УДК 550.93:552.3:553.43’411(571.620)

О. В. ПЕТРОВ (ВСЕГЕИ), А. И. ХАНЧУК, В. В. ИВАНОВ (ДВГИ ДВО РАН), Е. А. КИСЕЛЁВ (Роснедра), В. В. ШАТОВ, Ю. П. ЗМИЕВСКИЙ, А. В. МОЛЧАНОВ, А. В. ТЕРЕХОВ, С. А. СЕРГЕЕВ (ВСЕГЕИ)

U-Pb SIMS геохронология рудоносных магматических пород золото-медно-порфировых проявлений Малмыжского и Понийского рудных полей (Нижнее Приамурье)

Обсуждаются новые данные, полученные в ходе минералого-петрографического, петрогеохимического и изотопно-геохронологического изучения магматических пород Малмыжского и Понийского рудных полей. Результаты изотопно-геохронологических исследований указывают на практически идентичный – сеноманский радиологический возраст их магматической кристаллизации: 97–99 и 93 млн лет соответственно. На основе сравнительного анализа изученных образцов магматических пород Малмыжского и Понийского рудных полей как друг с другом, так и с магматическими породами других порфировых месторождений мира делается попытка уточнить геодинамическую природу их происхождения и выявить регионы с близкими обстановками проявления адакитового гранитоидного магматизма.

Ключевые слова: изотопное U-Pb датирование магматических пород, золото-медно-порфировое оруденение, Малмыжское и Понийское рудные поля, Нижнее Приамурье.

O. V. PETROV (VSEGEI), A. I. KHANCHUK, V. V. IVANOV (FEGI FEB RAS), E. A. KISELEV (Rosnedra), V. V. SHATOV, YU. P. ZMIEVSKIY, A. V. MOLCHANOV, A. V. TEREKHOV, S. A. SERGEEV (VSEGEI)

U-Pb SIMS geochronology of ore-bearing magmatic rocks of the Malmyzh and Poni gold-copper-porphyry ore fields (Lower Amur River Region)

New data obtained by mineralogical, petrographical, geochemical and isotope-geochronological studies of magmatic rocks within the Malmyzh and Poni gold-copper-porphyry ore fields are discussed. Geochronological data show a simultaneous – Cenomanian radiological age of their magmatic crystallization: 97–99 и 93 Ma, respectively. Based on comparative analysis of studied samples from the Malmyzh and Poni ore fields both with one another and with magmatic rocks from worldwide porphyry deposits, it is attempted to better understand geodynamic nature of their formation and detect the world areas with similar conditions of adakitic granitoid magmatism.

Keywords: isotopic U-Pb zircon dating of ore-bearing magmatic rocks, gold-copper-porphyry ore mineralization, Malmyzh and Poni ore fields, the Lower Amur River Region.

Для цитирования: Петров О. В. U-Pb SIMS геохронология рудоносных магматических пород золото-медно-порфировых проявлений Малмыжского и Понийского рудных полей (Нижнее Приамурье) / О. В. Петров, А. И. Ханчук, В. В. Иванов, Е. А. Киселёв, В. В. Шатов, Ю. П. Змиевский, А. В. Молчанов, А. В. Терехов, С. А. Сергеев / Региональная геология и металлогения. – 2020. – № 83. – С. 41–56.

Введение. Проявления позднеальб-сеноманского гранитоидного и монцонитоидного магматизма обладают очень важным значением для понимания металлогении юга Дальнего Востока России, так как с ними в регионе связано формирование крупных месторождений редких, цветных и благородных металлов различных геолого-промышленных типов: порфирового, скарнового, золото-кварцевого и др. [7–10; 15–18; 27].

Особое звучание эта проблема приобрела в связи с открытием в Сихотэ-Алинском орогенном поясе – в Журавлёвско-Амурском террейне – крупного золото-медно-порфирового месторождения Малмыж (участка недр федерального значения) и перспективного на золото и медь Понийского потенциально рудного поля (рис. 1), которые обладают высоким экономическим потенциалом для развития минерально-сырьевой базы Дальнего Востока России.

