



УДК (552.1+550.4):553.3/.5(571.151)

ПЕТРОЛОГИЯ И ГЕОХИМИЯ ИНТРУЗИВНЫХ ПОРОД СИНЮХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)

А. И. Гусев¹, Н. И. Гусев²

¹Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В. М. Шукшина, Бийск, Россия; ²Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского, Санкт-Петербург, Россия

Приведены новые данные по фазовым взаимоотношениям, петрологии и геохимии пород Синюхинского массива и даек одноименного месторождения. Установлено пять фаз внедрения породных типов, формировавшихся в гомодромно-антидромной последовательности. Породы массива отнесены к окисленному типу. В глубинном очаге источником плавления были гранатовые и (в меньшей степени) шпинелевые лерцолиты обогащенного мантийного источника литосферного слэба со степенью частичного плавления от 0,2 до 0,4 и низким давлением. Формирование интрузивных пород массива происходило в постколлизивной обстановке. Флюиды магматитов массива и даек характеризовались высокими парциальными давлениями летучих компонентов (H₂O, Cl, F, CO₂), являвшихся главными переносчиками металлов. В породах проявлен тетрадный эффект фракционирования РЗЭ W-типа. Зависимости значений последнего и концентраций меди и золота в магматических породах и флюидах определялись различным режимом кислотности и щелочности среды. Месторождение относится к сложному семейству руд медно-золото-скарново-порфинового типа. Это подтверждается наличием в рудном поле, кроме золото-медно-скарнового оруденения, также медно-золото-порфинового типа на участках Черемуховая Сопка и Чир.

Ключевые слова: Горный Алтай, интрузивный магматизм, габбро, диориты, гранодиориты, граниты, монзониты, монцодиориты, тетрадный эффект фракционирования РЗЭ.

PETROLOGY AND GEOCHEMISTRY OF INTRUSIVE ROCKS OF THE SINYUKHINSKOYE DEPOSIT (GORNYY ALTAI)

A. I. Gusev¹, N. I. Gusev²

¹V.M.Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University, Biysk, Russia; ²A.P.Karpinsky Russian Geological Research Institute, Saint Petersburg, Russia

New data on phase relationships, petrology and geochemistry of the Sinyukhinskoye rocks and dikes of the same deposit are presented. Five phases of rock intrusions formed in a homodromic-antidromic sequence are found. The Sinyukhinskoye rocks fall in the oxidized type. In the depth, a source of melting was garnet lherzolites, and, to a lesser extent, spinel lherzolites of an enriched mantle source of the lithospheric slab with a degree of partial melting from 0.2 to 0.4 and low pressure. The formation of intrusive rocks of the deposit took place in the post-collisional environment. The magmatite fluids of the massif and dikes were characterized by high partial pressures of such volatile components as H₂O, Cl, F, CO₂, which were the main carriers of metals. The rocks exhibit the tetrad effect of the W-type REE fractionation. The dependences of the values of the latter and the concentrations of copper and gold in igneous rocks and fluids were determined by different regimes of acidity and alkalinity of the medium. The deposit belongs to a complex family of ores of the copper-gold-skarn-porphyr type. In the Cheryomukhovaya Sopka and Chir areas, this is also confirmed by the presence of the copper-gold-porphyr type in the ore field, in addition to the gold-copper-skarn mineralization.

Keywords: Gorny Altai, intrusive magmatism, gabbro, diorite, granodiorite, granite, monzonite, monzodiorite, tetrad effect of REE fractionation.

DOI 10.20403/2078-0575-2020-3-100-109

Горный Алтай локализуется в центральной части Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП), для которого важнейшее металлогеническое значение имеют месторождения меди и золота (медно-золото-порфировые, медно-золото-скарновые), характерные для герцинского тектоно-магматического цикла [19, 20]. Золото-медно-скарновое Синюхинское месторождение находится в северной его части и приурочено к субширотному поднятию в пределах западной части Кебезенского горста байкало-каледонских островодужных структурно-вещественных комплексов. В тектоническом плане Синюхинское рудное поле контролируется Кульбичско-Кубойской

зоной разломов. Оно приурочено к гравитационному максимуму и резко дифференцированному магнитному полю.

Синюхинское месторождение является интрузивно связанным и относится к средним объектам с запасами золота более 35 т и средним содержанием золота в рудах 9,2 г/т. Средние содержания золота в рудных телах месторождения изменяются в широком диапазоне (от 3,9 до 36,7 г/т), максимальное содержание превышает несколько килограммов на тонну. Концентрации меди в рудах варьируют от 0,4 до 3,7 %. А. Этлинджер и Л. Мейнерт впервые заметили, что Синюхинское месторождение имеет признаки сходства с медно-золото-скарново-пор-



финовым семейством месторождений [9]. Позднее было установлено, что Синюхинский рудный узел действительно перспективен не только на золото-медно-скарновое, но и на медно-золото-порфиоровое и золото-сульфидно-кварцевое оруденение, которое обнаружено на западном и северном флангах Синюхинского рудного поля (Черемуховая Сопка и участок Чир). Это обстоятельство предполагает выявление на глубоких горизонтах и на флангах рудного узла весьма перспективных и крупных по запасам порфиоровых систем.

В Синюхинском рудном узле локализованы Саракочинский габбро-плагиогранитовый (ранний кембрий) и Синюхинский габбро-диорит-тоналит-гранодиорит-гранитовый (ранний девон) массивы, а также небольшие тела габбро-гранитоидного кызыл-ташского (D_2) комплекса и лейкогранитов турочакского (D_1). На месторождении обильны дайки «пестрого» состава, варьирующие по породным типам от долеритов до лейкогранитов и местами в штольнях и скважинах составляющие до 60 % объема.

Изучением магматических пород Синюхинского рудного узла занимались многие исследователи [2, 6, 10]. Цель исследования – уточнить временную последовательность формирования фаз внедрения, петрологию и геохимию главного рудогенерирующего Синюхинского массива и сопровождающих его даек.

Методы исследований

Лабораторные анализы – силикатный на главные компоненты и ICP-MS – выполнялись в лаборатории ИМГРЭ (Москва); определения редких элементов в горных породах проведены эмиссионной спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре «OPTIMA-4300», для Cu, Zn, Pb, Li – методом ISP-AES и атомно-абсорбционное определение золота – из отдельной навески (Москва).

Геологическая характеристика интрузивных образований Синюхинского рудного поля

Ранее монцодиориты и монцониты Синюхинского массива относились ко второй фазе внедрения [3]. Однако в 2018 г. к северу от участка Рудная Сопка среди монцодиоритов нами встречено несколько тел гранодиоритов. Контакты указанных породных типов свидетельствуют о более позднем образовании монцодиоритов. Они воздействуют на гранодиориты в виде перекристаллизации, эпидотизации и хлоритизации. Ширина воздействия измеряется несколькими метрами, иногда до 12 м. Нередко к контакту приурочены жилы кварца с анкеритом и сульфидами (пирит, халькопирит) мощностью 20–40 см. В 2020 г. вблизи Ыныргинского участка одноименного сателлитного массива обнаружено секущее тело монцодиоритов, приуроченное к разлому среди гранодиоритов и гранитов. Таким образом, нами получены новые данные по

взаимоотношениям пород и становлению ранних фаз (от габбро до гранита) Синюхинского массива. Последний на ранних стадиях формировался из дериатов нормальной известково-щелочной серии расплавов: 1) габбро, диориты; 2) кварцевые диориты, умеренно-щелочные гранодиориты, тоналиты; 3) меланограниты, граниты; 4) лейкограниты). В 5-ю фазу внедрились породы повышенной щелочности (монцодиориты, монцониты). В целом магматический цикл для Синюхинского массива имеет гомодромно-антидромный характер.

