчатского вулканического пояса, в 73 км на запад от п. Оссора, в верховьях р. Эрувайям. Проявление занимает центральную часть одноименного рудного поля в составе Эруваймского рудного узла Оссорского рудного района Центрально-Камчатской металлогенической провинции [Карта..., 1999]. Наиболее перспективные

проявления золота и серебра в пределах Эруваймского рудного узла сконцентрированы в пределах трех рудных полей: Тутхливаямское (Тутхливаям, Эрувайям), Солнечное (Северное, Солнечное, Надежда) и Гевыльвеленское (Каньон) (рис. 1, а). Все они отнесены предшественниками к золото-серебряной малосульфидной формации [Боровцов и др., 1980; Козлов и др., 1991].

В геологическом строении Тутхливаямского рудного поля выделяются два структурных яруса, представленные эффузивно-пирокластическими отложениями вулканических комплексов, характерных для неогена северной части Срединного хребта Камчатки (рис. 1, б). Нижний структурный ярус сложен андезитовыми туфами и эффузивами умуваямского вулканического комплекса (N_{1um}), верхний — продуктами трахиандезит-дацит-андезитового толятоваямского вулканического комплекса (N_{1-2tl}). Дизъюнктивная тектоника представлена системой сбросов и сбросо-сдвигов северо-восточного и северо-западного простираний, с которыми связаны дайки, субвулканические тела, зоны дробления и гидротермальные жилы, содержащие рудную минерализацию. Рудопроявление Тутхливаям приурочено к субширотной зоне повышенной проницаемости в южной части рудного поля и разделено на два участка одноименным ручьем. В пределах участков

Таблица 1
Фоновые концентрации главных элементов

Au, г/т	0,01	Ca, %	1,4	Fe, %	0,40	Mo, г/т	1,7	Sb, г/т	1
Ag, г/т	0,5	Cd, г/т	0,25	Hg, г/т	0,50	Ni, г/т	1,4	Sc, г/т	1
Al, %	0,14	Co, г/т	1	K, %	0,02	P, г/т	54	Sr, г/т	20
As, г/т	3	Cr, г/т	6	Mg, %	0,06	Pb, г/т	5	V, г/т	5
Ba, г/т	8	Cu, г/т	6	Mn, г/т	150	S, %	0,02	Zn, г/т	6

выделяются рудные тела западного и восточного флангов [Боровцов и др., 1980; Козлов и др., 1991].

По доминирующей минеральной ассоциации выделяются два природных типа руд: золото-гессит-сульфидный и золото-адуляр-кварцевый [Безрукова и др., 2004; Боровцов и др., 1980; Козлов и др., 1991]. Руды с доминирующей золото-гессит-сульфидной ассоциацией локализованы в карбонат-кварцевых жилах, секущих вулканиты умуваямского комплекса. Руды характеризуются низкими отношениями Au/Ag (1/40–1/60). Основные рудные минералы — гессит, сфалерит, галенит, халькопирит и самородное золото. Оруденение с доминирующей золото-адуляр-кварцевой минеральной ассоциацией приурочено к адуляр- и карбонат-кварцевым жилам в районе контакта умуваямских и толятоваямских вулканитов. В составе руд отмечено высокое отношение Au/Ag (1/1 и выше) при фоновых концентрациях полиметаллов и теллура. Основным рудным минералом является самородное золото, в подчиненных количествах присутствует гессит. По результатам анализа структурного контроля локализации оруденения, вещественного состава руд и вариации Au/Ag отношения в литохимических пробах по первичным ореолам, рудные тела могут быть интерпретированы как продукты различных уровней единой эпитермальной системы. Рудное тело западного фланга — как верхние уровни системы, восточного — средние-нижние.

Прогнозные ресурсы рудопроявления Тутхливаям составляют 16.4 т золота, 383.4 т серебра категории P₁, 30 т золота, 692 т серебра категории P₂ [Волков, Кочетков, 2009].

Фактический материал и методы исследования. В работе представлены результаты обработки массива данных, составленного по результатам анализа химического состава проб, отобранных на рудопроявлении Тутхливаям в ходе рекогносцировочных работ. Пробы отобраны из обнажений жил и жильно-прожилковых зон профилями вкрест простирания методом пунктирной борозды при средней удельной массе пробы 3 кг/м. Анализ химического состава выполнен методами ME-ICP41 (царсководочная диссоциация навески 0,5 г с последующей атомно-эмиссионной спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES)) и Au-AA26 (пробирное обогащение навески 30 г с атомно-абсорбционным окончанием). Предел обнаружения составляет 0,01 г/т для Au; 0,2 г/т для Ag; 0,5 г/т для Be и Cd; 1 г/т для Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Sc, Sr, V; 2 г/т

для As, Bi, Pb, Sb, Zn; 5 г/т для Mn; 10 г/т для B, Ba, Ga, La, Li, P, Tl, U, W; 20 г/т для Th; 0,01 % для Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, S, Ti. Результаты анализа предоставлены ООО «Оссорская ГТК».

