



ТЫДТУГЕМСКАЯ ЭПИТЕРМАЛЬНАЯ МАГМО-РУДНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ГОРНОГО АЛТАЯ

А. И. Гусев

Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет им. В. М. Шукшина, Бийск, Алтайский край, Россия

Приведены данные о составе субвулканических лейкогранит-порфиров, околорудных метасоматитах и рудной минерализации Тыдтугемской магмо-рудно-метасоматической системы. Субвулканические образования представлены дайкообразными телами, залегающими среди туфоконгломератов и туфопесчаников аксайской свиты раннего девона. Оруденение представлено жилами и штокверковыми образованиями, сопровождается аргиллизитами (иллит, монтмориллонит, диккит), окварцеванием, баритизацией и карбонатизацией. Выделены три стадии минерализации. Определены температуры кристаллизации минералов, состав флюидов, изотопов серы в сульфидах и кислорода в кварце разных генераций. Оценены некоторые параметры гидротермальных растворов: фугитивности серы, кислорода и теллура, pH растворов. Модель формирования системы включает мантийно-коровое взаимодействие на всех этапах ее формирования.

Ключевые слова: субвулканические тела, туфоконгломераты, туфопесчаники, жилы, штокверки, эпитеpмальное высокосернистое оруденение, аргиллизиты, кварц, барит, сульфиды, золото, серебро, медь.

THE TYDTUGEM EPITHERMAL MAGMA-ORE-METASOMATIC SYSTEM OF THE SOUTHEAST OF THE GORNY ALTAI

A. I. Gusev

V. M. Shukshin Altai State Humanities Pedagogical University, Biysk, Altai Region, Russia

Data on the composition of subvolcanic leucogranite-porphyry, wallrock metasomatites and ore mineralization of the Tydtugem magma-ore-metasomatic system are given. Subvolcanic formations are represented by dike-like bodies lying among the tuff-conglomerates and tuff-sandstones of the Early Devonian Aksai Formation. Mineralization is represented by veins and stockwork formations, accompanied by argillites (illite, montmorillonite, and dikkit), silicification, baritization and carbonation. There are three stages of mineralization. Crystallization temperatures of minerals, the composition of fluids, sulfur isotopes in sulfides and oxygen in quartz of different generations are determined. Some parameters of hydrothermal solutions, such as fugacity of sulfur, oxygen and tellurium, pH of solutions, are estimated. The MOMS model includes the mantle-crust interaction at all stages of its formation.

Keywords: subvolcanic bodies, tuff conglomerate, tuff sandstone, vein, stockwork, epithermal high-sulfur mineralization, argillite, quartz, barite, sulfide, gold, silver, copper.

DOI 10.20403/2078-0575-2019-3-85-93

Тыдтугемская магмо-рудно-метасоматическая система (МРМС) расположена в правом борту р. Чуя. Цель нашего исследования – изучить магматические образования, вещественный состав руд и околорудных метасоматитов и осуществить типизацию Тыдтугемской МРМС, что очень важно на ранних стадиях изучения таких объектов. Предварительные данные показали, что изучаемый объект может быть отнесен к эпитеpмальным Ag-Au системам, которые на Алтае широко не распространены.

Известно, что эпитеpмальное Ag-Au оруденение занимает значительный объем в добыче золота и серебра: более 17,5 % (без Витватерсранда) и более 6 % мировой добычи соответственно [21]. Согласно современным представлениям [21], эпитеpмальное золото-серебряное оруденение подразделяется на следующие типы: низкосернистое (Low sulfidation), промежуточно сернистое (Intermediate sulfidation) и высокосернистое (High sulfidation). Типизация эпитеpмального золото-серебряного ору-

денения с учетом минерального состава и термодинамических параметров гидротермальных систем, формировавших руды, имеет большое значение, в особенности на поисковой и поисково-оценочной стадиях изучения таких объектов. На западе Алтая разведано и эксплуатируется Суричское золото-серебряное месторождение, отнесенное к промежуточно-серному типу. К какому типу относится Тыдтугемская эпитеpмальная система, предстоит решить в этом исследовании.

Развитие сырьевой базы золота и серебра на Алтае весьма актуально, и изучение Тыдтугемского проявления обеспечит новый тип эпитеpмальных Ag-Au систем региона.

Результаты исследований

Тыдтугемская МРМС включает в себя туфоконгломераты, туфопесчаники, субвулканические тела дайкообразной формы, жилы и прожилки кварца, барита, карбонатов с сульфидной минерализацией.