Многочисленными работами А. И. Ханчука [15–17], О. В. Петрова и соавторов [9; 10] была дана развернутая характеристика геологических, минерагенических, петрохимических и геохимических особенностей синорогенных

© Петров О. В., Ханчук А. И., Иванов В. В., Киселёв Е. А., Шатов В. В., Змиевский Ю. П., Молчанов А. В., Терехов А. В., Сергеев С. А., 2020

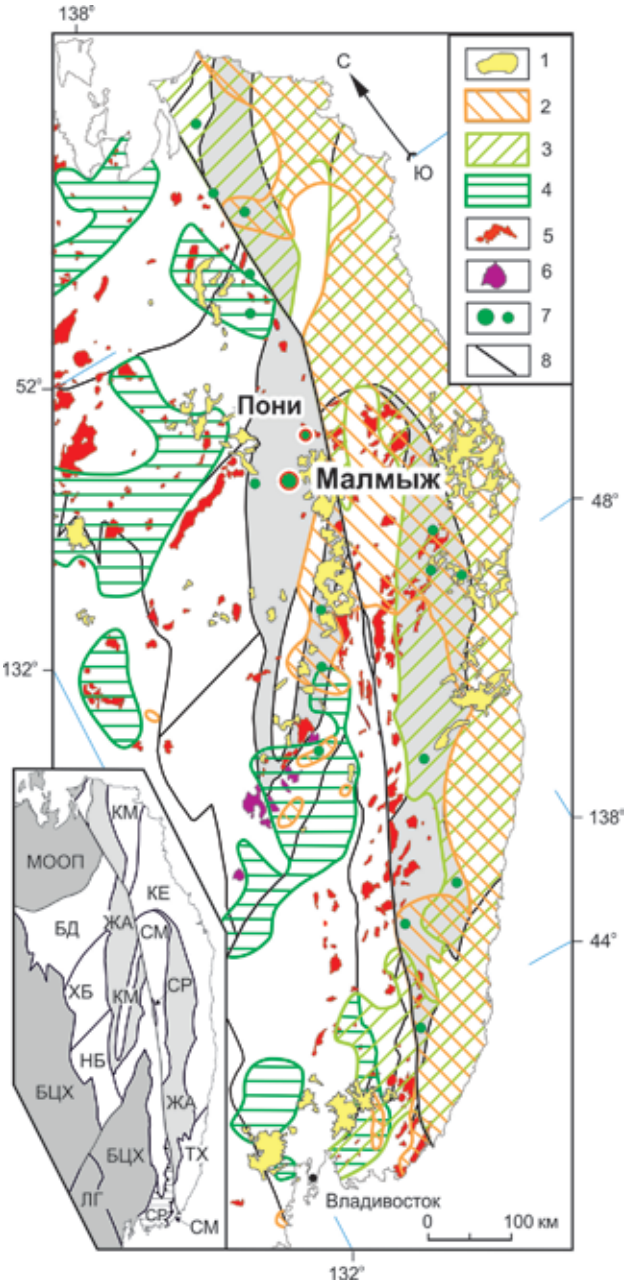

Рис. 1. Положение золото-медно-порфировых месторождений Малмыж и Пони в структурах Сихотэ-Алинского орогенного пояса

1–6 – меловые и кайнозойские магматические комплексы (штрихами показаны ареалы распространения): *1 – плиоцен* (внутриплитные платобазальты), *2 – поздний палеоцен – миоцен* (риолиты, бимодальные вулканиты, базальты и габбро-граниты трансформной окраины), *3 – турон – ранний палеоцен* (андезиты – риолиты и гранитоиды надсубдукционной окраины), *4 – поздний альб – нижний сеноман* (базальты, андезиты, риолиты трансформной окраины), *5 – позднеальб-сеноманские* гранитоиды и монцоитоиды, *6 – готерив-барремские* граниты; *7* – золото-медно-порфировые месторождения и рудопроявления; *8* – Центральный Сихотэ-Алинский разлом.

