

УДК: 552.11:553.49(571.65)

РЕДКОЗЕМЕЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ПЕЧАЛЬНИНСКОГО ВУЛКАНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА (Северо-Восток России)

Акинин В. В.^{ID}, Альшевский А. В.

ФГБУН Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт
им. Н. А. Шило ДВО РАН, г. Магадан
Email: akinin@neisri.ru

Приведены первые данные о минералах-концентраторах редкоземельных элементов в Печальнинском вулканическом комплексе (Магаданская область) кампанского возраста. Вулканический комплекс сложен серией небольших субвулканических тел риолитов, трахириолитов, их эксплозивных брекчий, а также базальтов, которые, судя по геохимическим данным, относятся к типичным внутриплитным проявлениям бимодальной формации. Риолиты экстремально обогащены редкоземельными элементами группы лантаноидов (ср. сумма РЗЭ = 1152 г/т, макс. до 5662 г/т), а также Rb, Zr, Y, Nb. Главные минералы-концентраторы редких элементов – монацит, алланит (ортит), гель-циркон, Nb-содержащие рутил и гематит. Для всех минералов, за исключением алланита, характерен мелкий размер выделения зерен, от 15 мкм до 2 мкм и менее. Установлены необычные сфероидные выделения гель-циркона, генезис которых связан с гидротермальной позднемагматической стадией вулканизма, в условиях высокого окислительного потенциала в высоконцентрированном сверхкритическом флюиде.

Ключевые слова: щелочные риолиты, бимодальная формация, редкоземельные элементы, гель-циркон.

DOI: 10.34078/1814-0998-2024-4-3-11

ВВЕДЕНИЕ

В переходной зоне между Иньяли-Дебинским синклиниорием и Буондино-Балыгычанским поднятием (Магаданская область), далеко за пределами Охотско-Чукотского вулканогенного пояса известно несколько изолированных и относительно небольших выходов щелочных риолитов и базальтов печальнинского комплекса, с которыми связаны считающееся мелким эпитермальное золото-серебряное месторождение Печальное, а также редкоземельная минерализация (Кунецов и др., 2008). Первые данные о петрографии и химическом составе молодых щелочных риолитов на левобережье р. Среднекан были опубликованы в 40–70-х гг. прошлого века (Стулов, 1947; Паньчев, Титов, 1978). В процессе последующих геологосъемочных и поисково-разведочных работ было установлено, что базальты и трахириолиты залегают с угловым несогласием на юрских отложениях, а дайки риолитов прорывают позд-

немеловой (85 млн лет) оловоносный Верхне-Оротуканский лейкогранитный массив. Впервые редкометальная минерализация в экструзивно-субвулканических трахириолитах была установлена В. Д. Ячной в конце 80-х гг. прошлого века на участке Печальный (рис. 1), в ходе проведения оценочных работ на золото-серебряное ору-денение. Кроме промышленных концентраций золота и серебра в образцах трахириолитов и их эксплозивных брекчий были установлены устойчиво высокие содержания Y, Yb, Be, Nb и Zr. Анализы были выполнены относительно неточными спектральным и рентгенорадиометрическим методами, но в дальнейшем повышенные концентрации подтвердились при анализе рентгенофлуоресцентным методом (Егоров и др., 2005; Глухов, Петров, 2006) и методом ICP-MS (Волков и др., 2023). Минералы-концентраторы редких элементов до сих пор не были установлены надежно, отмечалось лишь возможное присутствие сфена и бадделеита, без приведения химического состава. В настоящем сообщении мы восполняем этот пробел, приводим микрозондовый состав минералов с иллюстрациями характерных форм выделения.