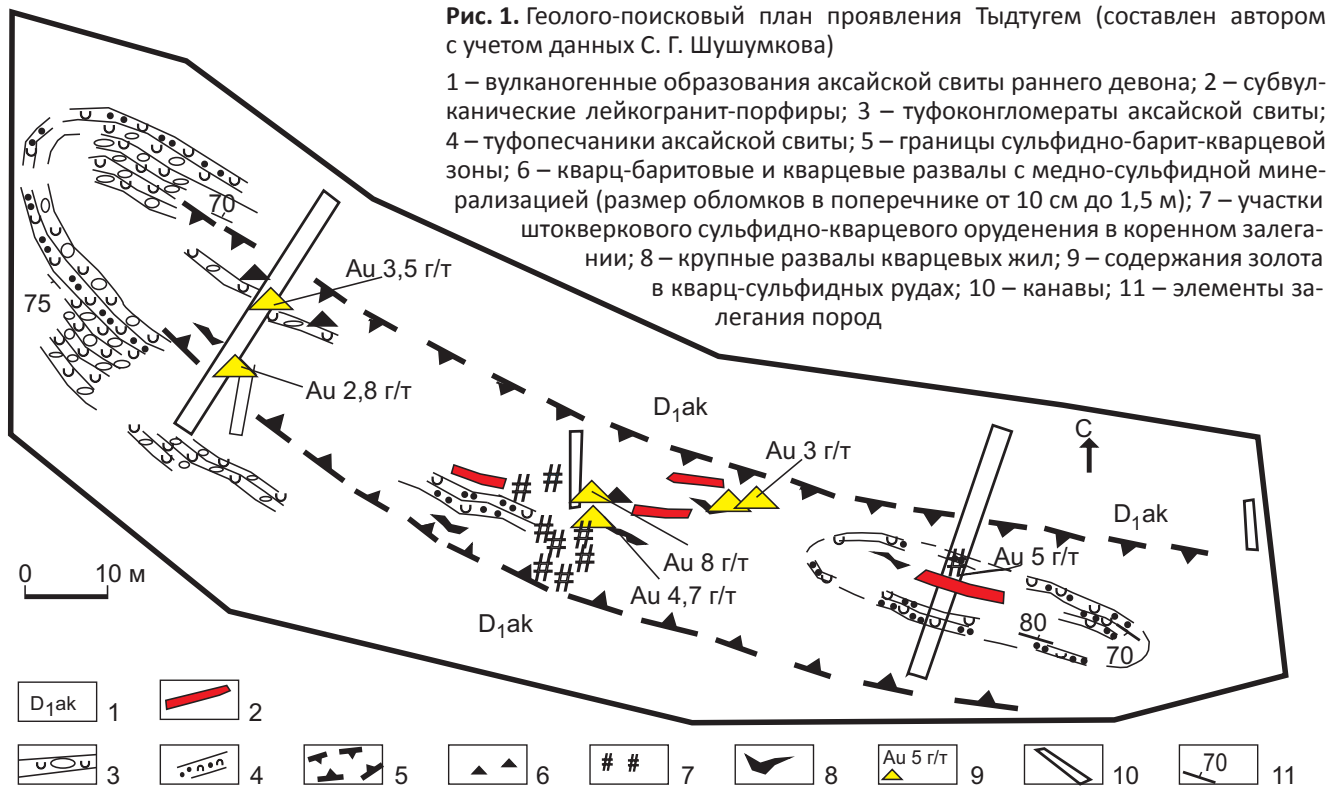


Рис. 1. Геолого-поисковый план проявления Тыдтугем (составлен автором с учетом данных С. Г. Шушумкова)

1 – вулканогенные образования аксайской свиты раннего девона; 2 – субвулканические лейкогранит-порфиры; 3 – туфоконгломераты аксайской свиты; 4 – туфопесчаники аксайской свиты; 5 – границы сульфидно-барит-кварцевой зоны; 6 – кварц-баритовые и кварцевые развалы с медно-сульфидной минерализацией (размер обломков в поперечнике от 10 см до 1,5 м); 7 – участки штокверкового сульфидно-кварцевого оруденения в коренном залегании; 8 – крупные развалы кварцевых жил; 9 – содержания золота в кварц-сульфидных рудах; 10 – каналы; 11 – элементы залегания пород

Минерализованная зона (до 25 м шириной) вытянута в субширотном направлении, сопровождается окварцеванием, серицитизацией, аргиллизацией и приурочена к области смятия в узкие антиклинали и синклинали с проявлением субвулканических образований (рис. 1).

Субвулканические лейкогранит-порфиры образуют дайкообразные тела и имеют розовую окраску с желтоватым оттенком. Это массивные породы с неравномерным распределением желтоватой и розоватой окрасок и почти полным отсутствием темноцветных минералов. Текстура порфировая, местами брекчиевая с пятнистым распределением окраски. Во вкрапленниках присутствует кварц размером 0,2–0,4 мм, калиевый полевой шпат таблитчатой формы, редко мусковит в виде чешуек размером до 0,3 мм. Основная ткань породы представлена мелкозернистым агрегатом зерен калиевого полевого шпата, кварца, изредка хлорита. Местами

отмечаются микросферолитовые выделения полевого шпата. В краевых частях субвулканических тел иногда встречаются миароловые пустотки овальной формы размером 0,5–0,7 см, выполненные кварцем, кальцитом, баритом. Акцессорные минералы включают пирит, циркон, монацит. Химический состав лейкогранит-порфиров приведен в табл. 1.

Лейкогранит-порфиры по сумме щелочей относятся к умеренно-щелочной серии магматитов при резком преобладании K_2O над Na_2O . Они характеризуются повышенными суммарными концентрациями редкоземельных элементов (от 178,5 до 990,2 г/т). Отношения U/Th невысокие, указывающие на отсутствие существенных наложенных процессов на субвулканические образования. Высокие концентрации Nb в породах (29,5–40,6 г/т) указывают на возможность их образования за счет частичного плавления Nb-обогащенных базальтов. Во всех образцах проявлена негативная аномалия по европию (от 0,28 до 0,38). Изотопы стронция и неодима в породах указывают на мантийный и коровый источники.

На диаграмме соотношений $K_2O - SiO_2$ лейкогранит-порфиры попадают в поле шошонитовой серии пород (рис. 2).

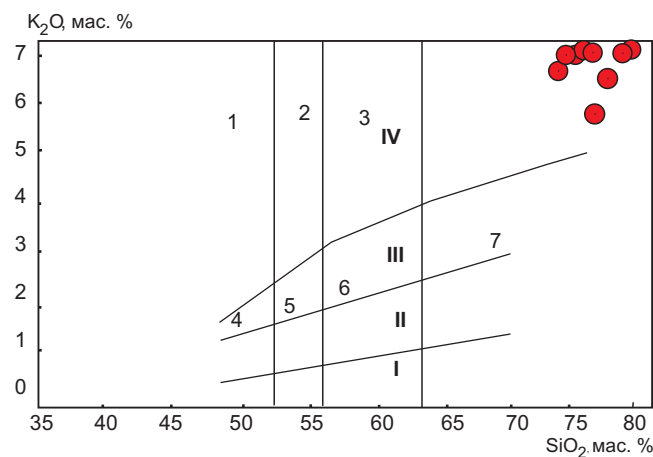


Рис. 2. Диаграмма соотношений $K_2O - SiO_2$ для лейкогранит-порфиров Тыдтугемской МРМС (красные кружки)

Поля пород: 1 – абсарокит, 2 – шошонит, 3 – банакит, 4 – высококалийный базальт, 5 – высококалийный андезибазальт, 6 – высококалийный андезит, 7 – высококалийный дацит по [17]; серии пород: I – толеитовая, II – известково-щелочная, III – высококалийная известково-щелочная, IV – шошонитовая