В ходе первичной обработки из массива данных были исключены элементы, содержащиеся в концентрациях ниже предела обнаружения в половине и более проб, и пробы богатых руд, содержащие концентрации Ag, Cu, Pb и Zn, превышающие верхний предел обнаружения (больше 1500 г/т Ag, 10 000 г/т Cu, Pb и Zn). Единичные концентрации ниже предела обнаружения заменены на половину предела обнаружения соответствующего элемента. Полученный массив содержит 667 строк, соответствующих отдельным пробам, и 25 столбцов, соответствующих химическим элементам, показавшим представительное распределение содержаний в интервале чувствительности метода (табл. 1). Концентрации всех элементов в массиве данных имеют логарифмически нормальное распределение. В начале исследования массив данных был разделен на две выборки, отвечающие разным флангам рудопроявления. Выборка для восточного фланга составила 221 пробу, для западного — 446 проб. По результатам проверки t-критерия Стьюдента распределение концентраций всех химических элементов в обеих выборках однородно. Методом кластерного анализа для каждой из выборок были построены корреляционные дендрограммы, позволившие выделить основные рудные элементы: Au, Ag, Cu, Pb, Zn. Принимая во внимание тот факт, что предел обнаружения Au превышает кларк континентальной коры [Rudnick, Gao, 2003; Taylor, McLennan, 1985] на 2 порядка, в целях повышения информативности за фоновое содержание Au принят предел обнаружения, для остальных рудных элементов фоновые содержания определены исходя из структуры распределения частот концентраций. Фоновые содержания для элементов определены как среднее геометрическое значение по массиву, полученные значения ниже предела обнаружения округлены до предела обнаружения или его половины в случае, когда для половины и более проб концентрация соответствует пределу обнаружения элемента (табл. 1).

Для составления геохимических ассоциаций были вычислены коэффициенты концентрации элементов по формуле:

$$K_c = \frac{C_{\text{ср.геом.}}}{C_{\text{ф}}},$$

где K_c — коэффициент концентрации, C_{ср.геом.} — средняя геометрическая концентрация, C_ф — фоновая концентрация. Геохимические ассоциации в выборках по содержанию золота отражают смену типа минерализации (табл. 2), наиболее интенсивно сигнал проявляется в выборке с содержанием золота более 1 г/т. На элементарных горизонтах рудопроявления (табл. 3) происходит закономерная смена элементов, которая позволяет предварительно счи-

Таблица 2

Геохимические ассоциации в выборках по содержанию Au

Участок	Выборка	Количество проб	Геохимическая ассоциация
Западный	полная	446	Au ₁₅ Ag ₃
	Au<0,25 г/т	295	Au ₄ Mg ₃
	Au≥0,25 г/т	151	Au ₁₅₂ Ag ₉
	Au≥1 г/т	82	Au ₄₆₄ Ag ₁₁
Восточный	полная	221	Au ₁₆ Ag ₁₃ Cu ₁₂ Zn ₁₂ Pb ₁₀ Cd ₉ K ₄ Mg ₄ P ₄ Al ₃ Fe ₃ V ₃
	Au<0,25 г/т	128	Zn ₅ K ₄ P ₄ Cu ₄ V ₄ Al ₄ Mg ₄ Fe ₄
	Au≥0,25 г/т	93	Ag ₂₅₅ Au ₂₁₃ Pb ₁₁₂ Cd ₆₀ Cu ₅₀ Zn ₄₄ S ₅ Mg ₄ Mo ₄ K ₃ Al ₃
	Au≥1 г/т	63	Ag ₅₂₁ Au ₄₃₄ Pb ₂₃₅ Cd ₁₃₂ Cu ₉₂ Zn ₈₃ S ₇ Mg ₅ Mo ₃ Al ₃ Fe ₃

Таблица 3

Геохимические ассоциации в погоризонтных выборках с содержанием Au не менее 1 г/т

Участок	Горизонт, м	Количество проб	Геохимическая ассоциация
Западный	1050–1300	13	Au ₂₂₄ Ag ₁₁ Sr ₄ Ca ₃
	950–1050	44	Au ₆₆₆ Ag ₁₁ Mg ₄ Zn ₃
	850–950	23	Au ₃₈₄ Ag ₁₀
	650–750	2	Au ₁₅₈ Ag ₁₂ Cu ₉ Pb ₆ Zn ₆ Cd ₄ Cr ₄ Mg ₄ V ₃
Восточный	650–750	27	Ag ₃₈₀ Au ₃₁₇ Pb ₁₄₀ Cu ₃₄ Zn ₂₆ Cd ₂₅ Mg ₅ S ₄ Mo ₄ Al ₃ Fe ₃ V ₃
	550–650	36	Ag ₆₆₁ Au ₅₄₉ Cd ₄₆₇ Pb ₃₄₇ Zn ₂₀₂ Cu ₁₉₁ S ₉ Mg ₅ Co ₄ Al ₃ Mo ₃ Fe ₃

тать, что можно формализовать смену ассоциаций с глубиной в виде ряда геохимической зональности.