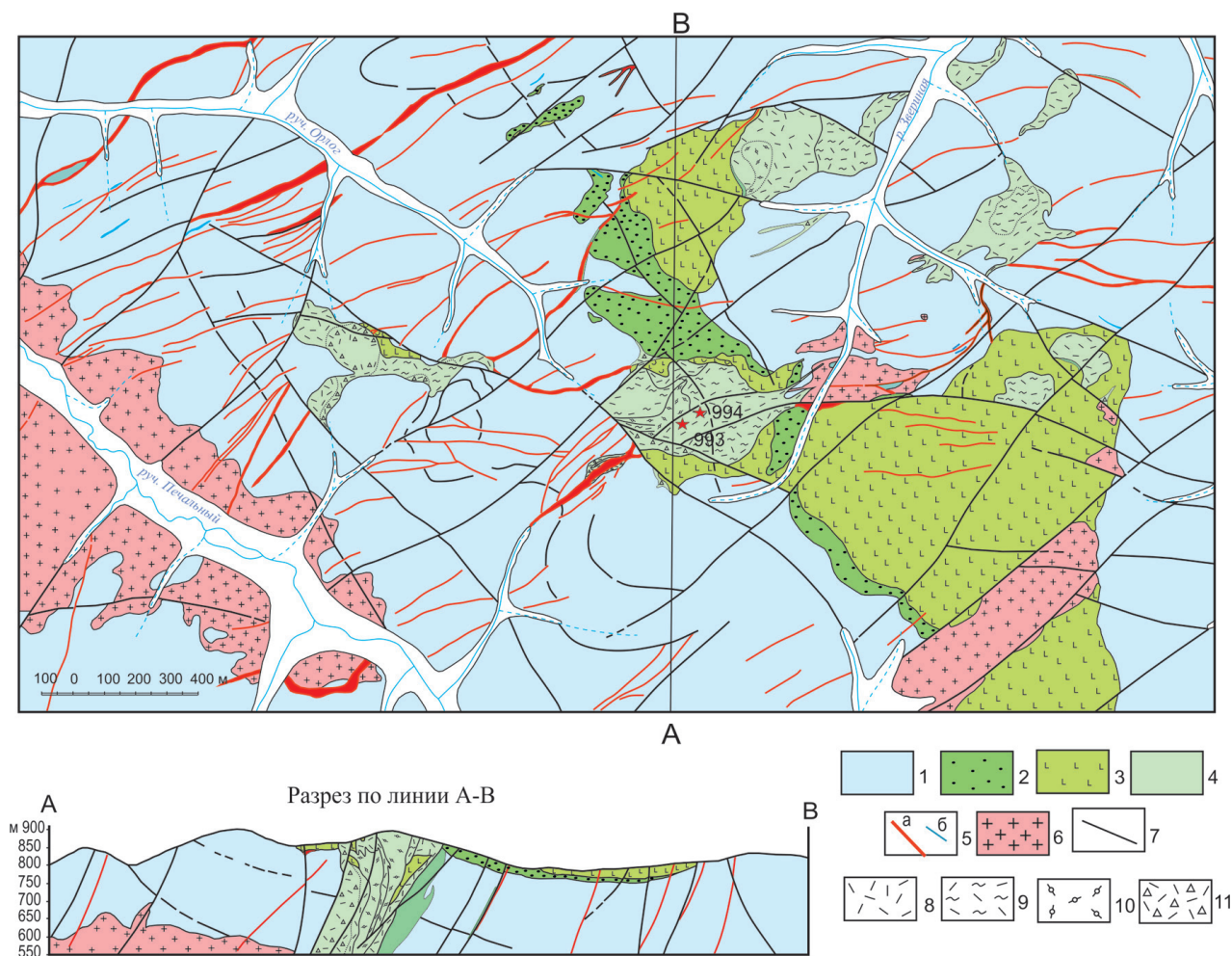


Рис. 1. Геологическая карта Печальнинского рудного поля (по В. Д. Ячной, с упрощениями). 1 – раннеюрские аргиллиты, алевролиты и песчаники; (2–5) кампанский Печальнинский вулканический базальт-риолитовый бимодальный комплекс: 2 – нижняя подтолща, полимиктовые конгломераты с обломками преимущественно юрских осадочных пород (0–55 м); 3 – средняя подтолща, базальты, андезибазальты, их туфы (0–163 м), 4 – верхняя подтолща, риолиты, трахириолиты, их туфы (60–200 м), 5 – дайки риолитов (а) и базальтов (б); 6 – сantonские оловоносные граниты omsukchanskogo комплекса; 7 – разрывные нарушения; (8–11) – литологические разновидности риолитовой верхней толщи Печальнинского комплекса: 8 – риолиты массивные, 9 – риолиты флюидальные, 10 – комендиты (щелочные риолиты), 11 – взрывные брекчии.

Fig. 1. Geological map of the Pechalny ore field (after V. D. Yachnaya, with simplifications). 1 – Early Jurassic argillites, siltstones, and sandstones; (2–5) Campanian Pechalny volcanic basalt-rhyolite bimodal complex: 2 – lower sub-unit, polymictic conglomerates with fragments of mainly Jurassic sedimentary rocks (0–55 m); 3 – middle sub-unit, basalts, basaltic andesites, their tuffs (0–163 m), 4 – upper sub-unit, rhyolites, trachyrhyolites, their tuffs (60–200 m), 5 – rhyolite (a) and basalt (b) dikes; 6 – Santonian tin-bearing granites of the Omsukchan complex; 7 – faults; (8–11) – lithological varieties of the Pechalny rhyolite unit: 8 – massive rhyolites, 9 – fluidal rhyolites, 10 – comendites (alkaline rhyolites), 11 – explosive breccias.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Образцы вулканитов были собраны нами в процессе полевых работ 2023 г., кроме этого исследованы несколько образцов из более ранних сборов 1989 г. Рентгенофлюоресцентный анализ горных пород (табл. 1) на главные и примесные элементы выполнен в ЦКП СВКНИИ ДВО РАН (г. Магадан) на спектрометре S4 Pioneer, используя стандартные процедуры анализа и методики NSAM 313-PC, 118-X, при этом погрешности

определения стандартов по главным элементам не превышали 0.4 % для SiO_2 и 0.2 % для остальных оксидов, для примесных элементов погрешность не превышала 5–6 %. ICP-MS анализ пород на примесные элементы, включая редкоземельные (РЗЭ), выполнен в центре коллективного пользования ИТиГ ДВО РАН (г. Хабаровск) на масс-спектрометре Elan 9000, повторяющиеся измерения стандартов BHVO-1, AGV-1 и BIR-1 показали погрешности не более 5–10 %.

