

Раздел 1

ГЕОЛОГИЯ

Section 1

GEOLOGY

УДК 549.2/.8:548

ВЕРХНЕ-БАЩЕЛАКСКОЕ ПОРФИРОВОЕ ПРОЯВЛЕНИЕ АЛТАЙСКОГО КРАЯ

А.И. Гусев, Р.М. Беликова, В.С. Ковалёв

*Алтайский государственный педагогический университет, Бийск**E-mail: anzerg@mail.ru*

В статье приведены сведения о геологическом строении и новые данные о рудогенерирующем магматизме и оруденении Верхне-Бащелацкого проявления Алтайского края. Проявление отнесено к золото-медно-молибден-порфировому геолого-промышленному типу, обнаруживающему тесную пространственную и парагенетическую связь с гранитоидами Верхне-Бащелацкого массива, сложенного габбро, диоритовыми порфиридами, гранодиоритовыми порфирами и гранит-порфирами. Уран-свинцовым методом по циркону (SHRIMP II) определён возраст гранодиоритовых порфиров, составивший 386 ± 3 млн. лет, отвечающий живецкому ярусу среднего девона. Формирование массива происходило при участии мантийного и корового материала. Оруденение сформировалось в 2 стадии минерализации при значительном увеличении активности серы во флюидах на заключительном этапе. В рудах обнаруживаются промышленные концентрации золота, меди, молибдена и рения. Последний входит в состав молибденита, выделяющийся в виде уплощённых ромбоэдрических кристаллов, относящихся к 3R-политипу.

Ключевые слова: магматизм; золото-медно-молибден-порфировое оруденение; абсолютный возраст; рений.

DOI: 10.24412/2410-1192-2025-17701

Дата поступления: 27.04.2025. Принята к печати: 30.05.2025

В 2007–2010 годах в процессе проведения полевых практик студентами ЕГФ Бийского педагогического государственного университета обнаружено проявление Верхне-Бащелацкое, которое представляет собой новый, не традиционный для этого региона, тип оруденения – золото-медно-молибден-порфировый [Гусев, Дзгоева, 2010; Гусев и др., 2010]. Проявление расположено в верховьях реки Баше-

лак вблизи одноименного озера и локализуется в Верхне-Бащелацком интрузивном массиве (рис. 1).

Известно, что порфировое оруденение обнаруживает тесную пространственную и парагенетическую связи с рудогенерирующим магматизмом, становление которого и определяет его особенности и масштабы [Richards, Kerrich, 2007; Sillitoe, 2010; Huang, et al., 2019]. Порфировое орудене-

ние имеет особую значимость, так как из руд этого типа месторождений извлекается львиная доля рения, относящегося к стратегическим металлам [Voudouris et al., 2009; Ren et al., 2024].

В России рений относится к остродефицитным металлам,купаемым за рубежом. Эта ситуация сложилась после распада Советского Союза, когда США скупилась весь рений нашего государства, добывавшийся в Казахстане, Армении и Узбекистане. Цена за грамм рения составляла около 4.5 \$ США. А потребность России в этом металле составляет несколько десятков тонн.

Сферы использования рения достаточно разнообразны и включают: электронные приборы, вакуумную технику, медицину, ювелирное дело, металлургию. Интенсивно ведется применение этого металла в авиационной промышленности и кораблестроении.

Кроме того, металл представляет собой высококачественный катализатор, поэтому с его участием проходят процессы дегидрирования и гидрирования. Особенный интерес к элементу проявляет нефтеперерабатывающая промышленность, рассматривая его как базовый компонент при производстве новых катализаторов, например, рениево-платинового. Это позволяет нарастить объемы выпуска высокооктанового бензина, и удешевляет производственные затраты. Действительно, рениевые катализаторы обходятся существенно дешевле платиновых аналогов. Еще один положительный аспект применения рения как

катализатора в нефтеперерабатывающей отрасли – увеличение пропускной способности установок, практически на 50%, а также двукратное повышение их эксплуатационного ресурса. Жаропрочность этого элемента обусловила его применение в атомной технике, как конструкционного материала. Он используется при изготовлении цельнотянутых труб под тепловыделяющие элементы, работающие в высокотемпературном режиме до 3000°C.

Рений относится к стратегическим металлам, имеющим важнейшее значение в аэрокосмическом машиностроении, он применяется в изготовлении жаропрочных сплавов, используемых в двигателях ракет для запуска космических аппаратов, для СУ-35, СУ-57, в композитных материалах для создания баллистической ракеты средней дальности «Орешник» и других.

Основной источник получения рения в Мире – молибденит и халькопирит порфировых месторождений. Лидер по получению рения из таких руд является Чили. На втором месте по запасам находится США, но свои месторождения они не отрабатывают с целью сбережения стратегического запаса сырья. США занимают первое место в Мире по потреблению рения за счёт скупки его на Мировом рынке.

Исходя из изложенного актуальность изучение Верхне-Башчелакского порфирового проявления не вызывает сомнений. Цель исследования – получить всестороннюю информацию о геологическом строении, вещественном составе руд этого перспективного объекта Алтая.

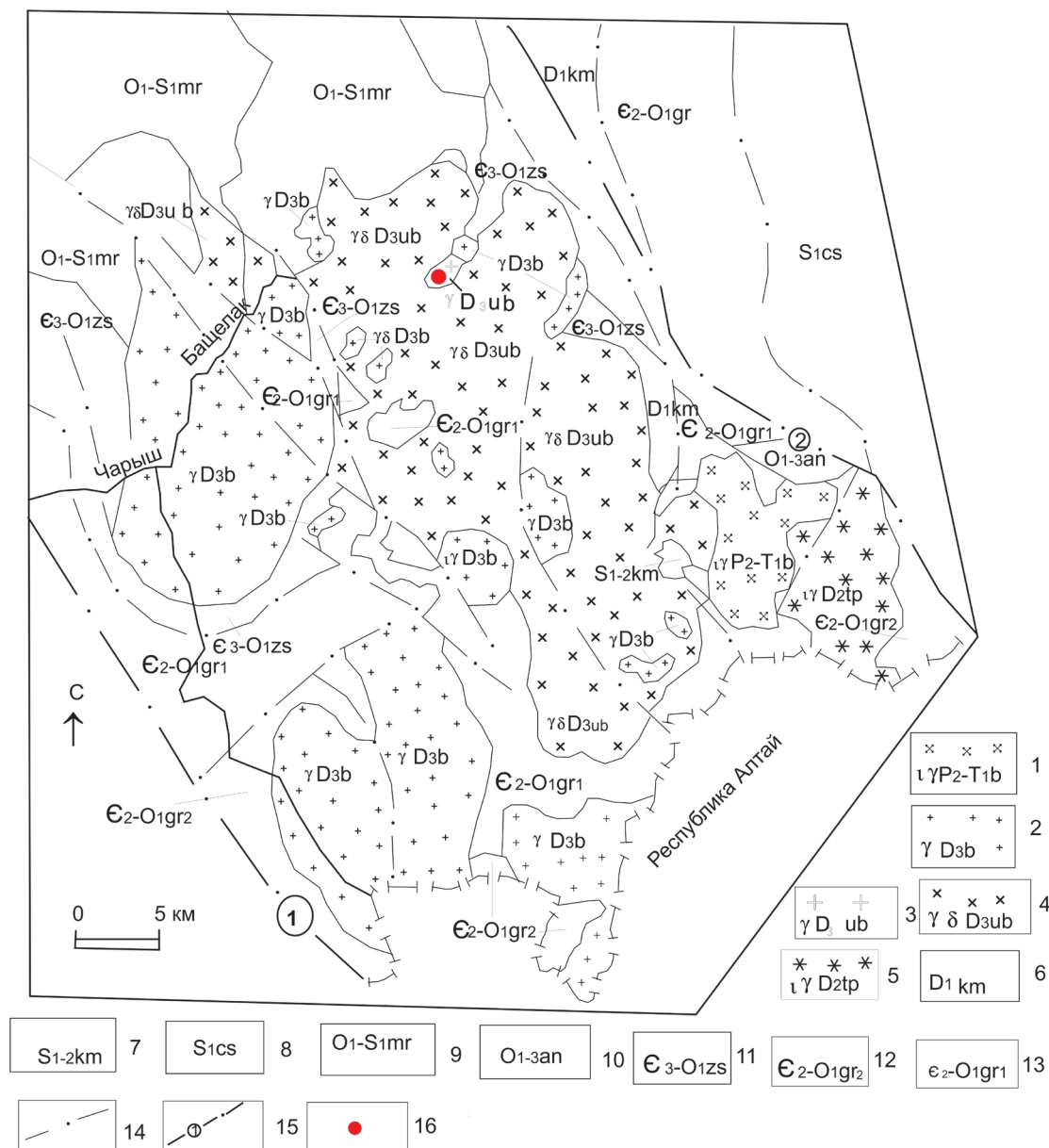


Рис. 1. Схематическая геологическая карта верховьев р. Бащелак.