Геохимическая зональность рудопоявления была изучена по программе исследований Нью-2 [Матвеев, Соловов, 2011; Соловов и др., 1990]. В целях усиления сигнала из массива исключены элементы, концентрации которых, вероятнее всего, объясняются наличием в жиле обломков вмещающих пород (Al, Co, Cr, Mg, Ni, P, Sc, V) и S, занимающая анионные позиции. Список сокращен до 16 элементов (Au, Ag, As, Ba, Ca, Cd, Cu, Fe, Hg, K, Mn, Mo, Pb, Sb, Sr, Zn). Концентрации приведены в формат надфоновых путем вычитания из каждого значения фоновой концентрации соответствующего элемента, в качестве характеристики элементарного горизонта использована средняя геометрическая по выборке концентрация элемента. Исследование проведено на двух «обучающих» выборках: Au≥0,25 г/т и Au≥1 г/т. На основе убывания с глубиной парных отношений средних содержаний элементов составлен ряд вертикальной геохимической зональности. Для выделения показателей зональности на предмет монотонности рассмотрены все возможные отношения содержаний элементов первого (120) и второго (7140) порядков. Предложенные показатели протестированы на всем массиве опробования.

Результаты исследования. Полученный ряд вертикальной зональности имеет следующий вид (снизу вверх): Cd–Pb–Zn–Cu–Ag–Mo–Sb–As–Hg–Fe–Ba–K–Mn–Au–Sr–Ca. По принципу наибольшей разрешающей способности выделены 3 монотонных показателя: SbSr/AgCd, SbSr/CdPb, SbSr/MoPb; и 2 показателя, сохраняющих монотонность

на большей части разреза: AgAs/CuPb, AgAs/CdPb (табл. 4). Для выделенных показателей построены калибровочные графики для оценки уровня эрозионного среза (рис. 2).

Интерпретация результатов. В геохимических ассоциациях выборок, характеризующихся пониженными содержаниями золота, коэффициенты концентрации полиметаллов (Cu, Pb, Zn) снижаются до уровня элементов, характерных для вмещающих пород (Al, Mg, P, V), при этом в обогащенных золотом группах проб эти коэффициенты повышены (табл. 2). Это позволяет в контексте выделения геохимической зональности рассматривать золотое и полиметаллическое оруденение в единой системе. Исходя из геохимической специализации погоризонтных выборок (табл. 3), оруденение восточного фланга можно охарактеризовать как комплексное серебро-золото-полиметаллическое. Для нижнего горизонта опробования (550–650 м, табл. 3) предполагается нижнерудный уровень эрозионного среза. Для западного фланга, главным образом опробованного на верхних горизонтах (>850 м, табл. 3), в целом характерно собственно золотое оруденение, что проявляется в существенном снижении коэффициентов концентрации серебра относительно золота, однако, на нижних горизонтах (650–750 м, табл. 3) сохраняются аномальные коэффициенты концентрации полиметаллов, что свидетельствует о наличии вертикальной зональности оруденения. На самом верхнем горизонте опробования (1050–1300 м, табл. 3) выделяются повышенные коэффициенты концентрации кальция и стронция, что интерпретируется нами как относительное преобладание

Таблица 4

Значения показателей для средних геометрических концентраций элементов по горизонтам

Выборка	Участок	Горизонт, м	Показатель				
			AgAs/CuPb	AgAs/CdPb	SbSr/AgCd	SbSr/CdPb	SbSr/MoPb
Au≥0,25 г/т	Западный	1050–1300	$3,4 \cdot 10^{-1}$	$6,5 \cdot 10^0$	$2,2 \cdot 10^0$	$1,1 \cdot 10^1$	$1,0 \cdot 10^2$
		950–1050	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^1$	$6,6 \cdot 10^{-1}$	$1,2 \cdot 10^0$	$2,2 \cdot 10^0$
		850–950	$3,0 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^0$	$2,8 \cdot 10^{-1}$	$2,6 \cdot 10^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-1}$
		650–750	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-2}$	$5,7 \cdot 10^{-2}$	$7,7 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
	Восточный	650–750	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$9,4 \cdot 10^{-4}$
		550–650	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$
Au≥1 г/т	Западный	1050–1300	$2,2 \cdot 10^{-1}$	$4,5 \cdot 10^0$	$1,2 \cdot 10^0$	$2,4 \cdot 10^0$	$1,3 \cdot 10^0$
		950–1050	$1,1 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^1$	$1,6 \cdot 10^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-1}$	$3,2 \cdot 10^{-2}$
		850–950	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$3,8 \cdot 10^{-3}$
		650–750	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$
	Восточный	650–750	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-1}$	$9,4 \cdot 10^{-4}$	$2,6 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$
		550–650	$6,0 \cdot 10^{-4}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$5,1 \cdot 10^{-6}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$