Таблица 1. Химический состав риолитов Печальнинского комплекса

Table 1. Chemical composition of the Pechalny complex rhyolites

№ обр.	PE2-1	PE5-1	PE11-1	PE17-4			PE2-1	PE5-1	PE11-1	PE17-4
SiO ₂	75.74	73.56	72.44	76.30		Rb	723.7	558.6	1150.4	615.7
TiO ₂	0.18	0.17	0.24	0.16		Cs	11.2	10.3	179.3	7.8
Al ₂ O ₃	9.07	10.42	10.34	10.08		Ba	8.6	5.4	132.4	35.6
Fe ₂ O ₃	5.56	5.60	7.10	4.26		Sr	2.0	2.4	10.2	10.5
MnO	0.04	0.05	0.03	0.03		Ta	12.8	10.2	7.4	6.0
MgO	0.01	0.01	0.29	1.93		Nb	156.1	128.6	215.9	131.8
CaO	0.12	0.12	0.09	0.04		Hf	89.0	72.1	110.0	28.5
Na ₂ O	4.02	4.25	2.46	1.20		Zr	3606.3	3014.2	4780.4	1194.4
K ₂ O	3.93	4.25	4.94	4.31		Y	213.0	311.9	348.0	134.2
P ₂ O ₅	0.01	0.01	0.01	0.01		La	67.79	127.83	70.20	159.36
LOI	1.33	1.57	2.06	1.68		Ce	175.4	100.1	243.0	328.8
Сумма	100.01	100.01	100.00	100.00		Pr	25.14	34.01	30.32	36.85
Примесные элементы (г/т), ICP-MS						Nd	110.5	142.9	150.7	134.3
Cr	7.8	2.6	5.8	3.2		Sm	29.82	37.43	53.53	27.35
Ni	1.1	0.8	< 0.1	10.7		Eu	0.52	0.79	1.22	0.64
Co	0.2	0.1	< 0.1	0.7		Gd	32.30	42.00	56.42	27.43
Sc	10.4	10.9	10.9	8.9		Tb	5.73	7.28	9.99	4.38
V	0.8	0.9	1.5	2.8		Dy	36.79	47.05	63.73	26.35
Cu	6.4	6.9	5.6	7.7		Ho	8.01	10.56	13.34	5.32
Ga	36.4	39.7	44.0	42.8		Er	24.78	31.34	38.74	15.07
Pb	31.4	8.1	77.4	95.6		Tm	3.97	4.69	5.85	2.20
Sn	45.1	30.8	56.6	43.2		Yb	25.55	27.65	36.84	13.42
Mo	1.8	0.2	0.5	1.4		Lu	3.78	4.18	4.96	1.80
Se	1.9	2.3	4.1	1.7		Th	129.4	86.7	144.7	67.6
Ag	4.6	3.6	5.0	3.1		U	22.2	26.0	0.7	6.4
Au	0.7	0.6	0.5	0.3						
						Сумма РЗЭ	550	618	779	783

Составы минеральных фаз и изображения в обратно рассеянных электронах получены с помощью рентгеновского электронно-зондового микроанализатора Camebax с детектором X-max Oxford и программным обеспечением Aztec и Inca, а также на сканирующем электронном микроскопе EVO-50 с ЭДС детекторами и программным обеспечением QEMSCAN и QUANTAX (г. Магадан, ЦКП СВКНИИ ДВО РАН, аналитики О. Т. Соцкая, Е. М. Горячева). Отдельные образцы повторно проанализированы в МГУ им. М. В. Ломоносова (г. Москва).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проявления базальтов и риолитов печальнинского комплекса в последних работах связывали с так называемыми зонами тектоно-магматической активизации в тылу Охотско-Чукотского вулкано-генного пояса и напрямую сопоставляли по составу с вулканитами мыгдыкитской свиты, представляющими финальную стадию вулканизма в поясе (Goryachev, Khanchuk, 2002; Егоров и др., 2005; Глухов, Петров, 2006; Кузнецов и др., 2008). Надежных датировок возраста печальнинских вулканитов до сих пор нет, имеющиеся в базе данных ГЕОХРОН К–Аг даты по

валу пород широко варьируют от 97 до 59 млн лет, большей частью от 86 до 75 млн лет (Акиннин, Котляр, 1997). Рубидий-стронциевое датирование по валу пяти образцов показало дату в 80 ± 5 млн лет (Кузнецов и др., 2008). Наши новые К–Аг датировки двух монофракций свежего амфибола из риолитов показали возраст 79.8 ± 2.5 млн лет (масс-спектрометр МИ-1201, ИГЕМ РАН). Самым удивительным является то, что не удалось выделить циркон для U–Pb-датирования, хотя концентрация циркония в риолитах достаточно высокая и варьирует от 500 до 4780 г/т. Наши минералогические исследования показали, что циркон в породах исключительно мелкий, не превышает в размере 10–15 мкм, часто необычной округлой формы и не поддается традиционным способам выделения в тяжелых жидкостях. Характерные составы риолитов представлены в табл. 1. Исследованные риолиты по геохимическим особенностям относятся к высоко калиевой известково-щелочной и шощонитовой сериям (концентрации K₂O варьируют от 6.2 до 1.3 мас. % в 37 образцах). Сумма Na₂O + K₂O варьирует от 8.9 до 5.7 мас. %, при SiO₂ = 84–77 мас. %. Такие геохимические показатели соответствуют трахириолитам и риолитам, не по-

звolyют выделять среди них комендиты, как это было сделано во всех предыдущих работах. Высокие концентрации Rb (1150–282 г/т), Zr (4780–500 г/т), Nb (> 100 г/т) и суммы РЗЭ (ср. сумма РЗЭ = 1152 г/т, макс = 5662 г/т, мин. = 217 г/т, N = 25) позволяют надежно относить печальнинские риолиты к внутриплитным по геодинамическим условиям проявления. Они существенно отличаются от риолитов мыгдыкитской свиты Охотско-Чукотского пояса. Печальнинские базальты также характеризуются внутриплитными геохимическими характеристиками по соотношению Zr, Ti и Y и отличаются от мыгдыкитских базальтов существенно повышенными концентрациями Cs и U.

Массивные риолиты и трахириолиты в петрографическом отношении разнообразны по текстуре (флюидальные, полосчатые, мелкопорфировые) и окраске (от красной до фиолетовой), эксплозивные брекчии чаще сильно окислены (рис. 2). Порфировые магматические вкрапления в лавах представлены кварцем и санидином (рис. 3а), редко отмечаются относительно большие кристаллы амфибола – арфведсонита. Основная масса риолитов сложена мелкозернистыми кварцем, калиевым полевым шпатом и арфведсонитом (рис. 3, г, д, е, табл. 2). Акцессорные минералы представлены монацитом, алланитом (ортит), цирконом, магнетитом и рутилом (рис. 3, 4). Наложенные вторичные изменения – пелитизация полевых шпатов и гематитизация основной массы. В отдельных разностях устанавливаются «землистые» непрозрачные массы, сложенные смесью из минералов группы эпидота (обогащенного РЗЭ) и выделениями цирконий-содержащего силиката железа с субмикронной неоднородной структурой (рис. 3б, 4б, табл. 2).