Таблица 1

Химический состав субвулканических лейкогранит-порфиров аксайского комплекса проявления Тыдтугем (оксиды в %, элементы в г/т, Au, Ag – в мг/т)

Компонент	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	74,78	74,8	74,81	75,1	75,4	75,8	76,1	76,8	76,9
TiO ₂	0,14	0,15	0,21	0,13	0,12	0,19	0,11	0,1	0,13
Al ₂ O ₃	12,13	11,9	12,6	12,1	12,15	12,3	11,9	12,1	11,91
Fe ₂ O ₃ t	2,52	1,98	1,29	2,21	1,22	2,31	1,13	1,4	1,17
MnO	0,03	0,03	0,02	0,01	0,02	0,04	0,01	0,02	0,11
MgO	0,15	0,06	0,43	0,08	0,07	0,18	0,10	0,05	0,14
CaO	0,36	0,1	0,33	0,02	1,14	0,16	0,22	0,1	0,33
Na ₂ O	1,85	2,96	1,48	0,35	1,21	2,5	0,2	1,34	1,9
K ₂ O	6,88	6,46	7,86	8,85	7,35	5,6	8,55	7,5	6,7
P ₂ O ₅	0,05	0,03	0,08	0,06	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05
П.п.п.	0,75	1,4	0,72	0,8	1,01	1,10	0,74	0,4	0,55
Сумма	99,64	99,86	99,83	99,71	99,69	99,8	99,11	99,85	99,89
Cr	209	36,8	40,2	55,1	41,1	21,8	53,3	79,2	48,7
V	4,6	5,2	1,3	1,41	1,2	2,7	1,5	1,2	6,1
Ni	97	33,1	61,1	44,5	67,8	45,8	66,2	131	59,9
Co	5,0	14,9	2,3	2,2	2,8	19,8	3,2	5,5	5,6
Cu	11,2	13,7	41,0	40,8	65,3	66,3	65,9	13,5	64,1
Zn	24,2	25,7	23,3	28,03	29,7	22,8	23,8	23,1	24,9
Pb	4,7	22,1	5,2	1,06	15,3	15,7	5,5	4,0	8,8
Sb	1,1	2,8	4,8	2,5	9,2	6,7	4,3	2,1	0,5
Sc	9,4	10,6	9,3	10,2	10,0	10,1	9,3	9,3	10,2
Rb	193	217	235	248	201	167	227	188	185
Ba	452	366	442	422	960	381	435	490	440
Sr	27,1	29,8	26,1	21,1	35,8	28,6	21,3	24,0	24,9
Nb	39,2	29,5	36,3	37,1	36,9	34,6	36,2	40,6	35,7
Ta	2,2	2,6	2,1	1,95	2,15	2,7	2,0	2,1	2,3
Zr	258	280	260	266	253	213	225	254	260
Hf	8,75	10,4	9,4	9,6	8,9	10,1	8,1	9,3	10,5
Y	83,1	82,6	93,1	61,1	77,5	74,7	62,8	82,1	131
Th	16,3	19,6	16,5	15,7	16,3	12,6	15,5	16,6	19,3
U	3,0	4,6	4,55	3,1	3,8	3,6	3,8	4,3	4,2
La	58,9	4,6	92,1	20,1	59,2	3,6	26,5	62,1	251
Ce	127,3	51,7	150,7	36,6	124,8	52,3	86,3	126,8	148,8
Pr	15,1	130,8	23,8	4,9	15,4	6,3	7,3	16,1	57,5
Nd	60,6	14,9	96,8	19,3	61,5	25,2	28,9	62,7	228
Sm	14,1	57,4	23,5	4,1	14,0	6,1	6,72	14,2	50,5
Eu	1,28	13,6	2,35	0,45	1,45	0,83	0,85	1,6	5,4
Gd	13,6	1,2	23,6	4,75	13,6	7,8	7,1	15,1	51,1
Tb	2,3	12,8	3,6	1,05	2,2	1,65	1,49	2,35	6,35
Dy	14,0	2,3	17,8	8,32	13,8	11,9	9,92	14,5	29,9
Ho	2,9	14,2	3,24	2,14	2,83	2,5	2,34	3,05	4,97
Er	8,4	3,0	8,1	6,8	7,95	7,2	6,79	8,4	12,28
Tm	1,2	8,9	1,15	1,08	1,22	1,1	1,05	1,3	1,55
Yb	7,8	8,54	7,1	6,78	7,61	6,6	6,5	7,97	10,5
Lu	1,1	1,31	1,08	1,0	1,21	0,88	0,95	1,14	1,36
Au	155	148	176	164	154	105	87	160	198
Ag	501	498	487	492	502	455	443	487	765
⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	0,70509	Н.о.	0,70708	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
εNd(t)	1,9	Н.о.	2,7	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.	Н.о.
Σ REE	411,7	404,6	551,0	178,5	404,3	226,3	255,5	419,4	990,2
U/Th	0,18	0,23	0,27	0,2	0,23	0,28	0,24	0,26	0,22
Nb/Ta	17,7	11,3	17,3	19,0	17,2	12,8	18,1	19,3	15,5
(La/Yb) _N	4,98	4,0	8,57	1,96	5,13	2,1	2,69	5,15	15,78
Eu/Eu*	0,28	0,28	0,31	0,31	0,32	0,37	0,38	0,34	0,33
TE _{1,3}	1,01	1,07	0,94	0,98	1,0	1,11	1,16	0,99	0,74

Примечание. Силикатный анализ на главные компоненты химическим методом выполнен в лаборатории Западно-Сибирского испытательного центра (Новокузнецк); для микроэлементов – методом ICP-MS в лаборатории ИМГРЭ (Москва); изотопный состав определялся на 9-коллекторном масс-спектрометре TRITON в статическом режиме в лаборатории ИГЕМ (Москва). Н.о. – не определялось. N – элементы нормированы по [5]; TE_{1,3} – ТЭФ РЗЭ (среднее между первой и третьей тетрадами) по [13]; Eu* = (ΣSm_N+Gd_N)/2. Номера столбцов – номера проб. εNd – разность между отношениями ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd в породе.