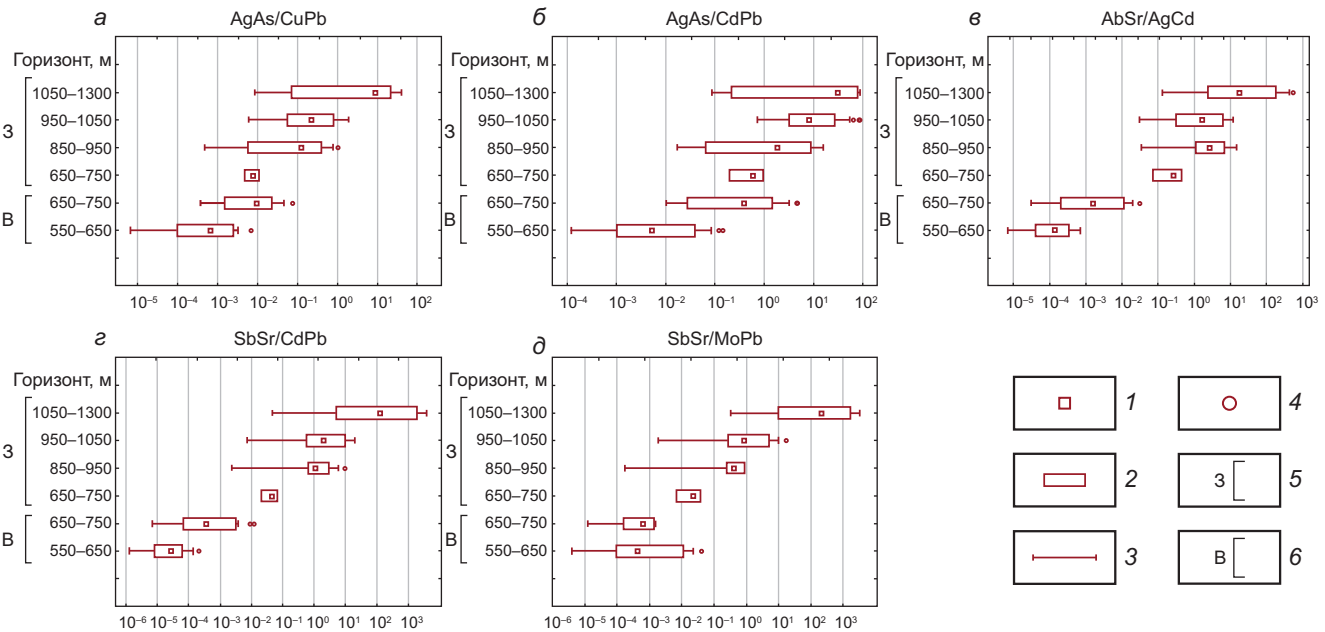


Рис. 2. Распределение по горизонтам значений предложенных показателей (выборка Au≥1 г/т): а — AgAs/CuPb, б — AgAs/CdPb, в — SbSr/AgCd, г — SbSr/CdPb, д — SbSr/MoPb. Условные обозначения: 1 — медиана, 2 — интервал 25–75 %, 3 — размах без выбросов, 4 — выбросы, 5 — западный фланг, 6 — восточный фланг. Отображены значения показателей, попадающие в интервал ±3 межквартильных расстояния от границ первого и третьего квартилей [Q1–3IQR; Q3+3IQR]

карбонатной минерализации, распространенность которой в надрудном эрозионном срезе эпитермальных месторождений адуляр-серицитового подтипа известна по литературным данным [Buchanan, 1981; Corbett, Leach, 1998; John, et al., 2018; Panteleyev, 1986]. Ряд вертикальной зональности (Cd–Pb–Zn–Cu–Ag–Mo–Sb–As–Hg–Fe–Ba–K–Mn–Au–Sr–Ca) отражает следующие основные закономерности. В нижней части разреза преобладает полиметаллическая минерализации (Cd, Pb, Zn, Cu), к этим же горизонтам приурочены максимальные концентрации серебра. Далее следует ассоциация элементов, интерпретируемая как сульфосольная с ртутью (Sb–As–Hg), что подтверждается единичными находками

в рудах восточного фланга соответствующих минералов (блеклые руды, пирсеит-полибазит, прустит, киноварь) [Козлов и др., 1991]. В правой части ряда расположены элементы, соответствующие проявлениям иллитового метасоматоза, баритовой и карбонатной минерализации (Ba, K, Sr, Ca), характерным для верхних горизонтов оруденения в соответствии с существующими моделями зональности [Buchanan, 1981; Corbett, Leach, 1998; John, et al., 2018; Panteleyev, 1986]. Положение золота в конце ряда зональности отражает преобладание собственно золотой минерализации в верхней части разреза, при этом в ряду зональности не отражено попутное с полиметаллическим золотое оруденение. Вопрос выделения гене-