Редкие и редкоземельные элементы сконцентрированы главным образом в монаците, цирконе и алланите. В монаците концентрации La варьируют от 9 до 19.5 мас. %, Ce – от 17 до

32 мас. %, Pr – от 1.5 до 2.8 мас. %, Nd – от 3.5 до 8.3 мас. %, Th до 1.8 мас. % (табл. 2). В алланите и РЗЭ-содержащем минерале из группы эпидота содержатся концентрации La до 4.7 мас. %, Ce до 7.3 мас. %, Pr до 0.4 мас. %, Nd до 1.4 мас. % (табл. 2). Повышенные концентрации Nb (Nb_2O_5 до 0.7–5.3 мас. %) установлены в рутиле и титаномагнетите (табл. 1).

Систематически в образцах отмечаются неидентифицированный минерал – силикат железа (или агрегат) с систематической примесью циркония до 8 мас. % («Fe–Si–Zr» на рис. 3б, табл. 2). При большом увеличении растрового электронного микроскопа в режиме отраженных электронов (BSE) четко видно, что эта рудная «фаза» (темная в оптике: собственно, богатая Fe и содержащая Zr) на субмикроруровне неоднородна и состоит как минимум из трех-четырех фаз, сильно различающихся по среднему атомному номеру. Размер обособлений так мал, что получить микрозондовые анализы чистых фаз не представляется возможным (из-за размера зонда 1–2 мкм), поэтому мы получаем суммарный состав смеси в данной микрообласти. В основе этой рудной смеси лежит оксид (или оксиды), главным компонентом которого является, вероятно, гематит, тонко прорастающий кварцем или иным силикатом (концентрация Si варьирует в анализах от 10 до 25 мас. %). В зависимости от яркости анализируемой микроплощадки меняется отношение Fe/Si, которое является здесь главной варьирующей величиной. Значимыми примесными компонентами в рудном веществе выступают Zr (от 0.7 до 12 мас. %), Ti (от 0.5 до 3.8 мас. %), Nb (до 0.8 мас. %) и Al (от 0.6 до 3.7 мас. %) (табл. 2). Их соотношения между собой и с главными компонентами этого «рудного минерального агрегата» достаточно существенно варьируют.

Мелкие кристаллы циркона (до 15 мкм), как правило, устанавливаются практически

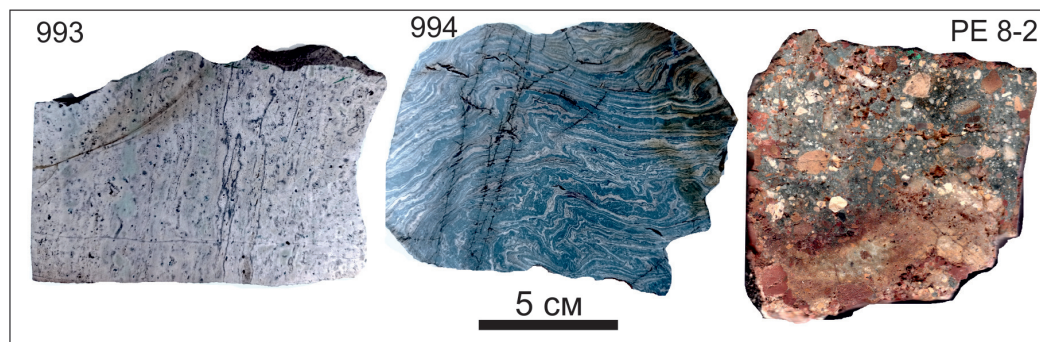


Рис. 2. Типичные образцы печальнинских риолитов. Обр. 993 – массивный трахириолит, обр. 994 – флюидальный полосчатый трахириолит, обр. PE 8-2 – эксплозивная брекчия риолита.

Fig. 2. Typical samples of Pechalny rhyolites. Sample 993 – massive trachyrhyolite, Sample 994 – fluidal banded trachyrhyolite, Sample PE 8-2 – explosive breccia of rhyolite.