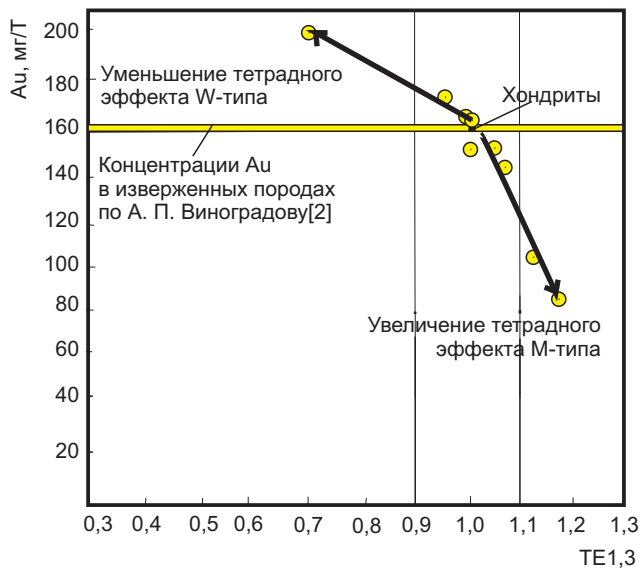


Рис. 3. Диаграмма Au – TE_{1,3} по [2] для лейкогранит-порфиров Тыдтугемской МРМС (TE_{1,3} – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ (среднее между первой и третьей тетрадами) по [13]; желтое поле показывает концентрации золота в магматических породах по [1]; содержания золота в хондритах по [20])

В породах проявлены оба типа тетрадного эффекта фракционирования (ТЭФ) редкоземельных элементов (РЗЭ) М- и W-типов (граничные значения >1,1 и <0,9, соответственно).

Соотношение концентраций Au и TE_{1,3} в лейкогранит-порфирах показывает, что эти величины имеют обратную зависимость: с увеличением содержания золота уменьшается значение ТЭФ РЗЭ (рис. 3). На диаграмме указанных соотношений наблюдаются два тренда для М- и W-типов ТЭФ РЗЭ. Это свидетельствует о том, что в магматогенных флюидах присутствовали различные летучие компоненты, но основную роль в переносе золота играли CO₂, H₂O и HS²⁻, которые и обуславливали проявление ТЭФ РЗЭ W-типа [3]. С последним, видимо, и связаны наиболее высокие концентрации золота.

Проявление Тыдтугем находится в правом борту р. Чуя в нижнем течении р. Тыдтугем. Рудная минерализация представлена зоной линейного штокверка протяженностью 400 и мощностью 20–25 м (аргиллизированные туфоконгломераты и туфопесчаники аксайской свиты (D_{1ak}), пронизан-

ные кварц-баритовыми, кварц-кальцит-баритовыми жилами и прожилками мощностью от 1 до 10 см).

Кварц часто ноздреватый. Местами отмечают раздувы жил до 0,40–1,5 м. В таких местах метасоматиты представлены аргиллизитами с гнездами и линзочками каолинита, диккита, иллита и монтмориллонита, сульфидная минерализация – вкрапленностью, прожилками и гнездами пирита, халькопирита с борнитом, халькозином, тетраэдритом, теннантитом, редко арсенопиритом, сфалеритом, галенитом и электрумом. При микроскопическом изучении выявлены также мелкие выделения энаргита, тетрадимита, алтаита, аргентита, а в окисленных рудах обнаружен рабдофан.

Содержания элементов следующие: меди от 0,1 до 1,8 %, золота от 0,5 до 8 г/т, серебра от 12 до 176 г/т; отношение Ag/Au в рудах варьирует от 15 до 22 и может быть отнесено к Ag/Au типу по [4].

В 350 м к востоку от проявления Тыдтугем среди аргиллизированных туфопесчаников аксайской свиты обнаружено еще одно, представленное серией кварц-карбонат-баритовых прожилков и жил мощностью 2–15 см с вкрапленностью халькопирита, борнита, сфалерита, редко галенита размером 2–15 мм. Местами отмечаются гнезда сульфидов (пирита, арсенопирита, тетраэдрита, халькопирита) среди барит-карбонатных жил размером 5–16 см в поперечнике. Ширина выходов прожилковой зоны 1,5–3 м. По простиранию зона прослежена на 18 м. Содержания меди от 0,3 до 1,6 %, золота от 0,5 до 5 г/т, серебра 19 до 156 г/т, цинка от 0,8 до 4,5 %.

Комплексное микроскопическое исследование руд и околорудных изменений позволило составить парагенетическую схему последовательности минералообразования, в которой отображены эндогенные стадии и результаты окисления первичных минералов (рис. 4).

Физико-химические особенности рудного процесса

Температуры гомогенизации первичных газожидких включений в кварце 1-й, 2-й и 3-й генераций снижались от 255 до 195 и 170 °C соответственно. Соленость растворов также уменьшалась от 6,1–7,2 до 0,6–1 вес. % NaCl. Это свидетельствует о процессах смешения ювенильных растворов на поздних этапах становления гидротермальной си-

Таблица 2

Термобаро-геохимические и изотопные данные исследований минералов Тыдтугемского проявления

Минерал	n	T _{гом} , °C	Соленость, мас.-%-экв. NaCl	δ ³⁴ S, ‰	δ ¹⁸ O, ‰ SMOW
Кварц 1	2	260–250	6,1–7,2	Н.о.	15,8–16,2
Кварц 2	2	190–205	2,0–1,8	Н.о.	17,0–18,8
Кварц 3	2	165–180	0,6–1,0	Н.о.	Н.о.
Пирит 1	2	Н.о.	Н.о.	–3,5... –1,7	Н.о.
Пирит 2	2	Н.о.	Н.о.	–1,5...+5,5	Н.о.

Примечания: n – количество анализов; н. о. – не определялось.