Таблица 5

Выделяемые по значениям показателей уровни эрозионного среза

Эрозионный срез	Показатель				
	AgAs/CuPb	AgAs/CdPb	SbSr/AgCd	SbSr/CdPb	SbSr/MoPb
Надрудный	>1	>10	>10	>10	>10
Верхнерудный	10 ⁻¹ –1	1–10	1–10	1–10	10 ⁻¹ –10
Среднерудный	10 ⁻³ –10 ⁻¹	10 ⁻¹ –1	10 ⁻² –1	10 ⁻² –1	10 ⁻² –10 ⁻¹
Нижнерудный	10 ⁻⁴ –10 ⁻³	10 ⁻³ –10 ⁻¹	10 ⁻⁴ –10 ⁻²	10 ⁻⁵ –10 ⁻²	10 ⁻⁴ –10 ⁻²

раций золотого оруденения требует более дробного расчленения разреза на элементарные горизонты, что не представляется возможным на текущей стадии геологического изучения рудопроявления.

Предлагаемые нами показатели разделяются на 2 группы по элементам числителя. Показатели с числителем SbSr отражают преобладание карбонатной минерализации в надрудном эрозионном срезе и характерную для золото-серебряных месторождений вулканогенных поясов концентрацию Sb в верхних частях системы [Николаев, Аплеталин, 2005; Buchanan, 1981; Corbett, Leach, 1998; John, et al., 2018; Panteleyev, 1986]. Показатели с числителем AgAs основаны на существенном снижении концентраций полиметаллов в оруденении верхних горизонтов при сохранении значимых концентраций серебра и мышьяка. Задействованные в этих показателях элементы сосредоточены в левой части ряда вертикальной зональности достаточно близко друг к другу, что приводит к возникновению разброса частных значений показателя, особенно на верхних горизонтах опробования (рис. 2, а, б). Показатель со знаменателем AgCd учитывает приуроченность максимальных концентраций серебра к полиметаллической ассоциации нижних горизонтов.

Медианные по горизонтам значения показателей SbSr/CdPb, SbSr/MoPb и AgAs/CdPb монотонны, показателей SbSr/AgCd и AgAs/CuPb — близки к монотонности (рис. 2). Разрешающая способность показателей позволяет выделить 4 уровня эрозионного среза, интерпретируемых нами как нижнерудный, среднерудный, верхнерудный и надрудный (табл. 5). Выделяемые уровни эрозионного среза прослеживаются в распределении значений предложенных показателей для всего массива опробования (рис. 3). К надрудному эрозионному срезу отнесены участки жил, секущие вулканы толятовьямского комплекса в верхней части системы, рудное тело западного фланга обнажено на верхнерудном уровне эрозионного среза, рудное тело восточного фланга — на нижнерудном. Эрозионный срез выходов жил между рудными телами западного и восточного флангов интерпретируется как среднерудный.

Обсуждение результатов. Для определения сравнительной эффективности предлагаемых геохимических показателей при решении задачи оценки уровня эрозионного среза рудопроявления Тутхливаям был рассмотрен ряд показателей, пред-

ложенных предшественниками для оценки уровня эрозионного среза золото-серебряных месторождений вулканогенных поясов [Николаев, Аплеталин, 2005] и некоторых рудопоявлений Оссорского рудного района (Тутхливаям, Каньон, Северное) [Данилеско и др., 2005] (рис. 4).

Для большинства показателей наблюдаются генеральный тренд на убывание с глубиной (рис. 4, б, г, е–з) и принципиальная возможность выделения надрудного уровня эрозионного среза (рис. 4, б, г, е, з). Также стоит отметить картируемый показателем AuSb/PbAs элементный состав геохимической ассоциации горизонта (рис. 4, ж, табл. 3). При этом ни один из предложенных предшественниками показателей не демонстрирует монотонности медианных значений погоризонтных выборок и достаточной для выделения уровней эрозионного среза разрешающей способности. Таким образом, в результате исследования впервые получена возможность выделения уровней эрозионного среза рудопроявления Тутхливаям по значениям геохимических показателей. Предложенные показатели зональности могут быть использованы при оценке эрозионного среза менее изученных рудопоявлений Эруваямского рудного узла и Оссорского рудного района.

Закключение. Из распределения коэффициентов концентрации основных рудных элементов по горизонтам опробования можно сделать вывод о наличии на рудопоявлении Тутхливаям вертикальной геохимической зональности. Ряд вертикальной геохимической зональности (снизу вверх): Cd–Pb–Zn–Cu–Ag–Mo–Sb–As–Hg–Fe–Ba–K–Mn–Au–Sr–Ca. Зональность характеризуется эволюцией геохимической ассоциации по восстанию от серебро-золото-полиметаллической до собственно золотой, что проявлено в монотонном снижении коэффициентов концентрации полиметаллов (Cu, Pb, Zn) и повышении коэффициентов концентрации золота относительно серебра.