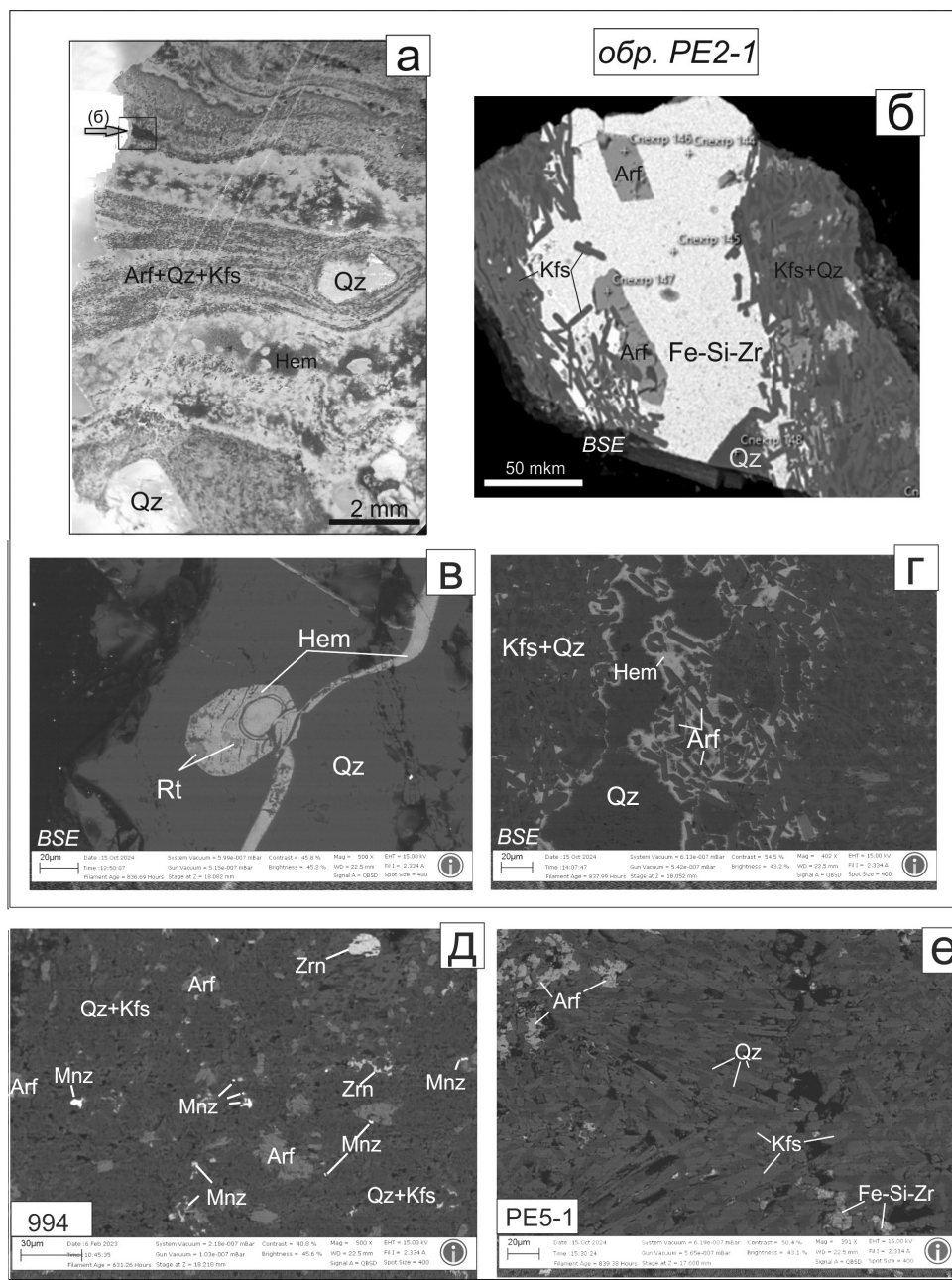


Рис. 3. Структуры в шлифах и формы выделения минералов в риолитах Печального. (а) – фото шлифа (обр. PE2-1) в бинокуляр; (б) – микроагрегат, состоящий из субмикронных выделений гематита + кварца + циркона? (Fe-Si-Zr), в калишпат-кварц-арфведсонитовом базисе риолита; (в) – позднемагматические выделения гематита (Hem) и рутила (Rt) в фенокристаллах кварца; (г) – выделения гематита, арфведсонита и опала в миароловых пустотах трахириолита; (д) – мелкие выделения монацита и циркона в арфведсонит-кварц-калишпатовой основной матрице риолита (обр. 994); (е) – характер выделения цирконий-содержащего силиката (Fe-Si-Zr) и арфведсонита (Arf) в кварц-калишпатовой основной массе риолита (обр. PE5-1). Здесь и далее на рисунках и в таблицах: Kfs – калиевый полевошпат, Qz – кварц, Arf – арфведсонит, Hem – гематит, Rut – рутил, MI – расплавленное включение, Zrn – циркон, Mnz – монацит, Fe-Si-Zr – цирконий содержащий силикат (микроагрегат, состоящий из субмикронных сростаний кварца, гематита и циркона?). Фото (б–е) – снимки в обратно рассеянных электронах (BSE).

Fig. 3. Thin-section photo of rhyolite in binocular (a) and back-scattered electron images of studied minerals (b–e) from Pechalny rhyolites; (b) – microaggregate of submicron phase of hematite + quartz + zircon? (Fe-Si-Zr) in the K-feldspar-quartz-arfvedsonite ground mass of rhyolite; (c) – late magmatic hematite (Hem) and rutile (Rt) in quartz phenocrysts; (d) – hematite, arfvedsonite and opal in miarolitic voids of trachyrhyolite; (d) – small gains of monazite and zircon in the arfvedsonite-quartz-K-feldspar matrix of rhyolite (Sample 994); (e) – zirconium-bearing silicate (Fe-Si-Zr) and arfvedsonite (Arf) in the quartz-potassium feldspar groundmass of rhyolite (Sample PE 5-1). Henceforth, in figures and tables: Kfs – potassium feldspar, Qz – quartz, Arf – arfvedsonite, Hem – hematite, Rut – rutile, MI – melt inclusion, Zrn – zircon, Mnz – monazite, Fe-Si-Zr – zirconium-bearing silicate (microaggregate consisting of submicron intergrowths of quartz, hematite and zircon?).