Для решения возникшей проблемы изучены некоторые магматические образования, преимущественно в северной, центральной и северо-западных частях рудного поля. Монцодиориты и гранитоиды Синюхинского массива были изучены и опробованы в верховьях Лога Широкого и руч. Русановского. Западнее Лога Широкого обследованы граниты Цыганского массива кызыл-ташского комплекса, прорывающие кварцевые диориты, монцодиориты, монцониты и гранодиориты Синюхинского массива. В карьере Западного участка Синюхинского рудного поля изучены и опробованы золото-медно-скарновые образования и прорывающие их дайки (рис. 1).

Петро-геохимические особенности породных типов Синюхинского массива и даек

Петрографическая характеристика пород Синюхинского рудного поля изучена ранее [3]. Определения абсолютного возраста пород Синюхинского массива дали от 441 до 398,6 млн лет [3]. Представительные анализы пород Синюхинского массива и даек приведены в таблице.

По соотношениям основных петрогенных компонентов породы Синюхинского массива и даек относятся к метаалюминиевому и магнезиальному типам (рис. 2).

Соотношение K_2O/Na_2O в породах Синюхинского массива демонстрирует известково-щелочной уклон для ранних фаз его становления на этапе гомодромной последовательности и шошонитовый – на антидромном этапе (рис. 3). К шошонитовой серии пород относятся и дайки монцодиоритов и монцонитов.

На спайдер-диаграмме в некоторых породных типах фиксируются негативные аномалии по тербию и эрбию и позитивная – по тулию. Концентрации европия близки к хондритовым, на диаграмме не проявлена европиевая аномалия (рис. 4). В целом график распределения РЗЭ имеет изрезанный характер, свидетельствующий о значительной дифференциации редкоземельных элементов в породах.

Интерпретация полученных результатов

Ранее было установлено, что гранитоиды Синюхинского массива относятся к окисленному I типу Sr-недеплеированному, Y-деплеированному [2]. Формирование таких гранитоидов предполагает верхнемантийный источник. Подобные магмы вы-

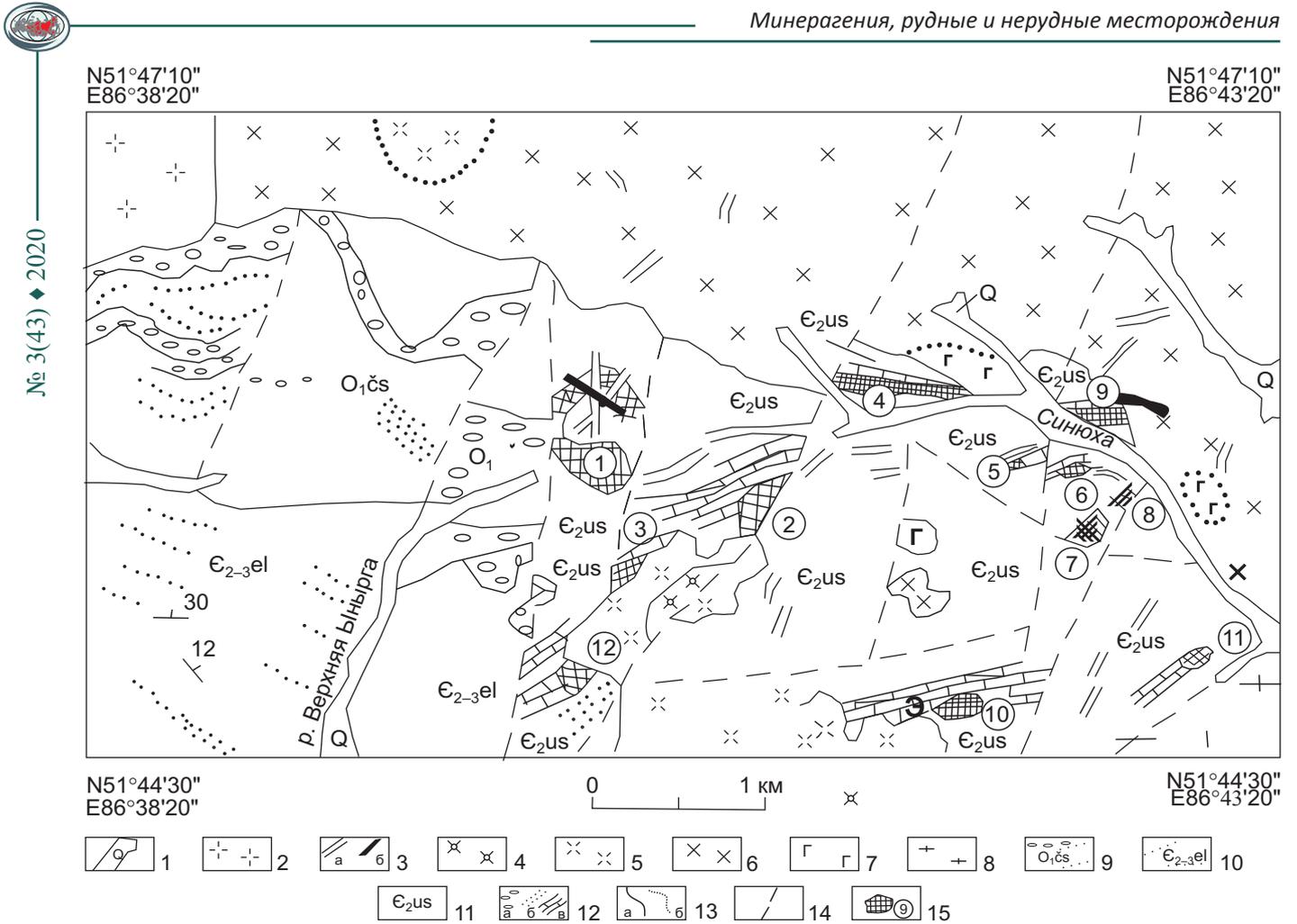


Рис. 1. Геологическая схема Синюхинского рудного поля

1 – неразделенные отложения квартера; 2 – граниты Цыганского массива кызыл-ташского комплекса (D_3); 3 – дайки основного и среднего состава; 4–7 – Синюхинский массив: 4 – монцодиориты, монциты, 5 – гранодиориты, тоналиты, 6 – диориты, кварцевые диориты, 7 – габбро; 8 – плагиограниты Саракокшинского массива (E_2); 9 – молассоиды чойской свиты (O_1cs); 10 – флишоиды еландинской свиты ($E_{2-3}el$); 11 – вулканогенные и осадочные отложения усть-семиинской свиты (E_{2us}); 12 – литология осадочных отложений: а – конгломераты и гравелиты, б – песчаники и алевролиты, в – известняки; 13 – геологические границы: а – достоверные, б – предполагаемые; 14 – разрывные нарушения; 15 – рудные участки и их номера: 1 – Западный, 2 – Ыныргинский, 3 – Первый Рудный, 4 – Западно-Файфановский, 5 – Файфановский, 6 – Новый, 7 – Нижний, 8 – Түшкенецкий, 9 – Горбуновский