Исходя из положения элементов в ряду зональности и наблюдаемой картины распределения концентраций элементов в пробах можно заключить, что на западном фланге рудопоявления обнажен надрудный горизонт эпитермальной системы. Степень эродированности объекта возрастает к восточному флангу.

Для оценки уровня эрозионного среза рудопоявления Тутхливаям и аналогичных объектов региона

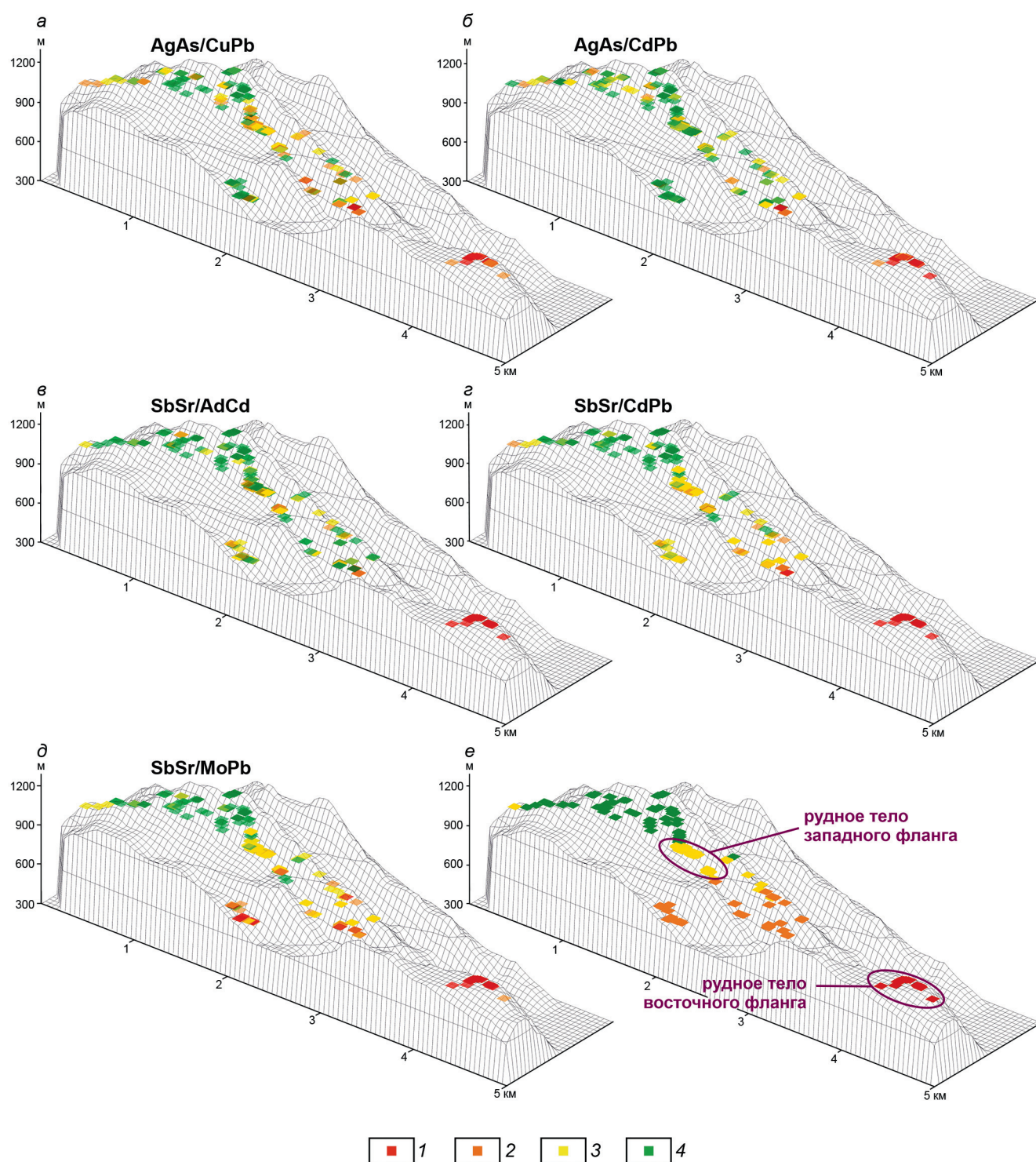


Рис. 3. Распределение значений показателей по интервалам опробования (а-д): а — AgAs/CuPb, б — AgAs/CdPb, в — SbSr/AgCd, г — SbSr/CdPb, д — SbSr/MoPb, е — Схема интерпретации эрозионного среза. 1 — нижнерудный эрозионный срез, 2 — среднерудный, 3 — верхнерудный, 4 — надрудный. Интервалы значений показателей, соответствующие уровням эрозионного среза, представлены в табл. 5

предложены следующие геохимические показатели: AgAs/CuPb, AgAs/CdPb, SbSr/AgCd, SbSr/CdPb, SbSr/MoPb. Для повышения точности рекомендуется использование при оценке уровня эрозионного среза всех предложенных показателей в комплексе со структурными и минералогическими данными.