Минерал/ Mineral	Эндеогенная стадия/Endogenic stage			Гипергенная/ Gipergenic
	1	2	3	
Кварц/Quartz	██████████	██████████	██████████	
Кальцит/Calcite	██████████	██████████	██████████	
Барит/Barite	██████████	██████████	██████████	
Пирит/Pyrrite	██████████	██████████		
Галенит/Galenite	██████████	██████████	██████████	
Сфалерит/Sphalerite	██████████	██████████		
Халькопирит/Chalcopyrite	██████████	██████████		
Теннантит/Tennantite		██████████		
Тетраэдрит/Tetrahedrite		██████████		
Энаргит/Enargite		██████████		
Аргентит/Argentite	██████████	██████████		
Алтаит/Altaite	██████████		██████████	
Иллит/Illite	██████████	██████████		
Монтмориллонит/ Montmorillonite	██████████	██████████		
Каолинит/Kaolinite	██████████	██████████		
Хлорит/Chlorite	██████████	██████████		
Церуссит/Cerussite				██████████
Гематит/Hematite				██████████
Малахит/Malachite				██████████
Азурит/Azurite				██████████
Ковеллит/Covellite				██████████
Ярозит/Jarosite				██████████
Рабдофан/Rhabdophane				██████████
Хризоколла/Chrysocola				██████████
Англезит/Anglesite				██████████
Смитсонит/Smithsonite				██████████

Рис. 4. Парагенетическая схема последовательности минералообразования

стемы. Некоторые термобарометрические и изотопные данные приведены в табл. 2.

Существенно сфалерит-теннантит-галенитовые руды с хлоритом в районе штокверкового сульфидно-кварц-баритового состава формировались из хлоридно-натриевых слабо концентрированных (7,0–6,0 мас. %-экв. NaCl) растворов при температуре 260–255 °С. Согласно хлоритовому термометру в полиметаллических рудах хлорит формировался при температуре 255–250 °С. Содержания тяжелого изотопа серы в пирите отвечает магматогенному источнику, а кислорода – метеорным водам.

Для оценки зависимостей температур и фугитивности серы (fS_2) при кристаллизации руд Тыдтугемского проявления были использованы фазовые взаимоотношения и изменения состава минералов в системе Fe-Zn-S [19]. Предварительно в составе сфалерита 1-й генерации содержание FeS определено в количестве 7,0–7,5 мол. %, а в составе сфалерита 2-й генерации – 0,6–0,9 мол. %. На основании

этих данных изменение фугитивности серы можно отразить на диаграмме (рис. 5).

С понижением температуры кристаллизации минеральных парагенезисов уменьшалась фугитивность серы: для первой стадии от –9,9 до –11,5, для второй – от –11,8 до –12,9.

Оценка значений pH и fO_2 для гидротермальных растворов получена из построения соответствующей диаграммы (рис. 6).

Аналогичным образом определена фугитивность кислорода и теллура (табл. 3).

Интерпретация результатов

Большое значение для понимания генезиса гранитоидов имеют аномально высокие концентрации в них Nb (в Тыдтугемской МРМС от 29,5 до 40,6 г/т). Это свидетельствует об образовании лейкогранит-порфиров за счет плавления высококиониевых базальтов (NEB). Источник этого плавления может быть определен с использованием соотношений Nb и Ta. Известно, что плавление источника

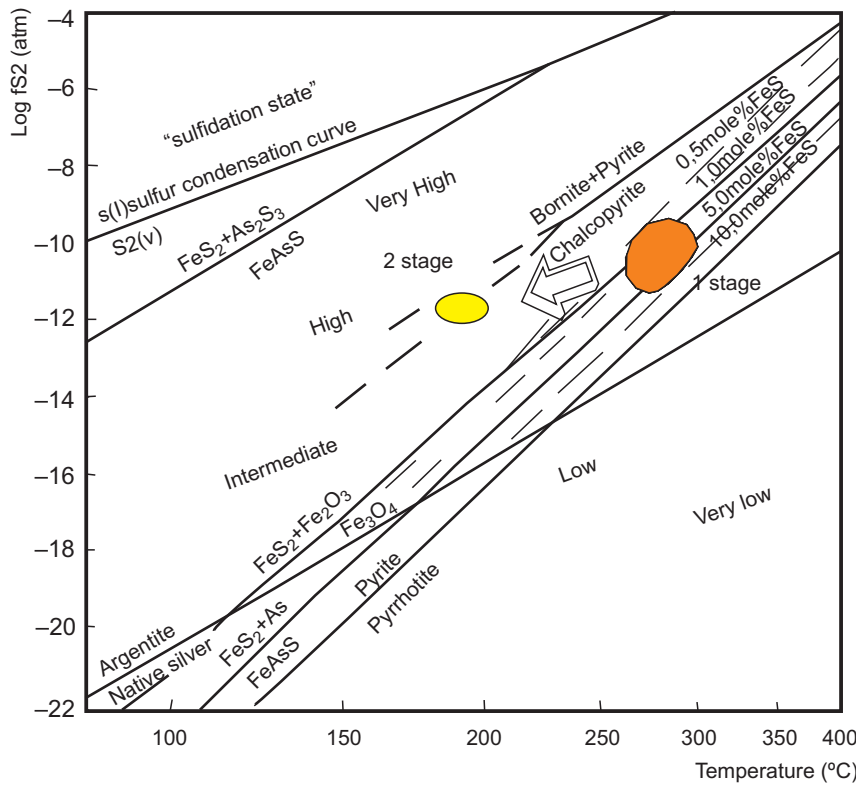


Рис. 5. Диаграмма $\log fS_2$ – температура для рудной минерализации Тыдтугемского проявления (изоплеты FeS содержания для сфалерита рассчитаны с использованием уравнений по [19]; приблизительные оценки фугтивности серы и температурные условия для 1-й стадии – оранжевое поле, для 2-й стадии – желтое)