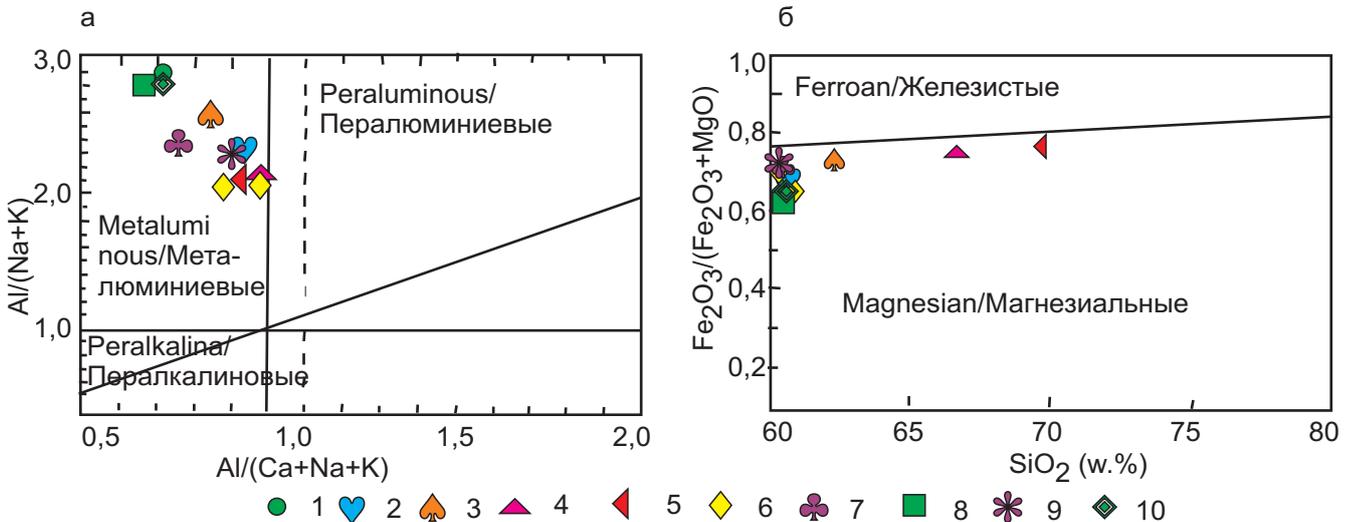


Рис. 2. Диаграммы $Al_2O_3/(Na_2O + K_2O) - Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ (а) по [15] и $Fe_2O_3/(Fe_2O_3 + MgO) - SiO_2$ (б) по [23] для пород Синюхинского массива и даек

1 – габбро; 2 – кварцевый диорит; 3 – тоналит; 4 – гранодиорит; 5 – гранит-порфир; 6 – монцодиорит; 7 – монцит; дайки: 8 – трахидолерита, 9 – трахиандезита, 10 – авгитового микродолерита



Химические составы основных разновидностей пород Синюхинского массива и даек
(оксиды – мас. %, элементы – г/т, Au – мг/т)

Компонент	Порода										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	50,16	56,84	62,69	66,34	69,88	54,59	53,83	57,1	51,1	53,12	50,5
TiO ₂	1,11	1,12	0,58	0,65	0,42	1,32	1,25	0,95	1,29	1,3	1,4
Al ₂ O ₃	16,60	15,12	15,54	14,10	13,87	15,53	16,0	16,43	16,11	16,6	16,7
Fe ₂ O ₃	5,27	4,98	3,78	2,22	1,84	6,42	6,6	4,5	5,1	4,82	5,34
FeO	5,78	2,82	2,99	3,11	2,07	2,71	2,9	4,1	5,4	5,1	5,72
MnO	0,17	0,21	0,13	0,09	0,08	0,19	0,16	0,1	0,2	0,05	0,2
MgO	5,62	3,76	2,11	1,83	1,02	4,12	4,04	3,5	6,1	3,9	5,8
CaO	9,75	6,24	5,04	2,76	2,13	6,96	6,7	4,6	8,6	6,4	8,1
Na ₂ O	2,9	3,71	4,12	3,53	3,86	4,37	4,53	4,8	3,75	6,02	3,75
K ₂ O	0,94	2,43	1,28	2,87	2,76	2,84	2,94	2,6	1,7	2,93	1,25
P ₂ O ₅	0,17	0,19	0,17	0,13	0,14	0,33	0,2	0,2	0,24	0,39	0,3
П.п.п	0,52	1,57	1,05	1,14	0,73	1,04	0,58	1,4	0,6	0,91	1,2
Сумма	100,02	98,99	99,79	98,77	99,80	100,42	99,75	100,3	99,8	99,7	99,9
Cr	75,2	47	101	44	36,6	49	54	43	120	38	220
Zr	50,9	65,4	64,6	63,7	62,0	65,6	77	151	101	140	46
Sr	516	520	558	331	193	414	442	330	520	480	80
Ba	323	322	450	190	390	327	361	550	370	265	45
Rb	26,9	40	55,4	60	80,6	42	49	72	41	26	44
Y	26,7	25	37,2	30	24,5	26	32	35	32	46	4,2
Nb	25,7	11	11,6	10	25,1	10	12	13	15	8	26
Ta	0,5	0,71	0,68	0,63	0,9	0,62	0,7	0,71	0,72	0,2	1,8
Ni	48,9	46	81,8	65	9,8	35	42	27	18	21	30
Co	17,6	34	23,6	46	3,1	21	26	26	50	22	29
Cu	50,7	46	52,4	137	41,7	82	92	460	58	43	54
V	82,5	107	117	79	22,5	76	89	140	165	226	310
Sc	37,4	16	17,9	11	7,3	11	15	22	31	21	43
Hf	1,41	2,19	2,20	2,21	2,32	2,16	2,22	2,1	3,1	2,2	1,1
Au	191	105	134	213	128	204	132	213	120	121	85
La	40,1	35,4	35,1	21,3	19,2	36,8	38,5	41,1	9,48	10,7	7,8
Ce	70,3	67,3	55,3	28,6	26,2	88,6	90,5	70,4	21,46	24,5	12,9
Pr	4,34	6,1	4,5	3,6	2,3	6,4	6,6	4,3	2,8	4,45	2,78
Nd	38,2	44,2	23,1	8,4	6,4	48,3	49,5	39,1	13,25	19,2	8,7
Sm	8,1	4,1	4,3	1,5	1,5	2,7	3,3	8,2	3,4	4,9	4,3
Eu	2,4	2,5	2,6	0,8	0,7	2,2	1,9	2,5	1,13	1,24	1,5
Gd	6,3	5,1	4,8	5,0	4,9	5,2	5,6	6,4	3,4	4,2	4,4
Tb	0,1	0,1	0,4	0,4	0,3	0,2	0,5	0,11	0,58	0,76	0,76
Dy	4,5	3,3	3,4	1,3	1,5	3,1	3,4	4,6	2,95	4,95	3,7
Ho	0,8	0,5	0,6	0,7	0,6	0,5	0,7	0,78	0,66	1,04	0,67
Er	1,6	1,3	0,7	0,9	0,4	1,2	1,6	1,65	1,76	3,03	1,8
Tm	0,1	0,6	0,6	0,9	0,8	1,1	1,4	1,5	0,21	0,35	0,17
Yb	1,3	1,7	1,7	1,2	1,3	1,6	1,66	1,23	0,9	2,7	0,97
Lu	0,3	0,5	0,6	1,0	1,1	0,4	0,47	0,32	0,1	0,34	0,06
Li	12	21	18	20	23	17	16	20	34	38	11
Cs	0,5	0,5	0,5	1,6	1,8	0,6	0,6	0,7	0,5	0,5	0,3
U	2,8	3,0	2,9	3,1	4,1	3,2	3,1	3,3	4,3	4,5	2,1
Th	4,6	5,2	5,1	7,2	8,3	5,8	6,0	5,9	6,2	7,8	4,2
Be	1,1	2,1	2,4	4,5	6,9	2,8	3,1	3,8	1,2	2,8	1,0
ΣREE	205,1	197,7	174,9	105,6	91,7	224,3	237,6	217,2	94,1	128,4	61,01
(La/Yb) _N	21,0	14,09	13,97	12,1	10,03	15,7	15,8	22,8	7,1	2,68	5,48
Eu/Eu*	0,99	1,66	1,74	0,81	0,71	1,76	1,34	1,01	1,0	0,81	1,04