Финансирование. Работа выполнена по госзада-нию Института вулканологии и сейсмологии ДВО

РАН в рамках темы научно-исследовательских работ «Минералообразование в надсубдукционной зоне Северной Пацифики» (№ FWME-2024-0004), а также в рамках госбюджетной темы кафедры геохимии Геологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова «Развитие комплексных методов физической, прогнозно-поисковой и экологической геохимии» (№ 121061600048-7).

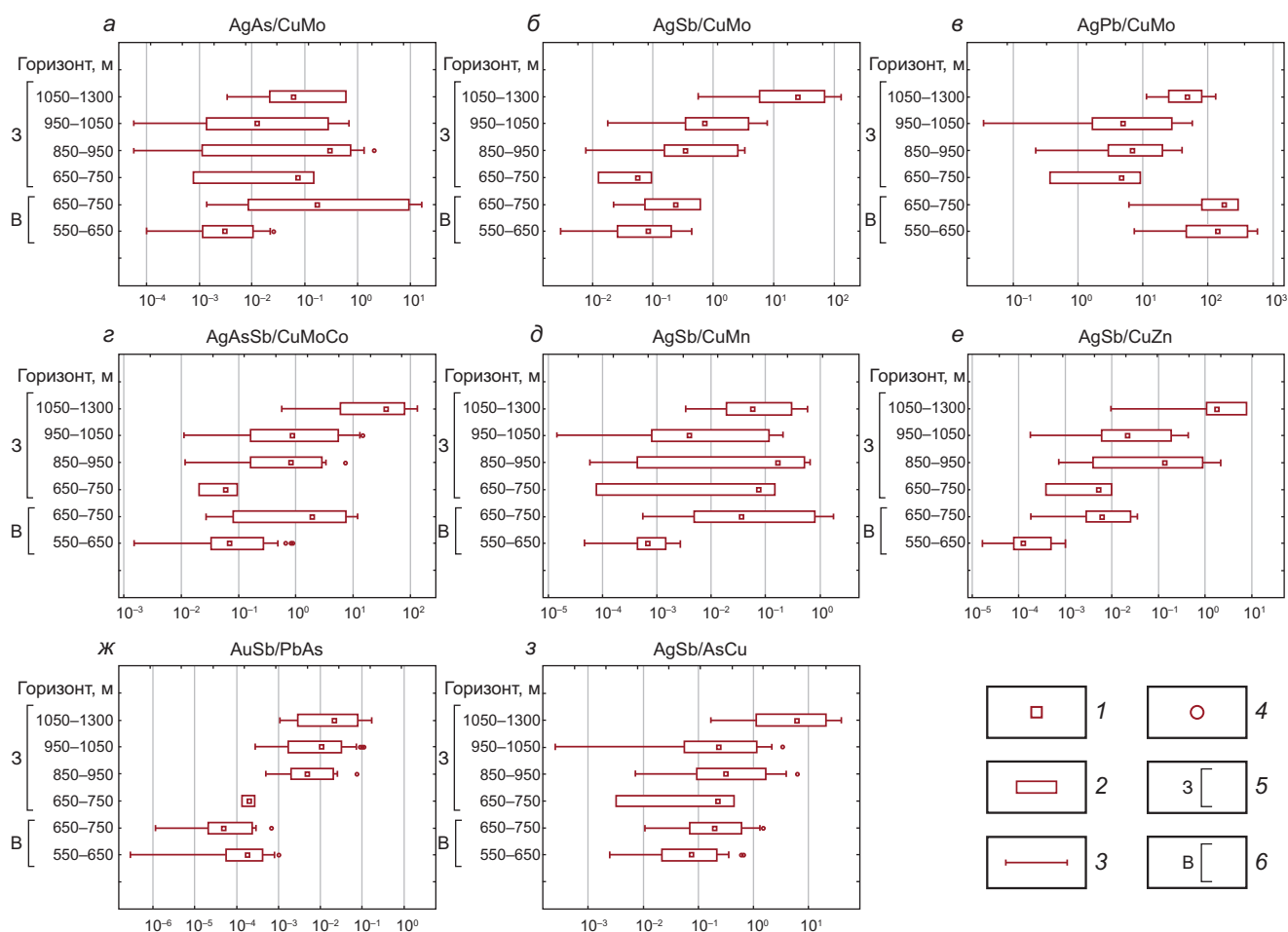


Рис. 4. Распределение по горизонтам значений показателей, предложенных предшественниками (выборка $Au \geq 1$ г/т) для оценки эрозийного среза рудопроявлений Тутхливаям, Каньон и Северное [Данилеско и др., 2005]: а — $AgAs/CuMo$, б — $AgSb/CuMo$, в — $AgPb/CuMo$, г — $AgAsSb/CuMoCo$; для оценки уровня среза золото-серебряных месторождений вулканогенных поясов [Николаев, Аплеталин, 2005]: д — $AgSb/CuMn$, е — $AgSb/CuZn$, ж — $AuSb/PbAs$, з — $AgSb/AsCu$. 1 — медиана, 2 — интервал 25–75 %, 3 — размах без выбросов, 4 — выбросы, 5 — западный фланг, 6 — восточный фланг. Отображены значения показателей, попадающие в интервал ± 3 межквартильных расстояния от границ первого и третьего квартилей [$Q1-3IQR$; $Q3+3IQR$]