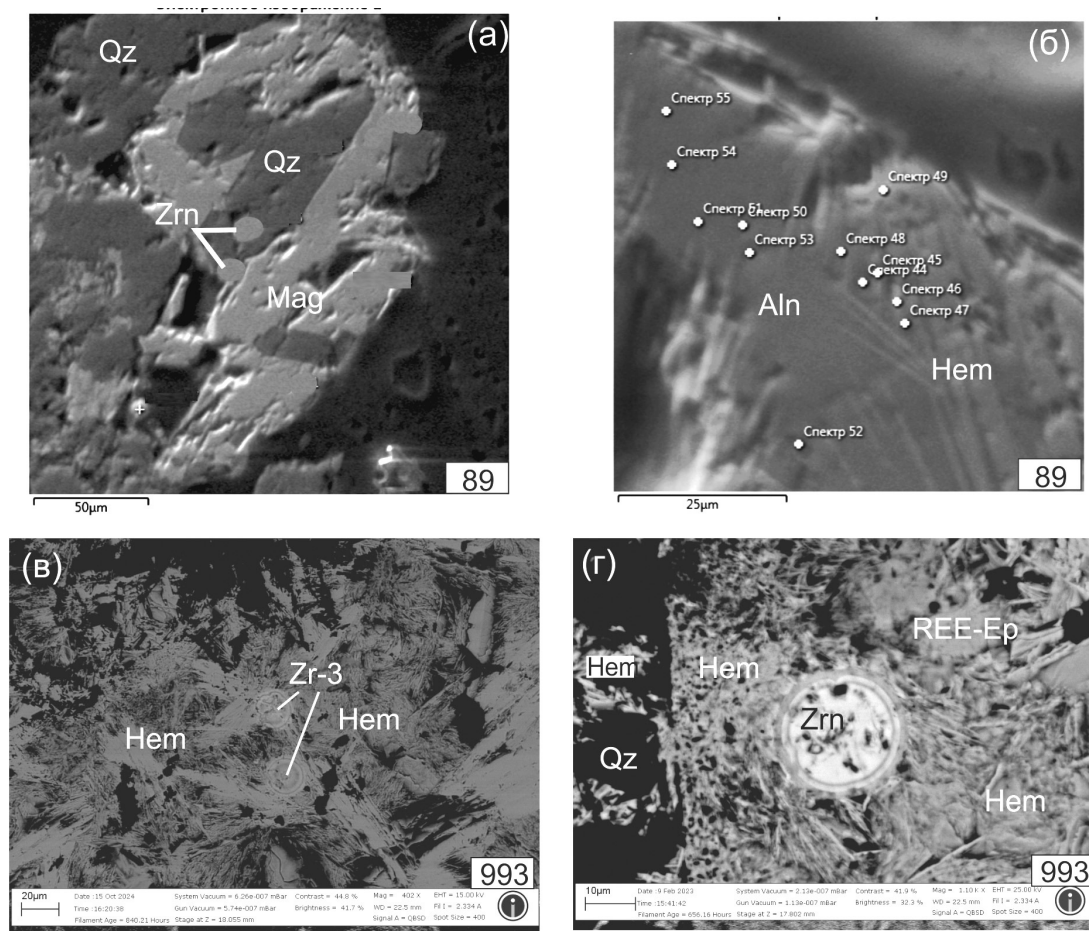


Рис. 4. Характер срастания и выделения минералов в риолите (обр. 89 и 993). (а) – округлые выделения Y-содержащего циркона (Zrn) в агрегате кварц + Nb-содержащий магнетит (Mag); (б) – срастания алланита (Aln) с гематитом (Hem); (в, г) – округлые выделения гель-циркона (Zrt) в гематите (Hem) и REE-содержащем эпидоте (REE-Ep, алланит?) из риолитов Печальнинского комплекса (обр. 993). Растровые изображения в обратно-рассеянных электронах сканирующего микроскопа EVO-50.

Fig. 4. Back-scattered electron images of minerals from rhyolites (Samples 89 and 993). (a) – rounded isolations of Y-bearing zircon (Zrn) in the aggregate of quartz + Nb-bearing magnetite (Mag); (b) – intergrowths of allanite (Aln) with hematite (Hem); (c, d) – rounded isolations of gel-zircon (Zrt) in hematite (Hem) and REE-bearing epidote (REE-Ep, allanite?) from rhyolites of the Pechalny complex (sample 993).

во всех образцах (рис. 3д). Они систематически содержат примесь Y и Al, иногда Fe, Ce, Th. При этом систематически отмечается существенный дефицит суммы измеренных элементов (от 10 до 13 мас. %), что, вероятно, указывает либо на пористый характер кристаллов, либо на присутствие в структуре воды. Весьма необычной идеально округлой формы мелкий (от 15 до 5 мкм) циркон устанавливается в сильно измененных, гематитизированных риолитах (рис. 4, в, г). Как правило, он выделяется в матрице гематита или PЗЭ-содержащем минерале из группы эпидота (алланит?). В таком сфероидном, похожем на «фрамбоиды» цирконе систематически содержатся неструктурные примеси Al (от 0.6 до 3.5 мас. %) и Fe, а также Y (от 2.5 до 3.1 мас. %), Ce (от 1.5 до 2.1 мас. %), иногда Th (до 1.9 мас. %) (табл. 2). Циркон с существенным дефицитом суммы компонентов

(вероятно содержащий до 10–15 мас. % H_2O) и содержащий неструктурные примесные элементы известен под названием «гель-циркон» (Helean et al., 1997). Экспериментальные исследования показали, что для схожего с природными фазами золь-геля циркония с формулой $ZrO_{2-x}(OH)_{2x} \times y H_2O$ при отжиге ниже 400 °C происходит аморфизация структуры соединения (Picquart et al., 2004). В отечественной литературе гель-циркон упоминается (без детальных анализов) в связи с щелочными интрузиями йолит-пегматитов и связанных с ними метасоматитов на юго-востоке Сибирской платформы (Пахомова, 2003; Залищак и др., 2006). Учитывая, что наши округлые мелкие гель-цирконы установлены только в измененных риолитах и концентрируются в гидротермальных прожилках гематита или в PЗЭ-обогащенном эпидоте, мы предполагаем, что они образуются на ги-

Таблица 2. Химический состав минералов из риолитов Печальнинского комплекса
Table 2. Chemical composition of minerals from the Pechalny complex rhyolites