Фрагмент Гос. геол. карты... [2004] с добавлением А.И. Гусева

1 – Граниты и лейкограниты белокурихинского комплекса; 2 – гранитоиды боровлянского комплекса; 3 – граниты усть-беловского комплекса; 4 – диориты, гранодиориты усть-беловского комплекса; 5 – граниты, лейкограниты топольнинского комплекса; 6 – песчаники, алевролиты, гравелиты с известняками вверху камышенской свиты; 7 – известняки, алевролиты, песчаники куимовской свиты; 8 – алевролиты, аргиллиты, известняки чесноковской свиты; 9 – филлиты, тонкослоистые алевролиты, песчаники маралихской свиты; 10 – алевролиты, аргиллиты, песчаники, известняки, редко гравелиты и конгломераты ануйской серии; 11 – глинистые сланцы, алевролиты, яшмоиды, высокотитанистые толеитовые базальты засурийской свиты; 12 – полимиктовые песчаники, алевролиты, аргиллиты, гравелиты, конгломераты верхней подсерии горно-алтайской серии; 13 – полимиктовые песчаники, алевролиты, филлиты нижней подсерии горно-алтайской серии; 14 – разломы; 15 – глубинные разломы;

1 – Чарышско-Теректинский, 2 – Бащелакский; 16 – Верхне-Бащелакское проявление

Fig. 1. Schematic geological map of headwater r. Baschelak.

Fragment of State geological map ... [2004] with calculation of data A.I. Gusev

1 – Granites and leucogranites of Belokurichinsk complex; 2 – granitoids of Borovlyanka complex; 3 – granites of Ust'-Belov complex; 4 – diorites, granodiorites of Ust'-Belov complex; 5 – granites, leucogranites of Topol'ninsk complex; 6 – sandstones, aleurolites, gravelites with limestones in top of Kamysheh suite; 7 – limestones, aleurolites, sandstones of Kuimov suite; 8 – aleurolites, argillites, limestones of Chesnokov suite; 9 – phyllites, thinly bedded aleurolites, sandstones Maralikh suite; 10 – aleurolites, argillites, sandstones, limestones and conglomerates Anuy series; 11 – clay band slates, aleurolites, jaspers, high titanic tholeiitic basalts of Zasuriya suite; 12 – polymictic sandstones, aleurolites, argillites, gravelites, conglomerates high subseries of Gorno-Altai series; 13 – polymictic sandstones, aleurolites, phyllites lower subseries of Gorno-Altai series; 14 – faults; 15 – deep faults; 16 – Verkh-Baschelak prospect

Материалы и методы

Петрографическое описание шлифов породных типов Верхне-Бащелакского массива выполнено А.И. Гусевым на микроскопе ПОЛАМ РП-1 в Лаборатории Петрологии и металлогении золота Алтайского государственного педагогического университета, Бийского филиала им. В.М. Шукшина. Определение химических элементов в породах и минералах проводилось методом ICP-MS и ICP-AES в лаборатории ВСГЕИ (г. Санкт-Петербург), а также количественным спектральным методом в Лаборатории ИГиМ СО РАН (г. Новосибирск). Определение абсолютного возраста уран-свинцовым методом по циркону (SHRIMP II) осуществлялось в лаборатории ВСГЕИ (г. Санкт-Петербург). Графики строились с использованием программы ISOPLOT/EX.; масс-спектрометрическое определение изотопного состава Sm–Nd – в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ (г. Санкт-Петербург). Концентрации рения в рудах и минералах проводились кинетическим методом анализа, выполненным в Отделе научно-производственных аналитических работ ИМГРЭ (г. Москва). Термобарогеохимия рудообразования изучалась в двусторонне-полированных пластинках с рудообразующим кварцем методом гомогенизации газово-жидких включений в Лаборатории ИМГРЭ (г. Москва).

Результаты

Рудогенерирующий магматизм. Верхне-Бащелакский массив сложен габброидами, диоритоидами, гранодиоритовыми порфирами, гранит-порфирами и лейкогра-

нит-порфирами усть-беловского комплекса.

Краткая петрографическая характеристика пород. Габбро и габбродиориты первой фазы внедрения представляют собой темно- и буровато-серые мелко-среднезернистые массивные, иногда шлирово-такситовые породы, которые локализуются по периферии массива, в особенности на северной его части. Они состоят из сосюритизированного лабрадора (38–50%), частично замещенного актинолитом, клинопироксена, определяемого авгитом (12–16%), редко ортопироксена, обыкновенной роговой обманки (25–35%), биотита (до 10%) и магнетита (до 5%).

Диоритовые порфиры второй фазы – массивные однородные породы образуют линзовидные тела протяжённостью от нескольких десятков метров до 100 м в южной части массива. Состав (%): плагиоклаз – 50–60, роговая обманка – 18–20, клинопироксен – 7, ортопироксен – 3–5, калиевый полевой шпат – 2–3. Структура породы гипидиоморфнозернистая, местами призматическизернистая. Интрателлурическая фаза диоритов, кварцевых диоритов представлена крупными таблитчатыми выделениями зонального плагиоклаза размерами до 1–1.5 см. В ядрах таких кристаллов присутствует лабрадор (An_{60-53}), редко битовнит (An_{73-78}). Периферическая каёмка зональных кристаллов выполнена андезином (An_{32-43}). Центральные части зональных кристаллов часто замещены карбонатом, хлоритом, эпидотом. Вторая генерация плагиоклаза, распространённого в основной ткани породы, представлена полисинтетически сдвойникованным андезином

(An_{38-45}). Калиевый полевой шпат представлен несдвойникованным микроклином, реже – микроклин-пертитом. Среди темноцветных минералов доминирует роговая обманка, реже отмечаются клинопироксен и ортопироксен.

Кварцевые диоритовые порфириты отличаются от диоритовых разностей отсутствием пироксенов, появлением кварца (от 5 до 12%), биотита (от 2 до 10%), существенной ролью роговой обманки (от 10 до 25%) и увеличением содержания калиевого полевого шпата (до 10%).

Гранодиорит-порфиры и меланократовые гранит-порфиры 3 фазы характеризуются серой окраской, массивной и шпировой текстурой, средне- и мелкозернистой структурой. Состоят из кварца (27 и 30%), зонального (№ 40–20 и № 39–16) плагиоклаза (43 и 44%), слабжелезистого ($f = 52$) биотита (16 и 11%), не решетчатого калишпата (8 и 11%), магнезиогастингсита и обыкновенной роговой обманки (2.3 и 2.5%).