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бортников Н.С., Толстых Н.Д. Эпитермальные месторождения Камчатки, Россия // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65, № 7. С. 722–752.

Волков А.В., Кочетков А.А. Золото Камчатского края. Состояние и перспективы освоения минерально-сырьевой базы // Золото и технологии. 2009. № 3(6). С. 18–29.

Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2022 году». М.: ФГБУ «ВИМС», 2023. 638 с.

Карта полезных ископаемых Камчатской области / Сост. «Камчатприродресурс», г. Петропавловск-Камчатский; гл. ред.: Литвинов А.Ф., Марковский Б.А., Патока М.Г. 1 : 500 000. СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. 19 л.

Матвеев А.А., Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. М.: Ун-т Книжный дом, 2011. 563 с.

Николаев Ю.Н., Аплеталин А.В. Критерии прогнозирования золото-серебряного оруденения вулканогенных поясов по геохимическим данным // Прикладная геохимия. № 7. Книга 1: Минералогия и геохимия. М.: ИМГРЭ, 2005. С. 202–217.

Николаев Ю.Н., Калько И.А., Аплеталин А.В. и др. Оценка степени эродированности рудно-магматических

систем на ранних стадиях ГРП как основа прогноза их перспективности // Повышение эффективности разно-масштабных геохимических работ при геологическом изучении недр. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. М.: ИМГРЭ, 2022. С. 23–26.

Соловов А.П., Архипов А.А., Бугров В.А. и др. Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых. М.: Недра, 1990. 335 с.

Buchanan L.J. Precious metal deposits associated with volcanic environment in the southwest: Arizona // Geological Society Digest. 1981. V. 14. P. 237–262.

Corbett G.J., Leach T.M. Southwest Pacific rim gold-copper systems: Society of Economic Geologists Special Publication 6. 1998. 237 p.

John D.A., Vikre P.G., du Bray E.A., et al. Descriptive models for epithermal gold-silver deposits. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070–Q. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2018. 247 p.

Panteleyev A. Ore Deposits № 10. A Canadian Cordilleran Model for Epithermal Gold-Silver Deposits // Geoscience Canada. 1986. V. 13. № 2. P. 101–111.

Rudnick R., Gao S. Composition of the Continental Crust // Treatise on Geochemistry. 2003. T. 3. С. 1–64.

Taylor S.R., McLennan S.M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution // *Geological Magazine*. 1985. Т. 122, № 6. С. 673–674.

ФОНДОВАЯ ЛИТЕРАТУРА

Боровцов А.К., Сидоренко В.И., Ким А.Г. и др. Отчет о результатах групповой геологической съемки масштаба 1 : 50 000, проведенной Эруваямской партией в 1974–1980 гг. в бассейнах рек Эруваям, Дранка, Лесной (листы О-57-24-Г; О-57-35-Г; О-57-36-А, Б, В, Г; О-57-47-А, Б; О-57-48-А, Б; О-58-13-В; О-58-25-А; О-58-37-А). 1980 г. 380 с. ФГБУ «Росгеолфонд». Инв. № 382401.

Безрукова Л.А., Газизов Р.Б., Большаков Н.М. и др. Информационный отчет о результатах 1-го этапа поисковых

работ, проведенных ОАО «Камгео» в пределах Оссорского рудного района в 1997–2004 гг. 2004. 272 с. ФГБУ «Росгеолфонд». Инв. № 482880.

Данилеско С.Н., Трещин Н.Н., Боровцов А.К. и др. Отчет о результатах работ по объекту «Прогнозно-поисковые работы на золото в Эруваямском и Сановаямском рудных узлах», проведенных Эруваямской партией в 2003–2005 гг. 2005. 164 с. ФГБУ «Росгеолфонд». Инв. № 485736.

Козлов А.П., Хохрин В.А., Фасхутдинов Ф.А. и др. Отчет о результатах поисковых работ, проведенных в пределах Тутхливаямского рудного поля в 1988–1991 гг. Эруваямским отрядом. 1991 г. 216 с. Камчатский филиал ФБУ «ТФГИ по ДФО». Инв. № 5558.

Статья поступила в редакцию 07.02.2025,
одобрена после рецензирования 23.05.2025,
принята к публикации 28.08.2025