№ обр.	PE2-1	PE2-1	PE2-1	PE2-1	PE2-1	89	89	89	PE5-1	PE5-1	993	993	28-2	
Min	Kfs	Arf	Hem	Rut	Fe-Si-Zr	max	min	Mag	Aln	Kfs	Fe-Si-Zr	REE-Ep	Mnz	
					сред.							Сред.	max	min
O	46.1	38.2	28.5	36.59	33.1	36	31.45	24.6	38.02	46.79	33.02	38.02	22.16	21.57
Si	32.22	23.80	2.06	1.16	12.57	25.33	13.67	0.47	15.92	31.07	16.56	14.47	0.72	0.44
Ti	0.00	1.10	0.41	43.98	0.90	2.27	0.32	2.11	0.00					
Al	8.02	0.58	0.38	0.12	0.85	1.97	0.37	0.06	9.17	8.59	3.59	7.05		
Fe	2.40	25.33	62.09	6.43	43.17	49.71	28.00	64.39	11.99	2.03	13.10	12.62		
Mn		0.41							1.54					
Ca	4.62	1.31							12.59			9.35		
Na	5.05	5.70								5.34	0.59			
K		1.24								5.53	0.89			
Zr					2.25	5.92	33.21	1.31			12.38			
Nb				3.73				0.51						
Y														
La							2.72	3.39	1.92			4.73	8.94	4.28
Ce												7.34	23.68	17.97
Pr													0.41	1.79
Nd												1.40	12.18	7.77
Sm													3.02	1.40
Gd													1.82	1.23
Hf							0.30	1.08						
Th							1.18	1.62						
U							0.32	0.88						
Сумма	98.4	97.7	93.4	92.0	92.8		89.2	93.5	91.1	99.3	80.1	95.0	89.12	
													P=13.5	P=12.80

Примечание: Приведены средние составы минералов (от 15 до 3 измерений для каждого минерала). Kfs – калиевый полевой шпат, Arf – арфведсонит, Hem – гематит, Rut – рутил, Zrn – гель-циркон, Mag – магнетит, Aln – алланит, REE-Ep – обогащенный РЗЭ минерал из группы эпидота, Mnz – монацит.

дротермальной позднемагматической стадии вулканизма, в условиях высокого окислительного потенциала в кремнеземистом высококонцентрированном флюиде.

В геохимических спектрах печальнинских риолитов, наряду с аномальными концентрациями R3Э, Rb, Zr, Y и Nb, устанавливаются повышенные содержания стандартных рудогенных элементов (Sn, Pb, Ag, Au, Se, табл. 1). С риолитами ассоциируют эпитеpmальные адуляр-кварцевые колломорфно-полосчатые жилы и прожилки, вмещающие сульфосольно-полиметаллическую золото-серебряную минерализацию. В составе жил установлены кюстелит (пробность 300–350 ‰), Fe-фрейбергит (Ag до 32 мас. %), селенистые разновидности Ag–Sb-минералов (пираргирит, стефанит, полибазит), а также акантит и науманнит. По-видимому, эта золото-серебряная с селеном минерализация является завершающей в сложном процессе гидротермального минералообразования Печальнинского комплекса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Печальнинский вулканический комплекс (Магаданская область) сложен бимодальной базальт-риолитовой высоко калиевой и шощонитовой серией вулканических пород, сформированных в кампане (около 80 ± 2.5 млн лет н.э., K–Ar-метод по амфиболу), в тылу Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Риолиты и трахириолиты экстремально обогащены R3Э, а также Rb, Zr, Y и Nb, что характерно для А-типа магм, извергающихся во внутриплитных геодинамических условиях и выплавлявшихся, вероятно, из обогащенного редкоземельными металлами субстрата. Главные минералы-концентраторы редких элементов – монацит, алланит (ортит), Y-содержащий гель-циркон, Nb-содержащие рутил и магнетит (гематит). Для всех минералов, за исключением алланита, характерен мелкий размер выделения зерен, от 15 мкм до 2 мкм и менее. Установлены необычные сфероидные выделения кристаллов гель-циркона, генезис которых связан с гидротермальной позднемагматической стадией вулканизма, в условиях высокого окислительного потенциала в высококонцентрированном сверхкритическом флюиде.

Полевые работы выполнены за счет субсидий по теме НИР СВКНИИ, аналитические исследования – за счет частичной поддержке гранта РНФ 20-17-00169-П и НОЦ «Север-территория устойчивого развития».

ЛИТЕРАТУРА

Акинин В. В., Котлярь И. Н. ГЕОХРОН – компьютерная база данных изотопного датирования мине-

ралов, горных пород и руд Северо-Востока России // Магматизм и оруденение Северо-Востока России / Ред. С. Г. Бялобжеский. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1997. С. 313–318.

Волков А. В., Галямов А. Л., Мурашов К. Ю. Щелочные риолиты Печальнинского рудного поля (Северо-Восток России) – потенциальный большеобъемный источник тяжелых редкоземельных элементов // Доклады Академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 510. № 1. С. 46–51. DOI: 10.31857/S2686739723600054.

Залищак Б. Л., Пахомова В. А., Тишкина В. Б. Месторождение Алгама // Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Ред. А. И. Ханчук. Владивосток: Дальнаука. С. 735–740.

Глухов А. Н., Петров С. Ф. Магматические ассоциации, металлогения и геотектоническая позиция Хурчан-Оротуканской рифтогенной структуры (Северо-Восток России) // Геология, география и биологическое разнообразие Северо-Востока России. Материалы Дальневосточной региональной конференции. Магадан: СВНИЦ ДВО РАН, 2006. С. 104–108.

Егоров В. Н., Жигалов С. В., Волков А. В., Сидоров А. А. О редкометальном оруденении в трахириолитах и комендитах Хурчан-Оротуканской металлогенической зоны // Доклады Академии наук. 2005. Т. 405. № 2. С. 237–242.

Кузнецов В. М., Жигалов С. В., Ведерникова Т. А., Шпикерман В. И. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-56 – Сеймчан. Объяснительная записка. Санкт-Петербург: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. 426 с.

Панычев И. А., Тутов В. А. О возрасте молодых эффузивов на правом берегу верховьев Колымы // Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Востока СССР. 1978. № 24. С. 68–71.

Пахомова В. А. Флюидные включения как источник генетической информации о процессах рудообразования: на примере месторождений Дальнего Востока : дис. ... канд. геол.-мин. наук. Владивосток, 2003. 168 с.

Стулов Н. Н. Дайки щелочных пород в бассейне реки Оротукан // Колыма. 1947 № 7. С. 9–12.