Лейкогранит-порфиры встречены нами в верховьях р. Бащелак в районе верхнего озера, где они образуют несколько небольших тел размерами 50×10 –200 м. Форма тел лейкогранитов неправильная, местами амёбообразная, паукообразная. Нередко в них отмечаются ксенолиты гранодиоритовых порфиров и меланогранитовых порфиров размерами от 3 до 12 см в поперечнике. Лейкогранит-порфиры 4 фазы во всех встреченных участках распространения представляют собой порфировидные породы светлой окраски с розоватым оттенком. Состав (%): кварц – 29–34, плагиоклаз – 20–40, калиевый полевой шпат – 30–33, биотит

– 1–3. В отличие от гранитов плагиоклаз имеет более кислый состав (An_{15-17}) в индивидах основной ткани породы. А в порфировидных выделениях, отчётливо зональных он сменяется от олигоклаза (An_{24-25}) к более кислому олигоклазу (An_{13-14}). Ядерные зоны таких кристаллов нередко серицитизированы. Микроклин-пертиты распада имеют неотчётливую решётчатую микроструктуру и, как правило, пелитизированы. Биотит лейкогранитов коричневый, буро-коричневый, отличается высокой железистостью ($f=85.2-86.3$), умеренной глинозёмистостью ($l=29.6-30.6$), низкой магнезиальностью и относится к сидерофиллит-аннитовому ряду, что указывает на кристаллизацию этих пород в условиях невысокой активности щелочей.

Химические составы породных типов массива приведены в табл. 1.

На ТАС диаграмме все породные типы Верхне-Бащелакского массива попадают в поле известково-щелочной серии (рис. 2).

От основных к кислым разностям происходит заметное увеличение фтора, который вероятно с другими летучими компонентами способствовал переносу рудных компонентов на этапе формирования порфирового оруденения. В этом же направлении наблюдается и увеличение суммы концентраций редких земель и отношений La/Yb_N и La/Sm_N , указывая на значительное увеличение дифференциации лёгких и средних редких земель относительно тяжёлых. Отношение Eu/Eu^* повсеместно ниже хондритовых значений, что свидетельствует о значительном участии в магматическом процессе коровой составляющей.

Таблица 1

Представительные анализы породных типов Верхне-Бащелакского массива
(оксиды – в %, элементы – в г/т)

Table 1

Representative analyzes of rock types Verkhne-Baschelak massif
(oxides – in %, elements–in ppm)

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	47.93	54.2	58.47	62.94	63.35	69.3	70.68	74.23
TiO ₂	0.9	0.81	0.74	0.73	0.69	0.42	0.43	0.18
Al ₂ O ₃	15.9	17.82	16.72	16.4	15.94	14.23	14.08	13.54
Fe ₂ O ₃	2.92	1.96	3.26	3.2	2.87	1.43	0.98	0.61
FeO	7.07	6.3	4.33	3.44	3.75	2.66	2.61	1.56
MnO	0.17	0.2	0.15	0.15	0.14	0.3	0.1	0.08
MgO	7.14	3.78	3.45	1.8	2.24	0.91	1.02	0.33
CaO	9.85	7.2	6.78	3.78	4.89	3.14	2.27	1.53
Na ₂ O	1.6	4.03	2.39	3.0	2.55	2.83	3.2	3.1
K ₂ O	0.9	1.36	1.43	3.2	2.4	3.32	3.03	4.3
P ₂ O ₅	0.2	0.17	0.16	0.09	0.1	0.11	0.08	0.07
Li	16.9	9.1	23.1	27.5	21.8	47.7	38	41
Be	0.97	0.7	0.7	2.1	2.1	6.1	1.1	1.8
Sc	22.9	36	23.3	19.2	11.6	27.8	22.4	19.6
Ti	6815	4510	2300	2475	2352	2057	2143	956
V	268	107	83.5	88.7	57.1	103	108	80.3
Cr	20.1	133	40.2	33.6	33.8	30	27	15.6
Co	38.4	29.1	23.1	14.8	12.1	13.3	7.7	6.5
Ni	12.2	4.2	12.1	18.7	11.6	18.7	17.1	14.2
Cu	33.3	22.2	18.1	14.5	6.2	13.8	13.1	12.7
Zn	145	135	80.7	78.1	78.0	62.4	59.7	55.5
Ga	19.8	19.1	17.1	16.4	12.7	17.3	16.7	15.6
Rb	23	15	47.9	79.4	68.8	92.7	72.8	101
Sr	394	325	227.3	315	437	262	273	73
Y	15.5	23.7	28.5	30.4	14.6	28.3	32.6	21.5
Zr	37.0	48.2	51.3	169.3	110	136	164	159
Nb	6.0	3.2	5.8	10.8	8.2	7.1	6.7	7.2
Cs	1.0	1.1	3.7	6.7	2.6	7.3	5.6	7.8
Ba	374	350	489	705.4	943	622	644	515
La	12.3	20	20.3	27.3	29.1	36.2	46.5	50.4
Ce	27.1	29	33.8	36.1	32.2	56.8	57.9	60.5
Pr	3.6	3.4	3.1	5.2	4.9	6.9	7.1	7.0
Nd	14.2	10	15.9	15.9	13.2	22.6	23.3	24.5
Sm	2.75	4.1	4.3	3.8	3.4	4.5	4.7	4.9
Eu	1.01	0.97	1.08	0.97	0.96	1.04	0.93	0.35
Gd	3.2	2.4	0.56	3.9	3.7	3.5	3.4	3.2
Tb	0.51	0.65	2.06	0.6	0.48	0.6	0.62	0.60
Dy	2.91	3.8	2.8	3.8	2.6	2.9	2.8	2.5
Ho	0.59	0.54	0.50	1.0	0.98	0.65	0.64	0.58
Er	1.7	1.52	1.42	2.5	2.3	1.56	1.48	1.3
Tm	0.26	0.5	0.41	0.4	0.4	0.24	0.23	0.22

Компоненты	1	2	3	4	5	6	7	8
Yb	1.7	2.1	2.49	3.01	3.7	3.4	3.3	3.1
Lu	0.24	0.37	0.34	0.32	0.3	0.22	0.21	0.2
Hf	1.32	1.6	2.13	3.1	2.9	3.4	3.3	3.6
Ta	0.45	0.29	0.42	0.49	0.48	0.65	0.66	0.7
Pb	5.8	11.7	18.1	119.6	15.9	21.6	28.8	25
Th	2.3	3	4.0	8.7	5.4	8.6	8.8	9.5
U	0.6	0.8	1.43	2.9	2.2	2.1	2.3	2.5
Mo	0.31	0.35	0.43	9.2	3.2	1.42	1.6	10.5
Sn	3.8	5.4	6.34	6.9	7.7	7.6	7.8	7.7
W	0.37	0.41	0.55	0.35	0.34	0.28	0.32	3.7
Mn	1560	1380	1000	667	811	606	625	524
F	350	590	630	1594	880	790	856	1835
$\Sigma P3Э$	73.07	79.35	89.06	104.8	98.22	141.1	153.1	159.4
La/Yb _N	4.76	6.29	5.37	5.98	5.19	7.03	9.28	10.74
La/Sm _N	2.75	2.99	2.89	4.4	5.25	4.92	6.0	6.3
Eu/Eu*	0.13	0.06	0.088	0.055	0.06	0.056	0.049	0.019
Th/Yb	1.35	1.43	1.61	2.89	1.46	2.53	2.67	3.06
Ta/Yb	0.26	0.14	0.17	0.16	0.13	0.19	0.2	0.23
Ce/Yb	15.9	13.8	13.6	12.0	8.7	16.7	17.5	19.5
Zr/Yb	21.8	22.9	20.6	56.2	29.7	40.0	49.7	51.3

Примечание: породные типы: 1 – габбро, 2 – диоритовые порфиры, 3 – кварцевый диоритовый порфирит, 4–5 –гранодиоритовые порфиры, 6–7– гранит-порфиры, 8 – лейкогранит-порфиры. Нормализация отношений редкоземельных элементов выполнена относительно хондрита по [Mc Donough, Sun, 1995]. Eu*=(SmN+GdN)/2