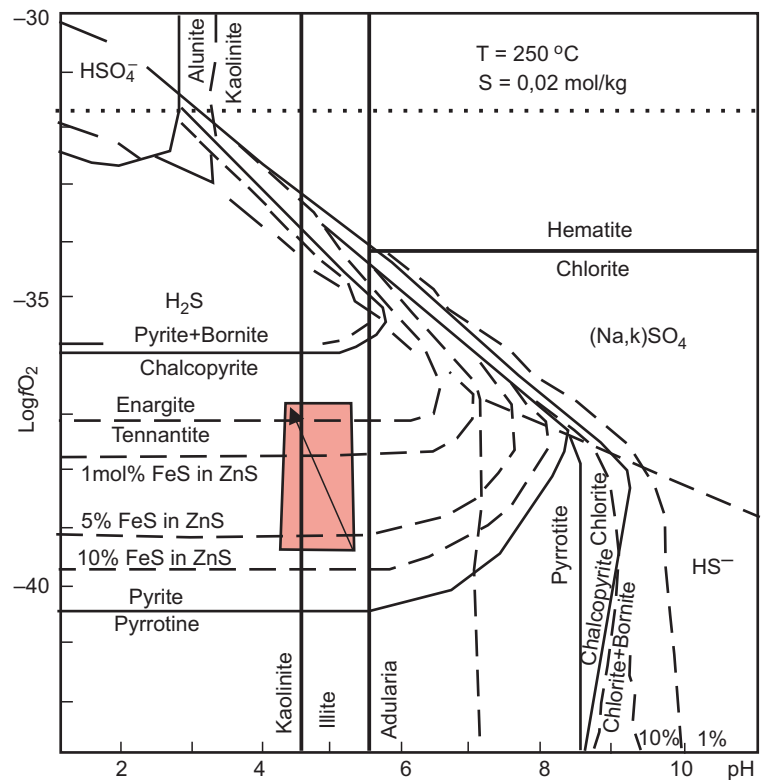


Рис. 6. Диаграмма $\log fO_2$ – pH для руд Тыдтугемского проявления (значения pH и fO_2 первичных рудных флюидов модифицированы по [14]; стрелкой показано изменение состояния рудных флюидов от нейтральных к слабо кислым; цветом – поле стабильности для различных минералов с мол. % FeS в сфалерите при $T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$, $\Sigma S = 0,02 \text{ моль/кг}$)

пород, содержащего фазы Ti-обогащенных ингредиентов (рутила, ильменита), будет генерировать расплавы с высоким отношением Nb/Ta (>25), в то время как плавление источника с амфиболом приводит к формированию расплавов с более низким отношением Nb/Ta (<25) [11, 15]. В лейкогранит-порфирах Тыдтугемской МРМС эти отношения варьируют от 11,3 до 19,3, что указывает на плавление амфиболомодержащего источника.

В настоящее время предполагается, что к образованию и дифференциации риолитового материала в вулканогенных поясах с эпитемальным оруденением приводят три главных процесса: кристаллизационное фракционирование [6, 8], частичное плавление континентальной коры [16, 18] и термогравитационная диффузия, при которой химическое фракционирование достигалось при полном расплавлении [12].

Таблица 3

Некоторые химические и физико-химические параметры минералов проявления Тыдтугем

Показатель	Значение
FeS в сфалерите (ZnS) 1-й стадии (полисульфидной), мол. %	7,0–7,5
logf O ₂ 1-й стадии (полисульфидной)	–39... –40
logf S ₂ 1-й стадии (полисульфидной)	–9,9... –11,5
logf S ₂ 2-й стадии (золото-сульфидно-теллуридной)	–11,8... –12,9
logf Te ₂ 2-й стадии (золото-сульфидно-теллуридной)	–15... –16,2
pH	4,5–5,5
Температура кристаллизации (Т, °С) полисульфидного парагенезиса (1-й стадия)	255
Температура кристаллизации (Т, °С) 2-й стадии (золото-сульфидно-теллуридной)	195

Популярная модель термодиффузии в жидкой среде, предложенная В. Хилдретом [12], способна объяснить различие интерпретаций образования риолитов, в том числе и субвулканических кислых образований, в различных районах. Она раскрывает механизм обогащения совместимыми сидерофильными (Y, Sc и Mn) элементами и несовместимыми, характерной особенностью которых является несовместимость с любой системой, и прежде всего с системой кристалл – жидкость. По указанным параметрам к Тыдтугемской МРМС может быть применена именно модель термодиффузии. Она также дает объяснение механизмов фракционирования тяжелых редкоземельных элементов относительно легких без привлечения фракционирования циркона или апатита. Модель помогает понять процесс обогащения флюидной фазы магматитов благородными элементами. Главные летучие компоненты в большинстве магм представлены H₂O, CO₂ и S₂ или H₂S [21]. В субвулканических породах проявлен тетрадный эффект фракционирования РЗЭ W-типа, значения которого позитивно коррелируются с содержаниями золота и серебра в породах.

Однако модель термодиффузии для условий Тыдтугемской МРМС была сконструирована в результате процессов смешения базальтового источника и корового материала, что подтверждается анализом соотношений La/Nb и Ce/Y (рис. 7).

В рудах проявления присутствуют минералы, характеризующиеся высокосернистым составом (энаргит, борнит, халькозин), что позволяет отнести изучаемый объект к высокосернистым проявлениям (High Sulfidation). Известно, что высокосернистым эпитегрмальным золото-серебряным месторождениям свойственно наличие в рудах энаргита и иногда люционита [10]. Это имеет место и в рудах Тыдтугемского проявления. Установлено, что высокосернистые эпитегрмальные Au-Cu месторождения развиваются в обстановках, где летучие компо-

ненты поднимаются из глубинного магматического источника очень быстро и не взаимодействуют с вмещающими породами и окружающими водами на глубине, становясь очень горячими кислыми гидротермальными флюидами, которые только на эпитегрмальных близповерхностных уровнях взаимодействуют с вмещающими породами [9]. Прогрессивное охлаждение и нейтрализация горячих кислых гидротермальных флюидов вмещающими породами в близповерхностной обстановке производят изменения кислотно-сульфатного типа и зональные аргиллизиты с формированием типичных ассоциаций пирита, энаргита и других высокосернистых минералов. В близповерхностных условиях происходит смешение глубинных высокотемпературных растворов с вадозными водами, превращая их в эпитегрмальные системы.

К высокосернистому типу эпитегрмальных систем относятся такие известные гигантские Ag-Au месторождения, как Голдфилд (Невада, США), Лепанто (Филиппины), Ивата (Япония).