Компонент	Порода										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
TE _{1,3}	0,48	0,77	0,75	0,74	0,7	0,67	0,75	0,46	0,96	1,02	1,04
Sr/Y	19,3	20,8	14,2	11,0	7,9	15,9	13,8	9,4	16,2	10,4	19,0

Примечания. N – элементы нормированы по [16]. $Eu^* = (Sm_N + Gd_N) / 2$. TE_{1,3} – тетрадный эффект фракционирования РЭЭ (среднее между первой и третьей тетрадами) по [13]. Породы: 1 – габбро, 2 – кварцевый диорит, 3 – тоналит, 4 – гранодиорит, 5 – гранит-порфир, 6, 7 – монцодиориты, 8 – монцонит; дайки: 9 – трахидолерита, 10 – трахиандезита, 11 – авгитового микродолерита.

№ 3(43) ♦ 2020

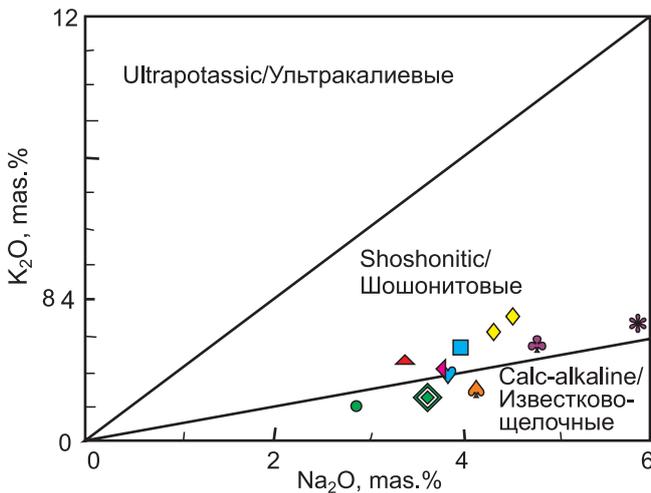


Рис. 3. Диаграмма K₂O – Na₂O по для интрузивных пород Синюхинского рудного поля

Усл. обозн. см. на рис. 2

плавляются из источника, обогащенного гранатом, что подтверждается их деплетированностью на иттрий. Низкие отношения Sr/Y (7,9–20,8), и умеренные (La/Yb)_N (10,03–22,), а также наличие HREEs, Y, Sc указывают, что их мантийный источник при плавлении не имел остаточного граната и частичное плавление литосферной мантии происходило при относительно низких давлениях. Этот же вывод подтверждает экспериментальная диаграмма соотношений по [17] $Al_2O_3 / (Fe_2O_3 + MgO + TiO_2) - Al_2O_3 + Fe_2O_3 + MgO + TiO_2$, на которой все составы породных типов попадают на кривую плавления при низком давлении – 3–5 кбар (рис. 5) [17].

На другой экспериментальной диаграмме, позволяющей реставрировать источник мантийного плавления для родоначальных расплавов, видно, что породные типы Синюхинского массива и сопровождающих даек трахитоидов тяготеют к трендам плавления гранатового лерцолита и в меньшей степени шпинелевого лерцолита обогащенного мантийного источника со степенью частичного плавления от 0,2 до 0,4 (рис. 6). Для даек авгитовых микродолеритов источником плавления были гранатовые лерцолиты деплетированного мантийного источника. Приведенные данные указывают на плавление гетерогенного мантийного источника.

Ранее по изотопным данным стронция и неодима породы рудного поля также были отнесены к мантийным образованиям [3].

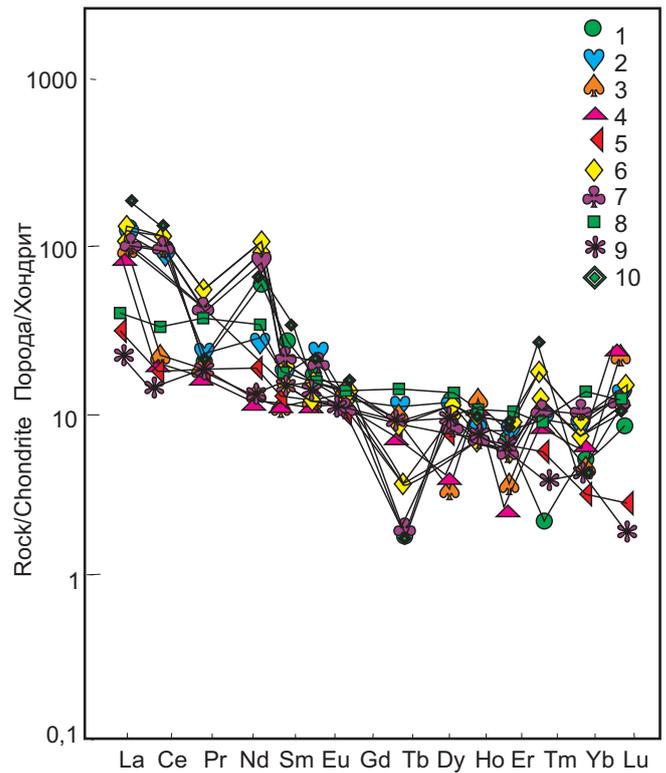


Рис. 4. Спайдер-диаграмма распределения редкоземельных элементов в интрузивных породах Синюхинского рудного поля