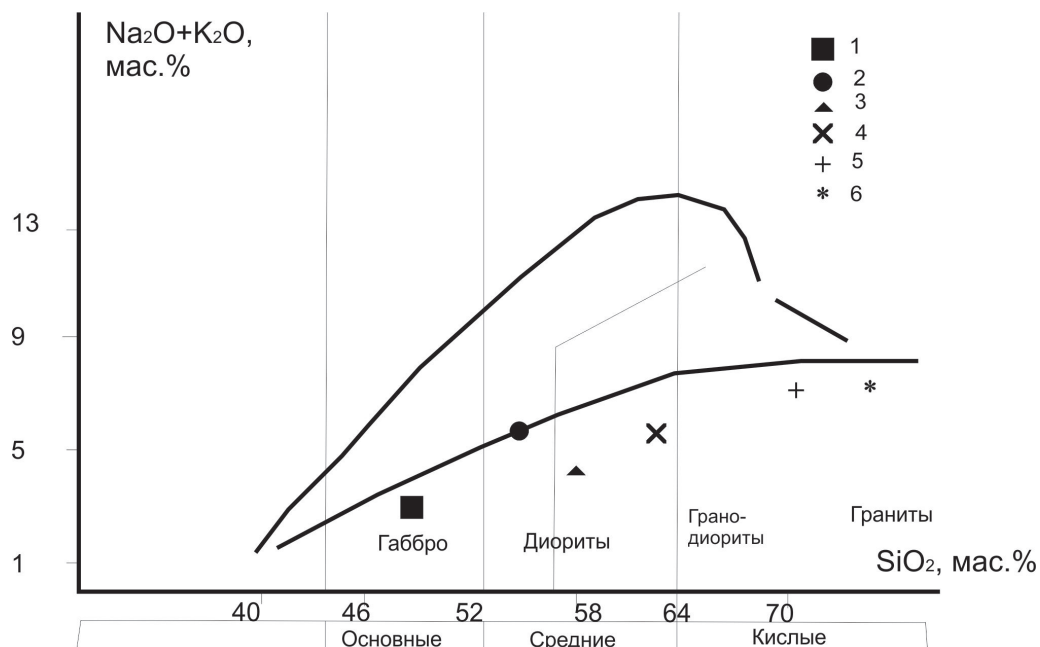


Рис. 2. Диаграмма $SiO_2 - (Na_2O + K_2O)$ для средних содержаний в породах Верхне-Башчелакского массива
Породные типы: 1 – габбро, 2 – диоритовые порфиры, 3 – кварцевый диоритовый порфирит,
4 –гранодиоритовые порфиры, 5 – гранит-порфиры, 6 – лейкогранит-порфиры

Fig. 2. Plot $SiO_2 - (Na_2O + K_2O)$ for average contents in rocks of Verkhne-Baschelak massif
Rock types: 1 – gabbro, 2 – diorite porphyry, 3 – quartz diorite porphyrite,
4 – granodiorite porphyry, 5 – granite porphyry

По изотопным составам неода и стронция гранодиориты Верхне-Башчелакского массива формировались при участии ювенильного мантийного источника ($\epsilon\text{Nd(T)} = +1.5$) с высоким содержанием радиогенного стронция ($\epsilon\text{Sr(T)} = +30.6$), что обычно объясняется обогащением мантийного резервуара субдущированными континентальными осадками. Nd – модельный возраст протолита пород Верхне-Башчелакского массива составляет 1.01 млрд лет.

Следовательно, по данным Eu/Eu^* и изотопам неода породы Верхне-Башчелакского массива и последующего гидротермального порфирового оруденения формировались в результате мантийно-корового взаимодействия.

Абсолютный возраст по данным U-Pb – датирования (SHRIMP II) для гранодиоритов массива составил 386 ± 3 млн. лет (рис. 3), что отвечает живетскому ярусу

среднего девона, что значительно древнее, чем отмечалось ранее [Государственная..., 2015].

Полученная датировка имеет принципиальное значение. Ранее было установлено, что на Государственной геологической карте масштаба 1:1000000 [2015] начало формирования усть-беловского комплекса определяется франским временем позднего девона. Там же, в Объяснительной записке, сказано, что «... В позднем девоне (раннем фране) в связи с изменением режима активной окраины с субдукционного на трансформный по данным [Крук и др., 2014] вулканическая деятельность сменилась формированием в Горном и Рудном Алтае крупных гранитоидных батолитов. По нашим же данным начало формирования массивов гранитоидов усть-беловского комплекса следует опустить до среднего девона (живет).

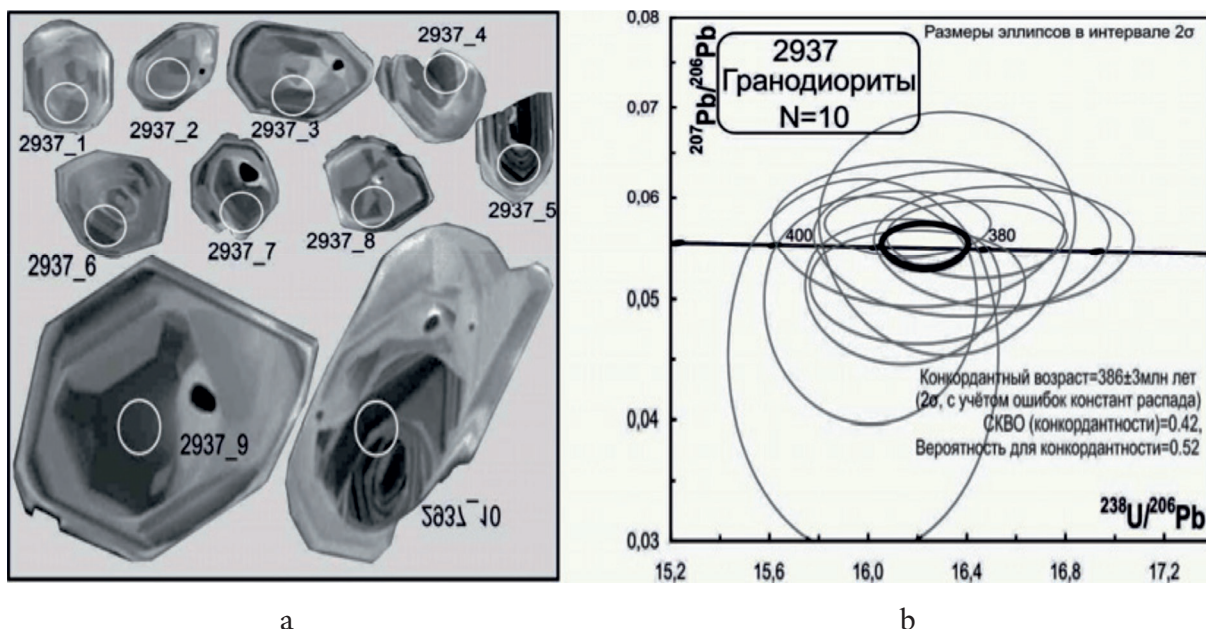


Рис. 3. Изображение циркона и определение абсолютного возраста гранодиоритов.
 а – катодолуминесцентные изображения цирконов из образца гранодиорита пробы 2937;
 б – конкордантный возраст циркона (386 ± 3 млн. лет)

Fig. 3. Foto of zircon and define of absolute age granodiorites.
 а – cathodoluminescence images of zircon from specimen of granodiorites probe 2937;
 б – concordia of age of zircon (386 ± 3 mln. years)

Характеристика порфирового оруденения. Среди гранит-порфиров, лейкогранит-порфиров Верхне-Бащелакского штока обнаружено одноименное проявление порфирового оруденения. Гранит-порфиры и гранодиорит-порфиры часто содержат вкрапленность флюорита и нодулы турмалина размерами до 0.5–1 см в поперечнике, указывающие на значительную обогащённость магматогенных флюидов заключительных фаз внедрения летучими компонентами (F, V) Верхне-Бащелакского массива. Оруденение представлено вкрапленностью, гнездами, реже прожилками пирита, пирротина, арсенопирита, молибденита, халькопирита, борнита с кварцем. Размеры вкрапленности (1–3 мм), гнезд (0.5–1.5 см). Мощность прожилков варьирует от 1–2 мм до 0.5 см. Сами гранитоиды интенсивно окварцованы и фельдшпатизированы. Содержания компонентов по результатам анализа пунктирно-бороздовых проб варьируют: меди – от 0.05 до 0.9 %, молибдена – от 0.05 до 0.4%, золота – от 0.2 до 1.8 г/т, серебра – от 5 до 25 г/т, висмута – от 0.05 до 0.2 %, мышьяка от 5 до 50 г/т. В результате предварительного опробования этого района, проведенного в 2018 и 2019 годах, установлено, что размеры видимого проявления порфирового оруденения в гранитах усть-беловского комплекса составляют 120×320 м. Верхне-Бащелакский участок распространения порфирового оруденения попадает в контур комплексной геохимической аномалии меди, золота, молибдена, висмута, мышьяка [Гусев, Дзгоева, 2010; Гусев и др., 2010]. Для оконтуривания истинных параметров оруденения требуется проведение горных поверхност-

ных выработок и колонкового бурения.