В последнее время стало известно, что месторождения порфирово-эпитегрмальных минеральных систем ассоциированы с островодужным магматизмом в пределах конвергентных геодинамических обстановок. Такие системы зональны, и глубже эпитегрмального оруденения должно локализоваться порфировое и, возможно, скарновое. Совмещение порфирового и эпитегрмального Au-Ag оруденения отмечается в рудах Михеевского место-

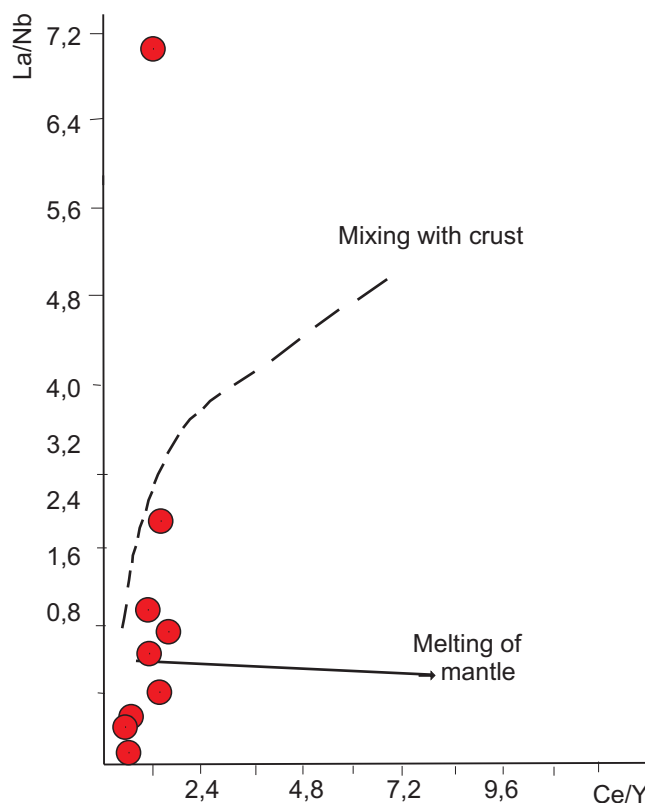


Рис. 7. Диаграмма соотношений La/Nb – Ce/Y по [7] для субвулканических лейкогранит-порфиров (красные кружки) Тыдтугемского проявления



рождения на Урале, Au-Ag месторождений Роговик и Баимка на Северо-Востоке России, в Айлаошаньском рудном поясе на северо-западе Китая.

Выводы

Тыдтугемская МРМС относится к сложным системам, в формировании которых обнаруживаются признаки мантийной составляющей (плавление высокониобиевых базальтов) и смешения с коровым материалом, что приводит к специфическому формированию оруденения эпитегрмального высокосернистого типа.

Наличие среди окисленных руд рабдофана указывает на возможность обнаружения в первичных рудах редкоземельных минералов, учитывая сложность и многоярусность порфирово-эпитегрмальных систем, в районе Тыдтугемского проявления можно предположить обнаружение и порфирового оруденения.

Полученные данные позволяют рекомендовать недоизученное Тыдтугемское проявление для проведения поисковых и поисково-оценочных работ на эпитегрмальное золото-серебряное и медно-золото-порфировое оруденение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Виноградов А. П.** Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных пород земной коры // Геохимия. – 1962. – № 7. – С. 555–572.

2. **Гусев А. И.** К геохимии акцессорного пирита Кошрабадского массива Западного Узбекистана // Актуальные проблемы геологии, геофизики и металлогении: матер. конф., посвящ. 80-летию создания ИГиГ и 105-летию со дня рождения акад. Х. М. Абдуллаева. – Ташкент, 2017. – С. 229–232.

3. **Гусев А. И., Табакаева Е. М.** Критерии продуктивных магматических комплексов Алтайского региона на золотое оруденение. – Бийск: Изд-во АГАО, 2014. – 145 с.

4. **Золоторудные** месторождения нетрадиционных типов – основа укрепления сырьевой базы в районах золотодобычи Алтая / С. С. Вартамян, Ю. М. Щепотьев, А. И. Зайцев и др. // Руды и металлы. – 2006. – № 3. – С. 5–13.

5. **Anders E., Greevesse N.** Abundances of the elements: meteoric and solar // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* – 1989. – Vol. 53. – P. 197–214.

6. **Bagby W. C., Cameron K. L., Cameron M.** Contrasting evolution of calc-alkalic volcanic and plutonic rocks of western Chihuahua, Mexico // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth.* – 1981. – Vol. 86, Issue B11. – P. 10402–10410.

7. **Barbarin B.** A Review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments // *Lithos.* – 1999. – Vol. 46, Issue 3. – P. 605–626.

8. **Cameron M., Bagby W. C., Cameron K. L.** Petrogenesis of Voluminous mid-Tertiary ignimbrites of the Sierra Madre Occidental, Chihuahua, Mexico // *Contributions to Mineralogy and Petrology.* – 1980. – Vol. 74, no. 3. – P. 271–284.

9. **Corbett G.** Anatomy of porphyry-related Au-Cu-Ag-Mo mineralised systems: Some exploration implications // Australian Institute of Geoscientists North Queensland Exploration Conf. – 2009. – AIG Bull. 49. – P. 33–46.

10. **Enargite-luzonite** hydrothermal vents in Manus Back-Arc Basin: submarine analogues of high-sulfidation epithermal mineralization / V. M. Dekov, O. Rouxel, K. Kouzmanov et al. // *Chemical Geology.* – 2016. – Vol. 438. – P. 36–57.

11. **Foley S. F., Tiepolo M., Vannucci R.** Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones // *Nature.* – 2002. – Vol. 417. – P. 837–840.

12. **Hildreth W.** Gradients in silicic magma chambers: Implications for lithospheric magmatism // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth.* – 1981. – Vol. 86, Issue B11. – P. 10153–10192.

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. **John D. A.** Miocene and Early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the Northern Great basin, Western United States: characteristics, distribution, and relationship to magmatism // *Economic Geology.* – 2001. – Vol. 96, no. 8. – P. 1827–1853.