Усл. обозн. см. на рис. 2

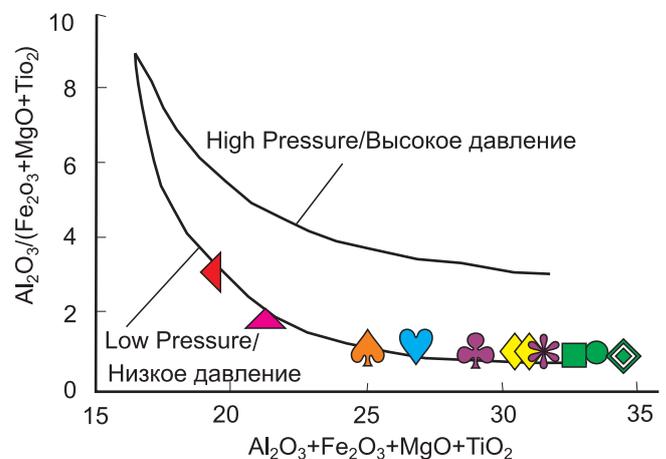


Рис. 5. Экспериментальная диаграмма $Al_2O_3 / (Fe_2O_3 + MgO + TiO_2) - Al_2O_3 + Fe_2O_3 + MgO + TiO_2$ по [17] для пород Синюхинского рудного поля

Усл. обозн. см. на рис. 2

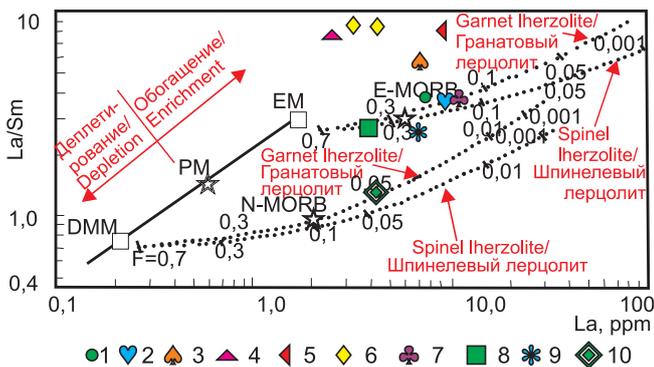


Рис. 6. Диаграмма La/Sm – La по [18] для пород Синюхинского рудного поля

DMM – деплетированный мантийный источник MORB; PM – примитивная мантия; EM – обогащенный мантийный источник, $R = \max/\min = 1 \cdot 10^7$; E-MORB – и N-MORB – составы обогащенных (E) и нормальных (N), базальтов срединно-океанических хребтов; точечные линии – тренды плавления источников DMM (деплетированная метасоматизированная мантия) и EM (обогащенная мантия), засечки с цифрами на точечных линиях – степень частичного плавления для соответствующих мантийных источников; остальные усл. обозн. см. на рис. 2

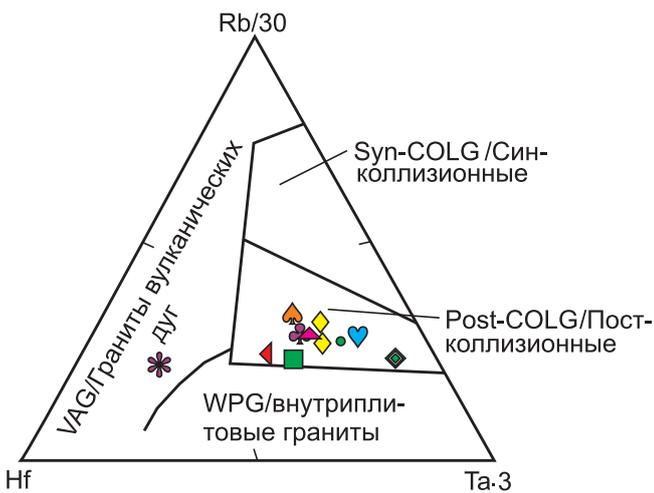


Рис. 7. Дискриминационная диаграмма Rb – Hf – Ta для интрузивных пород Синюхинского рудного поля
Усл. обозн. см. на рис. 2

В последнее время большинство исследователей относят магматиты Синюхинского массива к раннедевонскому возрасту, а геодинамическую обстановку формирования интрузивного магматизма этого возраста интерпретируют как активную континентальную окраину андийского типа [4]. Однако наши новые данные свидетельствуют о пролонгированном характере становления массива от раннего силура до раннего девона (от 441 до 398,6 млн лет) и сложной гомодромно-антидромной последовательности его формирования, что позволяет уточнить и его геодинамическую интерпретацию.

Для определения геодинамической обстановки формирования интрузивных пород воспользуемся микроэлементами, наименее подвижными в процессе наложенных вторичных изменений. Таким условиям отвечает дискриминационная диаграмма Х. Харриса и др. [12] (рис. 7).

Все породные типы рудного поля за исключением дайки трахиандезита попадают в поле постколлизийной обстановки.

Указывается, что для некоторых регионов наиболее характерными интрузиями постколлизийных обстановок являются монцонитовые и шошонитовые серии [14].

По данным Р. Силлитоу [21], около 20 % крупных золоторудных месторождений ассоциированы

с шошонитовыми и щелочными породами, которые превышают 3 % объема циркум-тихоокеанских изверженных пород. Он считает ассоциацию золотых месторождений и калиевых изверженных пород одним из четырех критериев, благоприятствующих образованию порфировых и эпитермальных золотообогащенных месторождений мирового класса в Циркум-Тихоокеанском регионе и связывает эту ассоциацию с частичным плавлением литосферного слэба в мантии, где происходит окисление сульфидов и высвобождение золота [21].

Во всех породах Синюхинского массива наблюдается геохимическая специализация на медь и золото. При этом концентрации меди в породах превышают среднее значение в мантии (30 г/т), а в некоторых пробах и в хондритах даже 112 г/т, варьируя от 41,7 до 460 г/т. Это подтверждает происхождение рудогенерирующей магмы из Cu-обогащенного источника [7]. Установлено, что окисленные интрузии (в том числе и Синюхинский массив), с которыми ассоциируют порфировые медно-золотые месторождения, имеют отношения $Eu/Eu^* \geq 1$ [11].

Ранее нами было установлено, что породные типы изучаемого массива характеризуются аномальными параметрами флюидного режима, для которого характерны повышенные концентрации, парциальные давления и активности таких летучих компонентов, как H_2O , Cl, F, CO_2 , являвшихся главными переносчиками золота во флюидах [2]. В породах массива проявлен тетрадный эффект фракционирования (ТЭФ) РЗЭ W-типа 0,46–0,77 (см. таблицу), что обусловлено флюидным режимом на магматическом этапе. Обычно этот эффект вызывается существенно водными флюидами с большим парциальным давлением Cl, CO_2 .