Goryachev N. A., Khanchuk A. I. The Origin of Late Cretaceous alkaline granitoids and basalts in the Upper Kolyma River area (the slab window tectonic model) // Deep-seated magmatism, magmatic sources, and the problem of the plumes: Proceedings of international workshop. Vladivostok: Dalnauka, 2002. P. 261–274.

Helean K. B., Burakov B. E., Anderson E. B., Strykanova E. E., Ushakov S. V., Ewing R. C. Mineralogical and microtextural characterization of “gel-zircon” from the Manibay mine, Kazakhstan // Materials Research Society symposia proceedings. Materials Research Society. 1997. Vol. 465. P. 1219–1226.

Picquart M., Lopez T., Gomez R., Torres E., Moreno A., Garcia J. Dehydration and crystallization process in sol-gel zirconia // Journal of thermal analysis and calorimetry. 2004. Vol. 76. P. 755–761.

Поступила в редакцию 29.11.2024.

Поступила после доработки 04.12.2024.

RARE-EARTH MINERALIZATION OF THE PECHALNY VOLCANIC COMPLEX (North-East of Russia)

V. V. Akinin, A. V. Alshevsky

North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n. a. N. A. Shilo, FEB RAS, Magadan

The article presents the first data on rare-earth element-concentrating minerals in the Campanian Pechalny volcanic complex (Magadan Oblast). The volcanic complex is composed of a series of small subvolcanic rhyolite and trachyrhyolite intrusions, their explosive breccias, and basalts lava flow, which, judging by geochemical data, belong to typical intraplate bimodal magmatism. Rhyolites are extremely enriched in rare-earth elements of the lanthanide group (average REE total = 1152 ppm, max. up to 5662 ppm), as well as in Rb, Zr, Y, and Nb. The main rare-element-concentrating minerals are monazite, allanite (orthite), gel-zircon, as well as Nb-bearing rutile and hematite. All minerals, except allanite, are characterized by a small grain size, from 15 μm to 2 μm and less. Unusual spheroid gel-zircon have been discovered; their genesis is associated with the hydrothermal stage of volcanism, at high oxidation state in a highly concentrated supercritical fluid.

Keywords: alkaline rhyolites, bimodal magmatism, rare-earth elements, gel-zircon.

REFERENCES

- Akinin, V. V., Kotlyar, I. N., 1997. GEOCHRON – a Computer Database of Isotope Dating of Minerals, Rocks, and Ores in the North-East of Russia, *Magmatism and Mineralization in the North-East of Russia*. Ed. S. G. Byalobzhesky. Magadan, NEISRI FEB RAS, 313–318 [In Russian].
- Glukhov, A. N., Petrov, S. F., 2006. Magmatic Associations, Metallogeny and Geotectonic Position of the Khurchan-Orotukan Riftogenic Structure (North-East of Russia), *Geology, Geography and Biological Diversity of the North-East of Russia. Proceedings of the Far Eastern Regional Conference*. Magadan, NESR FEB RAS, 104–108 [In Russian].
- Goryachev, N. A., Khanchuk, A. I., 2002. The Origin of Late Cretaceous Alkaline Granitoids and Basalts in the Upper Kolyma River Area (the Slab Window Tectonic Model), *Deep-seated Magmatism, Magmatic Sources, and the Problem of the Plumes: Proceedings of International Workshop*. Vladivostok, Dalnauka, 261–274.
- Helean, K. B., Burakov, B. E., Anderson, E. B., Strykanova, E. E., Ushakov, S. V., Ewing, R. C., 1997. Mineralogical and Microtextural Characterization of “gel-zircon” from the Manibay Mine, Kazakhstan. *Materials Research Society Symposia Proceedings*. 465, 1219–1226.
- Kuznetsov, V. M., Zhigalov, S. V., Vedernikova, T. A., Shpikerman, V. I., 2008. State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1: 1,000,000 (3rd Generation). Verkhoyansk-Kolyma Series. Sheet R-56 – Seymchan. Explanatory Note. St. Petersburg, VSEGEI Cartographic Factory [In Russian].
- Pakhomova, V. A., 2003. Fluid Inclusions as a Source of Genetic Information on Ore Formation Processes: Exemplified with Far East Deposits : Diss. ... Kandidata Geol.-Min. Nauk. Vladivostok [In Russian].
- Panychev, I. A., Titov, V. A., 1978. On the Age of Young Effusive Rocks on the Right Bank of the Upper Kolyma, *Materials on the Geology and Mineral Resources in the North-East of the USSR*. 24, 68–71 [In Russian].
- Picquart, M., Lopez, T., Gomez, R., Torres, E., Moreno, A., Garcia, J., 2004. Dehydration and Crystallization Process in Sol-Gel Zirconia, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 76, 755–761.
- Stulov, N. N., 1947. Alkaline Rock Dikes in the Orotukan River Basin, *Kolyma*. 7, 9–12 [In Russian].
- Volkov, A. V., Galyamov, A. L., Murashov, K. Yu., 2023. Alkaline Rhyolites of the Pechalny Ore Field (North-East of Russia) – a Potentially Large-Volume Source of Heavy Rare-Earth Elements, *Doklady Earth Sciences*. 510, 1, 46–51. DOI: 10.31857/S2686739723600054 [In Russian].
- Yegorov, V. N., Zhigalov, S. V., Volkov, A. V., Sidorov, A. A., 2005. Rare-Metal Mineralization in Trachyrhyolites and Comendites of the Khurchan-Orotukan Metallogenic Zone, *Doklady Akademiyi Nauk*. 405, 2, 237–242 [In Russian].
- Zalishchak, B. L., Pakhomova, V. A., Tishkina, V. B., Algama Deposit, *Geodynamics, Magmatism, and Metallogeny in the East of Russia*. Ed. A. I. Khanchuk. Vladivostok, Dalnauka, 735–740 [In Russian].