15. **Mechanisms** of Archean crust formation inferred from high-precision HFSE systematics in TTGs / J. E. Hoffmann, C. Münker, T. Næraa et al. // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* – 2011. – Vol. 75. – P. 4157–4178.

16. **Moll E. J.** Geochemistry and petrology of Mid-Tertiary ash flow tuffs from the Sierra el Virulento Area, eastern Chihuahua, Mexico // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth.* – 1981. – Vol. 86, Issue B11. – P. 10321–10334.

17. **Peccerillo A., Taylor S. R.** Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastomonon area, northern Turkey // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1976. – Vol. 58. – P. 63–81.

18. **Pleistocene** high-silica rhyolites of the Coso Volcanic Field, Inyo County, California / C. R. Bacon, R. Macdonald, R. L. Smith, P. A. Baedeker // *Journal of Geophysical Research. Solid Earth.* – 1981. – Vol. 86, Issue B11. – P. 10223–10241.

19. **Scott S. D., Barnes H. L.** Sphalerite geothermometry and geobarometry // *Economic Geology.* – 1971. – Vol. 66, no. 4. – P. 653–669.

20. **Wasson J. T., Kallemeyn G. W.** Composition of chondrites // *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1988. – A325, vol. 201. – P. 535–544.

21. **White N. C., Hedenquist J. W.** Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration // *SEG Newsletter.* – 1995. – No. 23. – P. 1–9.

REFERENCES

1. Vinogradov A.P. [The average content of chemical elements in the main types of igneous rocks of the



Earth's crust]. *Geokhimiya – Geochemistry*, 1962, no. 7, pp. 555–572. (In Russ.).

2. Gusev A. I. [To the geochemistry of accessory pyrite of the Koshradab massif in Western Uzbekistan]. *Aktual'nye problemy geologii, geofiziki i metallogenii. Materialy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu sozdaniya IGiG i 105-letiyu so dnya rozhdeniya akademika Kh.M. Abdullaeva* [Actual problems of geology, geophysics and metallogeny. [Proceedings of the Conference dedicated to the 80th anniversary of the creation of the IGiG and the 105th anniversary of the birth of Academician Kh.M. Abdullayev]. Tashkent, 2017, pp. 229–232. (In Russ.).

3. Gusev A.I., Tabakaeva E.M. *Kriterii produktivnykh magmaticheskikh kompleksov Altayskogo regiona na zolotoe orudnenie* [Criteria of productive igneous complexes of the Altai Region for gold mineralization]. Biysk, AGAO Publ., 2014. 145 p. (In Russ.).

4. Vartanyan S.S., Shchepotyev Yu. M., Zaytsev A.I., et al. [Gold deposits of non-traditional types is a basis of strengthening the resource base in the areas of gold mining in Altai]. *Rudy i metally*, 2006, no. 3, pp. 5–13 (In Russ.).

5. Anders E., Greevesse N. Abundences of the elements: meteoric and solar. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1989, Vol. 53, P. 197–214.

6. Bagby W.C., Cameron K.L. Cameron M. Contrasting evolution of calc-alkalic volcanic and plutonic rocks of western Chihuahua, Mexico. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 1981, vol. 86, issue B11, pp. 10402–10410.

7. Barbarin B.A. Review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 1999, vol. 46, issue 3, pp. 605–626.

8. Cameron M., Bagby W.C., Cameron K.L. Petrogenesis of Voluminous mid-Tertiary ignimbrites of the Sierra Madre Occidental, Chihuahua, Mexico. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1980, vol. 74, no. 3, pp. 271–284.

9. Corbett G. Anatomy of porphyry-related Au-Cu-Ag-Mo mineralised systems: Some exploration implications. *Australian Institute of Geoscientists North Queensland Exploration Conf*, 2009, AIG Bulletin 49, pp. 33–46.

10. Dekov V.M., Rouxel O., Kouzmanov K., et al. Enargite-luzonite hydrothermal vents in Manus Back-

Arc Basin: submarine analogues of high-sulfidation epithermal mineralization. *Chemical Geology*, 2016, vol. 438, pp. 36–57.

11. Foley S.F., Tiepolo M., Vannucci R. Growth of early continental crust controlled by melting of amphibolite in subduction zones. *Nature*, 2002, vol. 417, pp. 837–840.

12. Hildreth W. Gradients in silicic magma chambers: Implications for lithospheric magmatism. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 1981, vol. 86, issue B11, pp. 10153–10192.

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. John D.A. Miocene and Early Pliocene epithermal gold-silver deposits in the Northern Great basin, Western United States: characteristics, distribution, and relationship to magmatism. *Economic Geology*, 2001, vol. 96, no. 8, pp. 1827–1853.

15. Hoffmann J.E., Münker C., Næraa T., et al. Mechanisms of Archean crust formation inferred from high-precision HFSE systematics in TTGs. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 2011, vol. 75, pp. 4157–4178.

16. Moll E.J. Geochemistry and petrology of Mid-Tertiary ash flow tuffs from the Sierra el Virulento Area, eastern Chihuahua, Mexico. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 1981, vol. 86, issue B11, pp. 10321–10334.

17. Peccerillo A., Taylor S.R. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastomonon area, northern Turkey. *Contrib. Mineral. Petrol*, 1976, vol. 58, pp. 63–81.

18. Bacon C.R., Macdonald R., Smith R.L., Baedeker P.A. Pleistocene high-silica rhyolites of the Coso Volcanic Field, Inyo County, California. *Journal of Geophysical Research. Solid Earth*, 1981, vol. 86, issue B11, pp. 10223–10241.

19. Scott S.D., Barnes H.L. Sphalerite geothermometry and geobarometry. *Economic Geology*, 1971, vol. 66, no. 4, pp. 653–669.

20. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Composition of chondrites. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, 1988, A325, vol. 201, pp. 535–544.

21. White N.C., Hedenquist J.W. Epithermal gold deposits: Styles, characteristics, and exploration. *SEG Newsletter*, 1995, no. 23, p. 1–9.

© А.И. Гыцев, 2019