На диаграмме, отражающей зависимость содержания золота в породах и значений ТЭФ РЗЭ W-типа, наблюдается увеличение ТЭФ РЗЭ и повышение концентраций золота (рис. 8). При этом четко видно, что увеличение содержания золота происходит в монцонитоидных породах.

Обратная картина наблюдается для меди. С увеличением ТЭФ РЗЭ W-типа уменьшаются концентрации меди в породных типах (рис. 9). Максимальные значения ТЭФ РЗЭ W-типа характерны для габброидов и авгитовых микродолеритов, а концентрации меди – для монцониоидов. Следует отметить, что

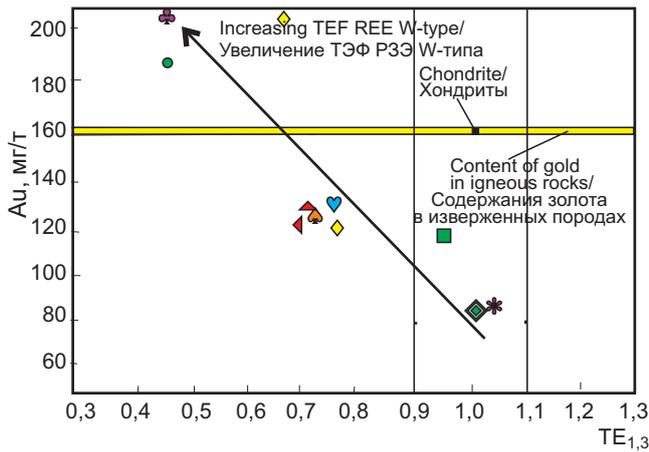


Рис. 8. Диаграмма Au – TE_{1,3} для интрузивных пород Синюхинского рудного поля

Желтое поле – концентрации золота в магматических породах по [1]; содержания золота в хондритах по [8]; остальные усл. обозн. см. на рис. 2

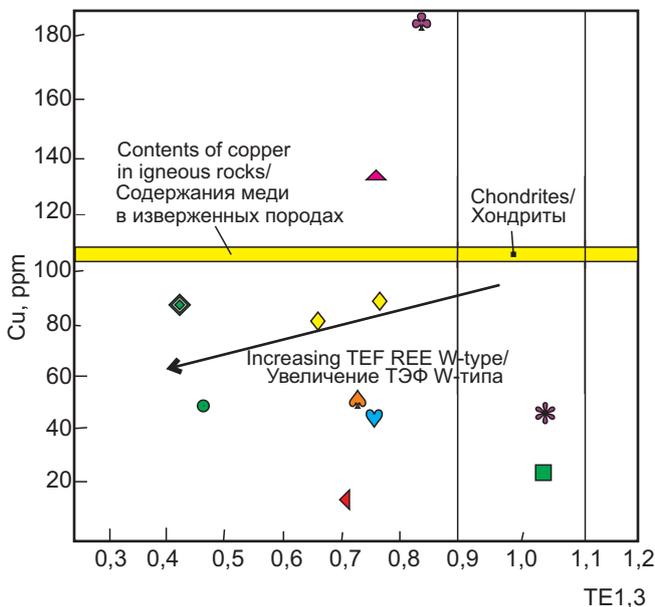


Рис. 9. Диаграмма Cu – TE_{1,3} по для интрузивных пород Синюхинского рудного поля

Желтое поле показывает концентрации меди в магматических породах по [1]; содержания меди в хондритах по [8]; остальные усл. обозн. см. на рис. 2

в рудных залежах Синюхинского месторождения медная минерализация (борнит, халькозин, халькопирит) отлагалась раньше золота и нередко максимумы концентраций меди и золота не совпадают.

На диаграмме Eu/Eu* – TE_{1,3} наблюдается слабое уменьшение значений Eu/Eu* с увеличением ТЭФ РЗЭ W-типа (рис. 10). Согласно рядам кислотности – щелочности элементов по [5] для спектра элементов Sm, Gd, Eu в водно-сероводородных растворах при стандартных условиях соответствует повышению щелочности среды. Таким условиям близко поведение меди для породных типов Синюхинского рудного поля (см. рис. 9). Следовательно, тренд увеличения содержания золота в породах будет соответствовать увеличению кислотности среды. Таким

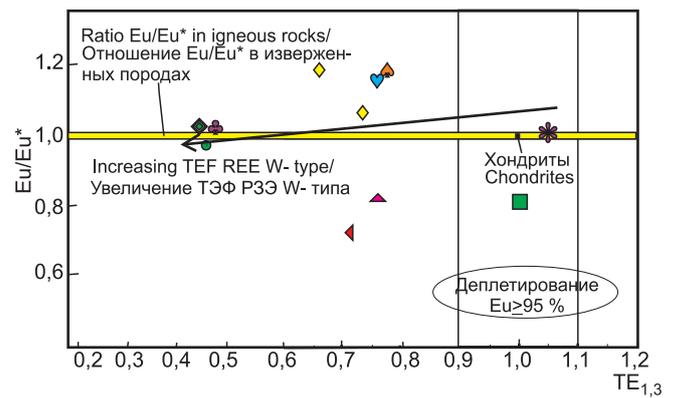


Рис. 10. Диаграмма Eu/Eu* – TE_{1,3} по для интрузивных пород Синюхинского рудного поля

Желтое поле показывает отношения Eu/Eu* в магматических породах по [1]; остальные усл. обозн. см. на рис. 2

образом, для меди и золота в магматических породах и флюидах были различные условия кислотности и щелочности среды. Минералогическое подтверждение более поздней кристаллизации золота относительно меди приведено в работе [2]. Золото предпочтительно ассоциирует с теллуридами и накладывается на сульфидные ассоциации.

Синюхинское рудное поле располагается в средней части Центрально-Азиатского складчатого пояса, металлогения которого на девон-каменноугольном этапе формирования определялась глубинными очагами вулканоплутонических комплексов (ВПК), а не только интрузивной составляющей. С комплексными ВПК на площади ЦАСП пространственно и парагенетически связаны совмещенные рудные объекты золота нескольких типов, образующих своеобразные рудные семейства:

- медно-золото-скарново-порфировое (Синюхинское золото-медно-скарновое и медно-золото-порфировое месторождение в Горном Алтае; медно-золото-порфировое Ою-Толгой в Монголии, золото-медно-порфировые Алмалык в Узбекистане, Коунрад в Казахстане) [19, 22];

- медно-золото-серебряное порфирово-эпитермальное (эпитермальные золото-серебряные месторождения Наурызбай и Сымбыл в Казахстане; эпитермальные золото-теллуридные Кайрагач и Кочбулак в Узбекистане, для которых прогнозируется и золото-порфировое оруденение; эпитермальные золото-серебряные Сурич, Тьдтугем и Красноярское в Горном Алтае; Южно-Коксаирское золото-серебряное эпитермальное в Горном Алтае, ассоциирует с золото-порфировым оруденением);

- колчеданно-полиметаллически-золото-серебряное эпитермальное (колчеданно-полиметаллические обогащенные золотом Змеиногорское, Золотушинское, Риддер-Сокольное месторождения и эпитермальное золото-серебряное Черепановское в Рудном Алтае).