Кинетическим методом анализа, выполненным в Отделе научно-производственных аналитических работ ИМГРЭ (г. Москва) в монофракции молибденита (пробы Б-22, Б-36, Б-41) определено повышенное содержание рения в количестве от 192 до 740 г/т. Такие высокие концентрации рения характерны именно для порфировых медно-молибденовых систем, к которым и относится Верхне-Бащелакское проявление.

Методом ICP-MS в той же лаборатории в монофракциях молибденита определены (в г/т): Be – 3.14–4.1, Ti – 699–703, V – 72.7–81.2, Cr – 60.2–65.1, Mn – 113–125, Fe – 5200–6198, Co – 2.7–5.33, Ni – 18.4–29.4, Cu – 176–267, Zn – 83–120, Ga – 2.65–3.8, Rb – 20.5–22.7, Sr – 82.5–88.5, Y – 4.07–5.2, Zr – 13.0–17.3, Nb – 3.11–4.5, Cd – 11.3–17.8, Cs – 10.6–17.2, Ba – 186–194, La – 35.3–40.1, Ce – 77.9–81.4, Pr – 8.76–9.3, Nd – 31.2–45.2, Sm – 5.28–6.2, Eu – 0.082–0.092, Gd – 2.32–3.12, Tb – 0.319–0.402, Dy – 1.01–1.45, Ho – 0.174–0.183, Er – 0.533–0.643, Tm – 0.080–0.091, Yb – 0.675–1.23, Lu – 0.126–0.14, Hf – 0.558–0.603, Ta – 0.318–0.411, Pb – 255–529, Th – 6.73–8.11, U – 1.13–1.89.

Установлено, что формирование оруденения протекало в две стадии: раннюю кварц-пирит-пирротиновую с арсенопиритом и позднюю кварц-халькопирит-борнитовую с молибденитом и золотом. Молибденит вкрапленников и скоплений в прожилках образует правильные ромбоэдрические кристаллики размерами 0.5–1.8 мм. При этом гомогенизация газовой-жидких включений в кварце 1 генерации в ассоциации с гексагональным пирротинном и арсенопиритом

происходит в интервале от 285 до 300°C. Температура гомогенизации газовой-жидких включений кварца второй генерации в ассоциации с халькопиритом, молибденитом и борнитом гораздо ниже и составляет 240–260°C. При такой смене термодинамических условий формирования оруденения от ранней к поздней стадии происходит заметное увеличение активности серы гидротермальных растворов ($\log a_{S_2}$ от -14.3 – -13 до -9.2 – -8.3) (рис. 4).

В монофракциях пирита и халькопирита Верхне-Бащелакского проявления определены концентрации элементов –

примесей (табл. 2, 3). При этом в пиритах наблюдается прямая корреляция в содержаниях золота, мышьяка и марганца (табл. 2).

Аналогичная закономерность наблюдается и для халькопирита. К этой позитивной ассоциации в халькопирите присоединяются также олово и кадмий. Отмечается прямая зависимость содержаний кадмия, индия и олова в медном колчедане порфировых руд (табл. 3).

Содержание тяжёлого изотопа серы в пирите и халькопирите Верхне-Бащелакского проявления варьирует от -3.1 до +3.8, что отвечает магматогенному источнику.

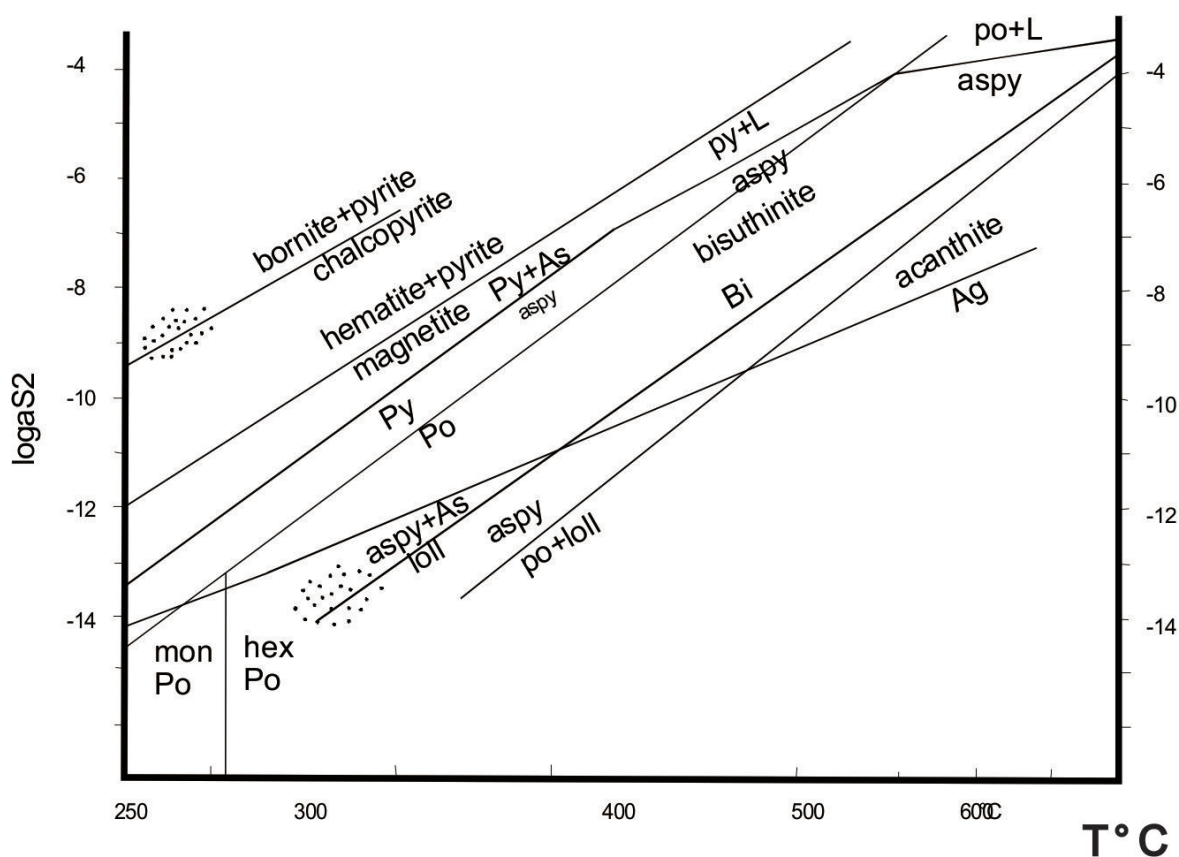


Рис. 4. Диаграмма a_{S_2} – температура по [Barton, Skinner, 1979] для стадий медно-молибден-золото-порфирового оруденения Верхне-Бащелакского проявления.