Многие из перечисленных месторождений относятся к объектам мирового класса. Некоторые перспективны не только на основное известное



в настоящее время оруденение, но и на сопутствующие типы, выявляемые по зональности оруденения. К таким перспективным металлогеническим таксонам можно отнести и области распространения девонских вулканоплутонических поясов в Горном Алтае, где в последнее время открыто несколько эпитермальных золото-серебряных месторождений. В последних имеются и проявления золото-порфирирового типа, которые могут формировать весьма крупные объекты по запасам. В Рудном Алтае помимо преобладающего колчеданно-полиметаллического, обогащенного золотом типа оруденения и эпитермального золото-серебряного нами обнаружено несколько объектов, совмещающих колчеданно-полиметаллическое и эпитермальное золото-серебряное оруденение (Семеновское и Сургутановское месторождения).

Выводы

Новые данные позволяют относить Синюхинский массив к пролонгированному типу интрузий, формировавшемуся в пять фаз. В глубинном магматическом очаге, генерировавшем интрузивный массив, вначале наблюдается гомодромная последовательность внедрения дериватов, а затем антидромная. В этой последовательности происходит смена известково-щелочного состава на шошонитовый (монзонитоидный). Интрузивный массив и сопровождающие дайки трахитоидов формировались в постколлизивной обстановке. Петро-геохимические данные указывают на мантийную природу магматизма. Источником мантийного плавления и генерация родоначальных расплавов были гранатовые лерцолиты и в меньшей степени шпинелевые лерцолиты обогащенного мантийного источника со степенью частичного плавления от 0,2 до 0,4. Такое плавление литосферного слэба в гетерогенной мантии обеспечивало окисление сульфидов и высвобождение меди, золота и сопутствующих компонентов и вынос их в верхние горизонты флюидами с аномальными параметрами режима. В последних главную роль играли такие летучие компоненты как H_2O , Cl , F , CO_2 , являвшиеся основными переносчиками металлов во флюидах. В породах массива и сопровождающих даек трахитоидного состава проявлен ТЭФ РЗЭ W-типа. Установлена связь его проявления и концентраций основных рудообразующих элементов (меди и золота) в породах, которая обусловлена изменением кислотности и щелочности среды.

Сложная и длительная генерация интрузивных образований Синюхинского рудного поля указывают на важную металлогеническую особенность глубинного очага, формировавшего и золото-медно-скарновое, и медно-золото-порфирировое оруденение, относящиеся к медно-золото-скарново-порфирировому семейству руд. Эти данные позволяют привлечь внимание исследователей к проблеме формирования сложных золоторудных семейств, связанных с вулканоплутоническими комплексами

девон-каменноугольного этапа развития Центрально-Азиатского складчатого пояса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Виноградов А. П.** Среднее содержание химических элементов в горных породах // *Геохимия*. – 1962. – № 7. – С. 555–571.
2. **Гусев А. И.** Эталон синюхинского габбро-гранитоидного комплекса (Горный Алтай). – Новосибирск: СНИИГГиМС, 2007. – 208 с.
3. **Гусев Н. И., Гусев А. И.** Изотопно-геохимические особенности и возраст магматизма Синюхинского золоторудного поля (Горный Алтай // *Природные ресурсы Горного Алтая*. – 2012. – № 1–2. – С. 23–32.
4. **Крук Н. Н.** Континентальная кора Горного Алтая: этапы формирования и эволюции, индикаторная роль гранитоидов // *Геология и геофизика*. – 2015. – Т. 56, № 8. – С. 1403–1422.
5. **Маракушев А. А.** Термодинамические факторы образования рудной зональности скрытого оруденения на основе зональности гидротермальных месторождений. – М.: Наука, 1976. – С. 36–51.
6. **Стадийность** и длительность формирования золоторудной минерализации на медно-скарновых месторождениях (Алтае-Саянская складчатая область) / И. В. Гаськов, А. С. Борисенко, В. В. Бабич, Е. А. Наумов // *Геология и геофизика*. – 2010. – Т. 51, № 10. – С. 1399–1412.
7. **Age and geochemistry of Silurian gabbroic rocks in the Tongbai orogeny, Central China: Implications for the geodynamic evolution of the North Qiling arc-back-arc system** / H. Wang, Y.-B. Wu, Z.-W. Qin, et al. // *Lithos*. – 2013. – Vol. 179. – P. 1–15.
8. **Compositions of chondrites** / J. T. Wasson, G. W. Kallemeyn, S. K. Runcorn, et al. // *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical Engineering Sciences*. – 1988. – Vol. 325, no. 1587. – P. 535–544.
9. **Ettlinger A. D., Meinert L. D.** Copper-gold skarn mineralization at the Veselyi mine, Siniukhinskoe district, USSR // *Econ. Geol.* – 1991. – Vol. 86. – P. 185–194.
10. **Geology, mineralization, fluid inclusion, and stable isotope characteristics of the Sinyukhinskoe Cu-Au skarn deposit, Russian Altai, SW Siberia** / S. G. Soloviev, S. G. Kryazhev, S. S. Dvurechenskaya, V. I. Uuytov // *Ore Geology Reviews*. – 2019. – Vol. 112. – P. 103–139.
11. **High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry $Cu\pm Mo\pm Au$ potential: examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan** / J. P. Richards, T. Spell, E. Rameh, et al. // *Econ. Geol.* – 2012. – Vol. 107. – P. 295–332.
12. **Harris N. B. W., Pearce J. A., Tindle A. G.** Geochemical characteristics of collision-zone magmatism // *Geol. Soc. Spec. Pub.* – 1986. – Vol. 19. – P. 67–81.
13. **Irber W.** The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb , Eu/Eu^* , Sr/Eu , Y/Ho , and Zr/Hf



of evolving peraluminous granite suites // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* – 1999. – Vol. 63, no. 3/4. – P. 489–508.

14. **Lara P., Oyhantçabal P., Dadd K.** Post-collisional, Late Neoproterozoic, high-Ba-Sr granitic magmatism from the Dom Feliciano Belt and its cratonic foreland, Uruguay: Petrography, geochemistry, geochronology, and tectonic implications // *Lithos.* – 2017. – Vol. 277. – P. 178–198.

15. **Maniar P. D., Piccoli P. M.** Tectonic discrimination of granitoids // *Geological Soc. America Bulletin.* – 1989. – Vol. 101. – P. 635–643.

16. **McDonough W. F., Sun S.** The composition of the Earth // *Chem. Geol.* – 1995. – Vol. 120. – P. 223–253.

17. **Patino Duce A. E., Beard J. S.** Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar // *Journal of Petrology.* – 1995. – Vol. 36. – P. 707–738.

18. **Petrogenetic** evolution of late Cenozoic, postcollision volcanism in western Anatolia, Turkey / E. Aldanmaz, J. A. Pearce, M. F. Thirlwall, J. G. Mitchell // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* – 2000. – Vol. 102. – P. 67–95.