Py – пирит, *Po* – пирротин, *aspy* – арсенопирит, *loil* – лёллингит, *L* – жидкость.

Сгущением точек показаны поля соотношений активности серы и температур для разных стадий

Fig. 4. Plot a_{S_2} – temperature after [Barton, Skinner, 1979] for stage copper-molibdenium-gold porphyry ore mineralization of Verkh-Baschelak manifestation.

Py – Pyrite, *Po* – pyrrhotite, *aspy* – arsenopyrite, *loil* – loellingite, *L* – liquid.

Thickening show fields ratio of actively sulfur and temperature for different stages

Таблица 2

Элементы-примеси в пиритах Верхне-Бащелакского проявления (г/т)

Table 2

Elements-admixture in pyrites of Verkhne-Baschelak manifeststion (ppm)

Элементы	БАЩ-1	БАЩ-2	БАЩ-3
Мышьяк	52	61	85
Никель	32	49	60
Кобальт	10.5	48	22
Ванадий	0.7	0.8	1.5
Титан	27	31	41
Марганец	37	54.0	66
Ниобий	5.5	5.1	6.4
Лантан	5.3	4.8	5.9
Иттрий	4.2	12.1	14.2
Бериллий	0.3	0.5	0.5
Олово	7.6	8.5	5.1
Молибден	25	58	80
Свинец	400	450	510
Висмут	35	38	50
Золото	3.5	5.2	8.8

Таблица 3

Элементы-примеси в халькопиритах Верхне-Бащелакского проявления (г/т)

Table 3

Elements-admixture in chalcopyrites of Verkhne-Baschelak manifeststion (ppm)

Элементы	БАЩ-4	БАЩ-5	БАЩ-6
Мышьяк	22	31	35
Никель	12	19	20
Кобальт	13.5	28	22
Ванадий	0.7	0.8	1.5
Титан	17	21	31
Марганец	47	56	69
Ниобий	3.5	3.1	3.4
Лантан	4.3	4.8	4.9
Иттрий	4.5	9.1	11.2
Бериллий	0.3	0.5	0.5
Олово	15.6	28.5	25.1
Молибден	27	28	30
Кадмий	21	29	45
Индий	14	21	42
Свинец	200	250	210
Висмут	25	28	30
Золото	1.5	3.2	5.8

Примечание: БАЩ- 1, БАЩ-2 БАЩ-3 номера проб для пирита; БАЩ-4, БАЩ-5, БАЩ-6 – номера проб халькопирита

Обсуждение

Время формирования усть-беловского комплекса по данным Н.Н. Крука [Крук и др., 2014] отвечает переходному этапу от субдукционной геодинамической обстановки активной континентальной окраины к трансформной. Однако во всех случаях распространения массивов усть-беловского комплекса на территории Горного Алтая в диоритах, кварцевых диоритах и гранодиоритах наблюдаются обильные мафические включения, интерпретируемые как смешение мантийной базальтовой магмы с более

кислыми расплавами коровой принадлежности [Гусев, Гусев, 2020]. Возникает вопрос – а к какому мантийному источнику принадлежат самые основные дериваты Верхне-Башчелакского массива? Для этого воспользуемся соотношениями в породах компонентов Nb/Y – Zr/Y. На диаграмме, построенной с использованием этих соотношений габбро, диоритовые порфириты, кварцевые диоритовые порфириты и гранодиорит-порфиры попадают в область базальтов океанического плато, принадлежащие плюмовым источникам (рис. 5).

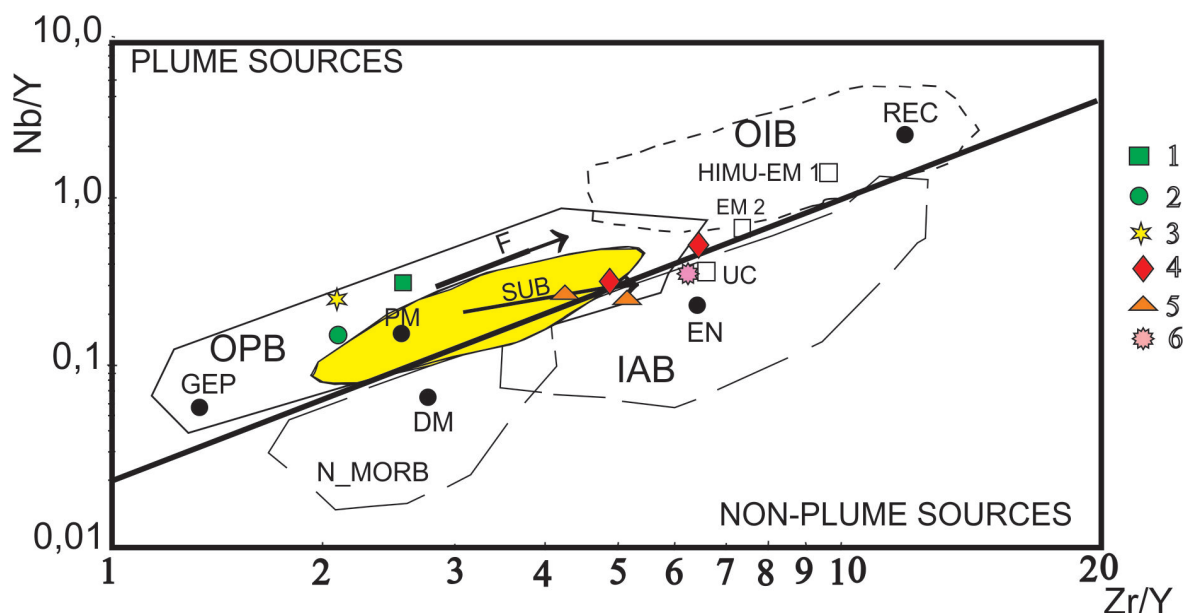


Рис. 5. Диаграмма Nb/Y – Zr/Y для пород Верхне-Башчелакского массива.

Контурные поля [Condie, 2005]: N-MORB – базальты COX; OPB – базальты океанических плато; OIB – базальты океанических островов; IAB – базальты островных дуг.

Реперные резервуары: PM – примитивная мантия; DM – неглубокая деплетированная мантия, DEP – глубокая деплетированная мантия; HIMU – источник, обогащенный U и радиогенным Pb; EM1 и EM2 – обогащенные мантийные источники; EN – обогащенный компонент верхней континентальной коры и субконтинентальной литосферы; UC – верхняя континентальная кора; REC – рециклинговый компонент. Стрелками показаны эффекты периодического плавления (F) и субдукции (SUB).

Породные типы массива: 1 – габбро, 2 – диоритовые порфириты, 3 – кварцевые диоритовые порфириты, 4 – гранодиорит-порфиры, 5 – гранит-порфиры, 6 – лейкогранит-порфиры

Fig. 5. Plot of ratio Nb/Y – Zr/Y for rock types of Verkhne-Bashchelak massif.

Contours of fields [Condie, 2005]: N-MORB – basalts of COX; OPB – basalts of oceanic plate; OIB – basalts of ocean islands; IAB – basalts of oceanic arc; PM – primitive mantle; DM – non deep depletion mantle; DEP – deep depletion mantle; HIMU – source of enriched U and radiogenic Pb; EM1 and EM2 – enriched mantle sources; EN – enriched component of upper continental earth crust and subcontinental lithosphere; UC – upper continental crust; REC – recycling component.

Pointers show effects periodical melting (F) and subduction (SUB).

Rock types of massifs: 1 – gabbro, 2 – diorite porphyrite, 3 – quartz diorite porphyrite, 4 – granodiorite-porphyre, 5 – granite-porphyre, 6 – leucogranite-porphyre

Более кислые разновидности пород массива (гранит-порфиры и лейкогранит-порфиры) по причине их коровой природы попадают в поле базальтов островных дуг имеют не плюмовый источник формирования.