19. **Seltmann R., Porter T.M., Pirajno F.** Geodynamics and metallogeny of the central Eurasian porphyry and related epithermal mineral systems: a review // *J. Asian Earth Sci.* – 2014. – Vol. 79. – P. 810–841.

20. **SHRIMP** U-Pb and Ar-Ar geochronology of major porphyry and skarn Cu deposits in the Balkhash Metallogenic Belt, Central Asia, and geological implications / X. Chen, E. Seitmuratova, Z. Wang, et al. // *J. Asian Earth Sci.* – 2014. – Vol. 79B. – P. 723–740.

21. **Sillitoe R. H.** Some metallogenic features of gold and copper deposits related to alkaline rocks and consequences for exploration // *Miner. Deposita.* – 2002. – Vol. 37. – P. 4–13.

22. **Tectonomagmatic** settings, architecture, and metallogeny of the Central Asian Copper Province / A. Yakubchuk, K. Degtyarev, V. Maslennikov, et al. // *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World, A Tribute to Richard H Sillitoe, Society of Economic Geologists, Special Publication, 2012.* – P. 403–432.

23. **Villaseca C., Barbero L., Herreros V.** A reexamination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts // *Trans. of Royal Soc. of Edinburg Earth Science.* – 1998. – Vol. 89. – P. 113–119.

REFERENCES

1. Vinogradov A.P. [Average content of chemical elements in rocks]. *Geokhimiya*, 1962, no. 7, pp. 555–571. (In Russ.).

2. Gusev A.I. *Etalon sinyukhinskogo gabbro-granitoidnogo kompleksa (Gornyy Altay)* [Standard of the Sinyukha gabbro-granitoid complex (Gorny Altai)]. Novosibirsk, SNIIGiMS Publ., 2007. 208 p. (In Russ.).

3. Gusev N.I., Gusev A.I. [Isotope-geochemical features and age of magmatism of the Sinyukhinskoye gold field (Gorny Altai)]. *Prirodnye resursy Gornogo Al-*

taya – Natural resources of Gorny Altai, 2012, no. 1–2, pp. 23–32. (In Russ.).

4. Kruk N.N. [Continental crust of Gorny Altai: stages of formation and evolution, indicatif role of granitoids]. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, no. 8, pp. 1097–1113.

5. Marakushev A.A. *Termodinamicheskie faktory obrazovaniya rudnoy zonal'nosti skrytogo orudneniya na osnove zonal'nosti gidrotermal'nykh mestorozhdeniy* [Thermodynamic factors of formation of ore zoning of hidden mineralization based on the zoning of hydrothermal deposits]. Moscow, Nauka Publ., 1976, pp. 36–51. (In Russ.).

6. Gaskov I.V., Borisenko A.S., Babich V.V., Naumov E.A. The stage and duration of the formation of gold mineralization at copper-skarn deposits (Altai-Sayan folded area). *Russian Geology and Geophysics*, 2010, vol. 51, no. 10, pp. 1091–1101.

7. Wang H., Wu Y.-B., Qin Z.-W., et al. Age and geochemistry of Silurian gabbroic rocks in the Tongbai orogeny, Central China: Implications for the geodynamic evolution of the North Qiling arc-back-arc system. *Lithos*, 2013, vol. 179, pp. 1–15.

8. Wasson J.T., Kallemeyn G.W., Runcorn S.K., et al. Compositions of chondrites. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical Engineering Sciences*, 1988, vol. 325, no. 1587, pp. 535–544.

9. Ettliger A.D., Meinert L.D. Copper-gold skarn mineralization at the Veselyi mine, Siniukhinskoe district, USSR. *Econ. Geol.*, 1991, vol. 86, pp. 185–194.

10. Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Dvurechenskaya S.S., Uyutov V.I. Geology, mineralization, fluid inclusion, and stable isotope characteristics of the Sinyukhinskoe Cu-Au skarn deposit, Russian Altai, SW Siberia. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 112, pp. 103–139.

11. Richards J.P., Spell T., Rameh E., et al. High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu±Mo±Au potential: examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran and western Pakistan. *Econ Geol.*, 2012, vol. 107, pp. 295–332.

12. Harris N.B.W., Pearce J.A., Tindle A.G. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. *Geol. Soc. Spec. Pub.*, 1986, vol. 19, pp. 67–81.

13. Irber W. The lanthanide tetrad effect and its correlation with K/Rb, Eu/Eu*, Sr/Eu, Y/Ho, and Zr/Hf of evolving peraluminous granite suites. *Geochim. et Cosmochim. Acta.*, 1999, vol. 63, no. 3/4, pp. 489–508.

14. Lara P., Oyhantçabal P., Dadd K. Post-collisional, Late Neoproterozoic, high-Ba-Sr granitic magmatism from the Dom Feliciano Belt and its cratonic foreland, Uruguay: Petrography, geochemistry, geochronology, and tectonic implications. *Lithos*, 2017, vol. 277, pp. 178–198.

15. Maniar P.D., Piccoli P.M. Tectonic discrimination of granitoids. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 1989, vol. 101, pp. 635–643.



16. McDonough W.F., Sun S. The composition of the Earth. *Chem. Geol.*, 1995, vol. 120, pp. 223–253.

17. Patino Duce A.E., Beard J.S. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar. *Journal of Petrology*, 1995, vol. 36, pp. 707–738.

18. Aldanmaz E., Pearce J.A., Thirlwall M.F., Mitchell J.G. Petrogenetic evolution of late Cenozoic, postcollision volcanism in western Anatolia, Turkey. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2000, vol. 102, pp. 67–95.

19. Seltmann R., Porter T.M., Pirajno F. Geodynamics and metallogeny of the central Eurasian porphyry and related epithermal mineral systems: a review. *J. Asian Earth Sci.*, 2014, vol. 79, pp. 810–841.

20. Chen X., Seitmuratova E., Wang Z., et al. SHRIMP U-Pb and Ar–Ar geochronology of major por-

phyry and skarn Cu deposits in the Balkhash Metallogenic Belt, Central Asia, and geological implications. *J. Asian Earth Sci.*, 2014, vol. 79B, pp. 723–740.

21. Sillitoe R.H. Some metallogenic features of gold and copper deposits related to alkaline rocks and consequences for exploration. *Miner. Depos.*, 2002, vol. 37, pp. 4–13.

22. Yakubchuk A., Degtyarev K., Maslennikov V., et al. Tectonomagmatic settings, architecture, and metallogeny of the Central Asian Copper Province. *Geology and Genesis of Major Copper Deposits and Districts of the World, A Tribute to Richard H. Sillitoe, Society of Economic Geologists, Spec. Publ.*, 2012, pp. 403–432.

23. Villaseca C., Barbero L., Herreros V. A reexamination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts. *Trans. of Royal Soc. of Edinburg Earth Science*, 1998, vol. 89, pp. 113–119.

© А. И. Гусев, Н. И. Гусев, 2020