Следует отметить, что гранитоиды усть-беловского комплекса, к которому относится и Верхне-Бащелакский массив, во многих районах Горного Алтая характеризуется развитием медно-золото-порфирового (Чикетаманское проявление в Яломанском ареале, проявление Ключа Черёмухового в Усть-Беловском районе) и медно-молибден-золото-порфирового (Колыванское месторождение, проявления Кувашского ареала). Это позволяет надеяться на обнаружение промышленного оруденения мед-

но-молибден-золото-порфирового типа и в гранитоидах Верхне-Бащелакского массива в ближайшем окружении выявленного перспективного проявления порфирового типа. Наиболее перспективными районами поисков порфирового оруденения, аналогичного Верхне-Бащелакскому проявлению являются участки, прилегающие с юго-запада к Бащелакскому разлому (рис. 1).

Основная ценность Верхне-Бащелакских руд состоит в весьма высоких концентрациях рения в молибдените и в рудах. Это обстоятельство определяется особенностями микроструктуры сульфида молибдена, которая состоит из трёхслойных пачек с атомами Мо в центре их и атомами S по периферии (рис. 6).

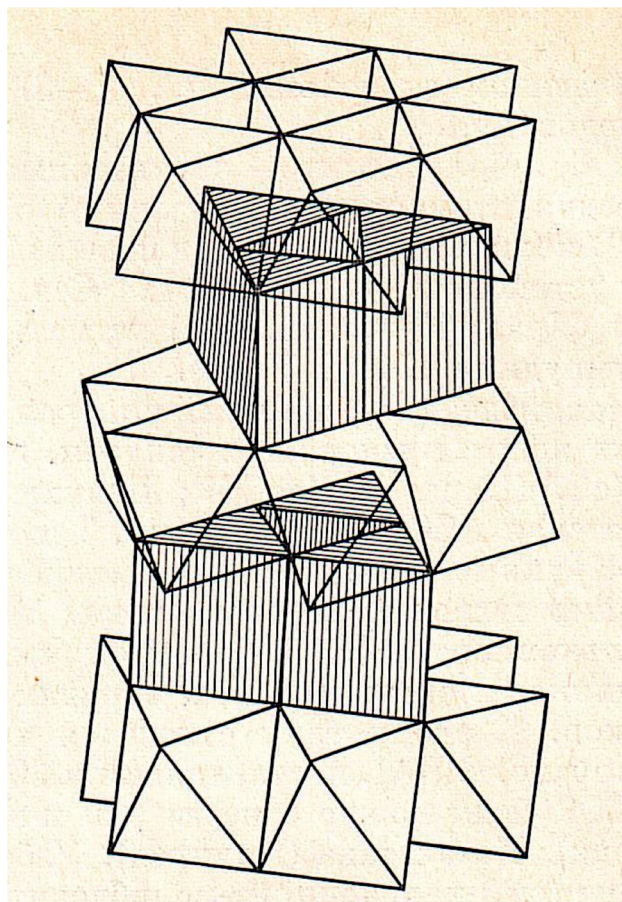


Рис. 6. Полиэдрическое изображение микроструктуры молибденита. Заштрихованные области отвечают Мо, а не заштрихованные периферические части – S

Fig. 6. Polyhedral picture of microstructure molybdenite.
Shaded regions they answer Mo, but non shaded peripheral parts – S

При этом трёхслойные пачки могут по-разному чередоваться вдоль оси с (вытянутости кристалла) с образованием гексагонального 2Н-политипа и ромбоэдрического 3R-политипа. Политип 3R характеризуется повышенным содержанием элементов-примесей и большей ролью Мо, а также более низкой активностью (фугитивностью) S. Именно 3R-политип молибденита всегда содержит наиболее высокие концентрации рения [Voudouris et al., 2009]. Внешний вид кристаллов 3R-политипа – уплощённые ромбоэдры, которые и преобладают на Верхне-Бащелакском проявлении.

Выводы

1. Перспективное проявление Верхне-Бащелакское обнаруживает тесные связи с гранитоидами одноименного массива.
2. Все породные типы массива относятся к нормальной известково-щелочной серии.
3. Основные дериваты Верхне-Бащелакского массива отнесены к производным базальтов океанических плато, имеющих плюмовую природу.
4. Абсолютный возраст гранодиоритовых порфиров этого массива,

относимого к усть-беловскому комплексу, составляет 386 ± 3 млн. лет, что отвечает живетскому ярусу среднего девона. Полученная датировка значительно удревняет начало формирования усть-беловского комплекса.

5. По изотопии стронция и неодима, а также соотношениям Eu/Eu^* гранодиоритовые порфиры массива сформировались в результате мантийно-корового взаимодействия.

6. Верхне-Бащелакское проявление относится к золото-медно-молибден-порфировому типу, содержащему стратегические металлы, востребованные в России.

7. Остродефицитный в России металл рений содержится в рудах в промышленных концентрациях и входит изоморфно в состав молибденита, относящегося к уплощённой ромбоэдрической модификации 3R-политипа.

8. Верхне-Бащелакское порфировое проявление по своим параметрам и промышленным концентрациям следует отнести к перспективным объектам с востребованными и остродефицитными металлами (Au, Mo, Re), требующим доизучения с поверхности и на глубину.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare that there is no conflict of interest.

Список литературы

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Алтайский край. Масштаб 1 : 500 000. Ред. Н.И. Гусев / авторы Туркин Ю.А., Кривчиков В.А., Русанов Г.Г., Федак С.И. ФГУГП Горно-Алтайская ПСЭ. 2004. 375 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист М-44 – Рубцовск. Объяснительная записка. / Авторы Н.И. Гусев, Ю.Е. Вовшин, А.А. Круглова, М.Г. Пушкин и др. СПб: Кар-

тографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. 415 с.

Гусев А.И., Гусев Н.И. Новые данные по абсолютному возрасту, петрологии и потенциальной рудоносности Мурзинского интрузивного массива (северо-западный Алтай) // Отечественная геология. 2020. № 6. С. 30–41. doi:10.24411/0869-7175-2020-10020

Гусев А.И., Дзгоева Е.А. Золотое оруденение Бащелакского рудного района в Горном Алтае // Природные ресурсы Горного Алтая: геология, геофизика, экология, минеральные, водные и лесные ресурсы Алтая. 2010. № 1. С. 40–48.

Гусев А.И., Попов С.В., Дзгоева Е.А., Белозерцев Н.В. Петрология и рудоносность магмо-рудно-метасоматических систем Талицко-Бащелакского района Алтая. Бийск: Изд-во БПГУ, 2010. 205 с.

Крук Н.Н., Куйбида М.Л., Гусев Н.И. и др. Эволюция Алтайской активной окраины в позднем девоне: магматизм, деформации, особенности осадконакопления // Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогеническое прогнозирование. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. С. 96–98.

Barton P.B., Skinner B.J. Sulfide mineral stabilities. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. New York. 1979. P. 278–403.

Condie K.C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // *Lithos*. 2005. Vol. 79 (3–4). P. 491–504.

Huang M.-J., Bi X.-W., Hu R.-Z., Gao J.-F., Xu L.-L., Zhu J.-J., Shang L.-B. Geochemistry, in-situ Sr-Nd-Hf-O isotopes, and mineralogical constraints on origin and magmatic-hydrothermal evolution of the Yulong porphyry Cu-Mo deposit, Eastern Tibet // *Gondwana Research*. 2019. Vol. 76. P. 98–114.

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

Ren W., Yang F., Bagas L., Zhang C., Chi N., Zhang X. In-situ molybdenite and rutile geochemistry of the Nannihu porphyry Mo-W deposit, East Qinling, China: A perspective on ore-forming processes // *Ore Geology Reviews*. 2024. Vol. 164. P. 105823. doi: 10.1016/j.oregeorev.2023.105823

Richards J.P., Kerrich R. Special paper: adakite-like rocks: their diverse origins and questionable role in metallogenesis // *Econ. Geol.* 2007. Vol. 102. P. 537–576.

Sillitoe R.H. Porphyry Copper Systems // *Econ. Geol.* 2010. Vol. 105 (1). P. 30–41.

Voudouris P.C., Melfos V., Spry P.G., Bind L., Kartal T., Arikas K., Moritz R., Ortellì M. Rhenium-rich molybdenite and rheniite in the Pagoni Rachi Mo–Cu–Te–Ag–Au prospect, Northern Greece: implications for the Re geochemistry of porphyry-style Cu–Mo and Mo mineralization // *The Canadian Mineralogist*. 2009. Vol. 47. P. 1013–1036.

Referencies

Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoq Federatsii. Altayskiy kray [The State Geological Map of the Russian Federation. Altai Territory]. Masshtab 1: 500 000, Ed. N.N.

Gusev / avtory Turkin Yu.A., Krivchikov V.A., Rusanov G.G., Fedak S.I. (otv. Isp). FGUGP Gorno-Altayskaya PSE. 2004. 375 p. (in Russian).

Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoq Federatsii [State Geological Map of the Russian Federation]. Masshtab 1: 1000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Altae-Sayanskay. List M-44. Rubtsovsk. Ob'yasnitel'naya zapiska. / Avtory N.I. Gusev, Yu. E. Vocshin, A.A. Kruglova, M.G. Pushkin et al. SPb: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2015. 415 p. (in Russian).

Gusev A.I., Gusev N.I. Novye dannye po absolyutnomu vozrastu, petrologii i potencial'noj rudonosnosti Murzinskogo intruzivnogo massiva (severo-zapadnyj Altaj) [New data on the absolute age, petrology, and potential ore content of the Murzinsky intrusive massif (Northwestern Altai)] // Otechestvennaya geologiya [National Geology]. 2020. No 6. P. 30–41. (in Russian). doi:10.24411/0869-7175-2020-10020

Gusev A.I., Dzagoeva E.A. Zolotoe orudnenie Bashchelakskogo rudnogo rayona v Gornom Altae [Golden mineralization of the Baschelaksky ore region in Gorny Altai] // Prirodnye resursy Gornogo Altaya: geologiya, geofizika, ekologiya, mineral'nye, vodnye i lesnye resursy Altaya [Natural resources of Gorny Altai: geology, geophysics, ecology, mineral, water and forest resources of Altai]. 2010. No. 1. P. 40–48. (in Russian).

Gusev A.I., Popov S.V., Dzagoeva E.A., Belozertsev N.V. Petrologiya i rudonosnost' magmo-rudno-metasomaticheskikh system Talitsko-Bashchelakskogo rayona Altaya [Petrology and ore content of magma-ore-metasomatic systems of Talitsko-Baschelaksky district of Altai]. Biysk: Izd-vo BPGU, 2010. 205 p. (in Russian).

Kruk N.N., Kuybida M.L., Gusev N.I. et al. Evolutsiya Altayskoy aktivnoy okrainy v pozdnem devone: magmatizm, deformatsii, osobennosti osadkonakopleniya [Evolution of the Altai Active margin in the Late Devonian: magmatism, deformations, and sedimentation features] // Korrelyatsiya altaid i uralid: magmatizm, metamorfizm, stratigrafiya, geokhronologiya, geodinamika i metallogenicheskoe prognozirovanie [Correlation of Altaids and Uralids: magmatism, metamorphism, stratigraphy, geochronology, geodynamics, and metallogenic forecasting]. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2014. P. 96–98. (in Russian).

Barton P.B., Skinner B.J. Sulfide mineral stabilities. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. New York. 1979. P. 278–403.

Condie K.C. High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // Lithos. 2005. Vol. 79 (3–4). P. 491–504.

Huang M.-J., Bi X.-W., Hu R.-Z., Gao J.-F., Xu L.-L., Zhu J.-J., Shang L.-B. Geochemistry, in-situ Sr-Nd-Hf-O isotopes, and mineralogical constraints on origin and magmatic-hydrothermal evolution of the Yulong porphyry Cu-Mo deposit, Eastern Tibet // Gondwana Research. 2019. Vol. 76. P. 98–114.

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

Ren W., Yang F., Bagas L., Zhang C., Chi N., Zhang X. In-situ molybdenite and rutile geochemistry of the Nannihu porphyry Mo-W deposit, East Qinling, China:

A perspective on ore-forming processes // Ore Geology Reviews. 2024. Vol. 164. P. 105823. doi: 10.1016/j.oregeorev.2023.105823

Richards J.P., Kerrich R. Special paper: adakite-like rocks: their diverse origins and questionable role in metallogensis // Econ. Geol. 2007. Vol. 102. P. 537–576.

Sillitoe R.H. Porphyry Copper Systems // Econ. Geol. 2010. Vol. 105 (1). P. 30–41.

Voudouris P.C., Melfos V., Spry P.G., Bind L., Kartal T., Arikas K., Moritz R., Ortelli M. Rhenium-rich molybdenite and rheniite in the Pagoni Rachi Mo–Cu–Te–Ag–Au prospect, Northern Greece: implications for the Re geochemistry of porphyry-style Cu–Mo and Mo mineralization // The Canadian Mineralogist. 2009. Vol. 47. P. 1013–1036.

VERKHNE-BASHCHELAK PORPHYRY DETECTION ALTAI KRAI

A.I. Gusev, R.M. Belikova, V.S. Kovalev

Altai State Pedagogical University, Biisk,

E-mail: anzerg@mail.ru

An information geological building and new data rudo-generating magmatizm and ore mineralization Verkhne-Bashchelakskogo proyavleniya Altay krai lead in paper. Proyavlenie carry to gold-copper-molybdenium-porfire geology-industrial type, disclosing close space and paragenetic link with granitoids of Verkhne-Bashchelak in massif, that it is composed by gabbro, diorite porphyrite, granodiorite-porphyre and granite-porphires. Uranium-lead method on zircon (SHRIMP II) define age of granodiorite-porphyre that it arranges 386 ± 3 million years old. Forming of massif took place at participation of mantle and crust materials. Ore mineralization form in 2 stages of mineralization at considerable increase activity sulfur in fluids on the concluding stage. An industrial concentration of gold, cooper, molybdenium and rhenium reveal in ores. Rhenium enters in composition of molybdenite, detaching in sight thicken rhombohedral crystals, referring to 3R- polytype.

Key words: magmatism; gold-copper-molybdenium-porphyre ore mineralization; absolute age; rhenium.

Received April 27, 2025. Accepted: May 30, 2025

Сведения об авторах

Гусев Анатолий Иванович – доктор геолого-минералогических наук, профессор Алтайского государственного педагогического университета. Бийский филиал им. В.М. Шукшина. Россия, 659300, г. Бийск, ул. Советская, д. 5. ORCID: 0000-0001-7840-0272. E-mail: anzerg@mail.ru.

Беликова Радмила Михайловна - кандидат биологических наук, доцент Алтайского государственного педагогического университета. Бийский филиал им. В.М. Шукшина. Россия, 659300, г. Бийск, ул. Советская, д. 5.

Ковалев Владислав Сергеевич – научный работник Алтайского государственного педагогического университета. Бийский филиал им. В.М. Шукшина. Россия, 659300, г. Бийск, ул. Советская, д. 5.

Information about the authors

Gusev Anatolij Ivanovich – Doctor geology-mineralogical sciences, professor of Altai State Pedagogical University. Biysk branch named after V.M. Shukshin. 5, Sovetskaya St., 659300 Biisk, Russia. ORCID: 0000-0001-7840-0272. E-mail: anzerg@mail.ru.

Belikova Radmila Mikhaylovna – PhD in Biology, Associate Professor of Altai State Pedagogical University. Biysk branch named after V.M. Shukshin. 5, Sovetskaya St., 659300 Biisk, Russia.

Kovalev Vladislav Sergeevich – Science worker of Altai State Pedagogical University. Biysk branch named after V.M. Shukshin. 5, Sovetskaya St., 659300 Biisk, Russia.