На врезке террейны аккреционных призм: *средне-позднеюрской* БД – Баджальский и НБ – Наданьхада-Бикинский, СМ – Самаркинский и ХБ – Хабаровский; *позднетитон-валанжинской* ТХ – Таухинский; *баррем-раннеальбской* КМ – Киселевско-Маноминский; террейны: *баррем-раннеальбской* островной дуги КЕ – Кемский, *раннемелового* турбидитового бассейна ЖА – Журавлевско-Амурский, СР – Сергеевский палеозойских континентальных аллохтонов на террейне юрской аккреционной призмы; террейны и супертеррейны орогенных поясов: БЦХ – Бурея-Цзямуси-Ханкайский *раннепалеозойский*, ЛГ – Лаоелин-Гродековский *триасовый*, МООП – Монголо-Охотский *юрский*

(коллизионных) позднеальб-сеноманских рудоносных магматических пород, впервые произведена оценка возраста их кристаллизации по акцессорным цирконам методом ЛА-ИСП-МС на масс-спектрометре высокого разрешения с индуктивно-связанной плазмой и системой лазерной абляции, предложены к рассмотрению геологические, регионально-минерагенические и геодинамические модели формирования магматических образований как Журавлёвско-Амурского террейна, так и всего Сихотэ-Алинского орогенного пояса в целом.

По результатам этих работ выяснилось, что даже соседние позднеальб-сеноманские интрузии Сихотэ-Алиня могут иметь пестрые петрогеохимические характеристики. В одном случае они представлены габбро, монцогаббро и монцонитами, а в другом – адакитами и гранитоидами А-, I- и S-типов. Такая комбинация внутриплитных и надсубдукционных (или мантийных и коровых) признаков характерна для магматитов трансформных континентальных окраин. При этом было показано, что с мантийно-коровыми синорогенными интрузиями гранитоидов связано образование Au-Cu и Au-Mo-Cu оруденения в раннемеловом террейне турбидитового осадочного бассейна границы континент – океан и Cu-Au-W оруденения в террейне средне-позднеюрской аккреционной призмы.

На этом основании авторы смогли прийти к выводу о проявлении на рассматриваемой территории вблизи рубежа 100 млн лет медного, вольфрамового, оловянного и золотого оруденений, сформированных в результате синсдвигового орогенеза в обстановке трансформной континентальной окраины.

Однако, несмотря на такую высокую изученность территории Журавлёвско-Амурского террейна, некоторые принципиальные вопросы, касающиеся особенностей его геологического строения, рудоносности и возраста гранитоидных и монцонитоидных образований, с которыми ассоциирует золото-медно-порфировая и золото-кварцевая рудная минерализация Малмыжского и Понийского рудных полей, остаются еще не до конца исследованными.

Статья посвящена обсуждению новых данных, полученных коллективом специалистов из ВСЕГЕИ и Дальневосточного геологического института ДВО РАН в ходе минералого-петрографического, петрогеохимического и изотопно-геохронологического изучения магматических пород Малмыжского и Понийского рудных полей с помощью современных лабораторно-аналитических методов исследования. Кроме того,

в статье на основе сравнительного анализа изученных образцов магматических пород как друг с другом, так и с магматическими породами других порфировых месторождений мира сделана попытка уточнить геологическую и геодинамическую природу их происхождения и обозначить регионы с близкими обстановками проявления адакитового гранитоидного магматизма.

Малмыжское рудное поле. Расположено в южной части Хабаровского края, в нижнем течении р. Амур. Входящее в его состав одноименное золото-медно-порфировое месторождение приурочено к небольшим интрузивным телам гранитоидов позднемелового (сеноманского) возраста, среди которых наиболее крупным является Боккинский массив, прорывающий терригенные породы нижнего мела (рис. 2).

На современном уровне эрозионного среза Боккинский массив и сопровождающие его в виде сателлитов более мелкие куполо-, штоко- и дайкообразные тела порфировидных диоритов, кварцевых диоритов и гранодиоритов, а также диорит- и гранодиорит-порфиров образуют линейный рудно-магматический ареал, контролирующий размещение золото-медно-порфировой рудной минерализации. Ареал вытянут в северо-восточном направлении вдоль оси Малмыжской зоны разломов более чем на 20 км при ширине в 5–10 км. В его пределах выделяется целая серия рудоносных участков штокверкового типа (Центральный, Северный, Равнина, Долина, Свобода и др.), приуроченных к выходам на дневную поверхность малых тел диорит- и гранодиорит-порфиров позднемелового возраста, прорывающих терригенные и туфогенно-терригенные

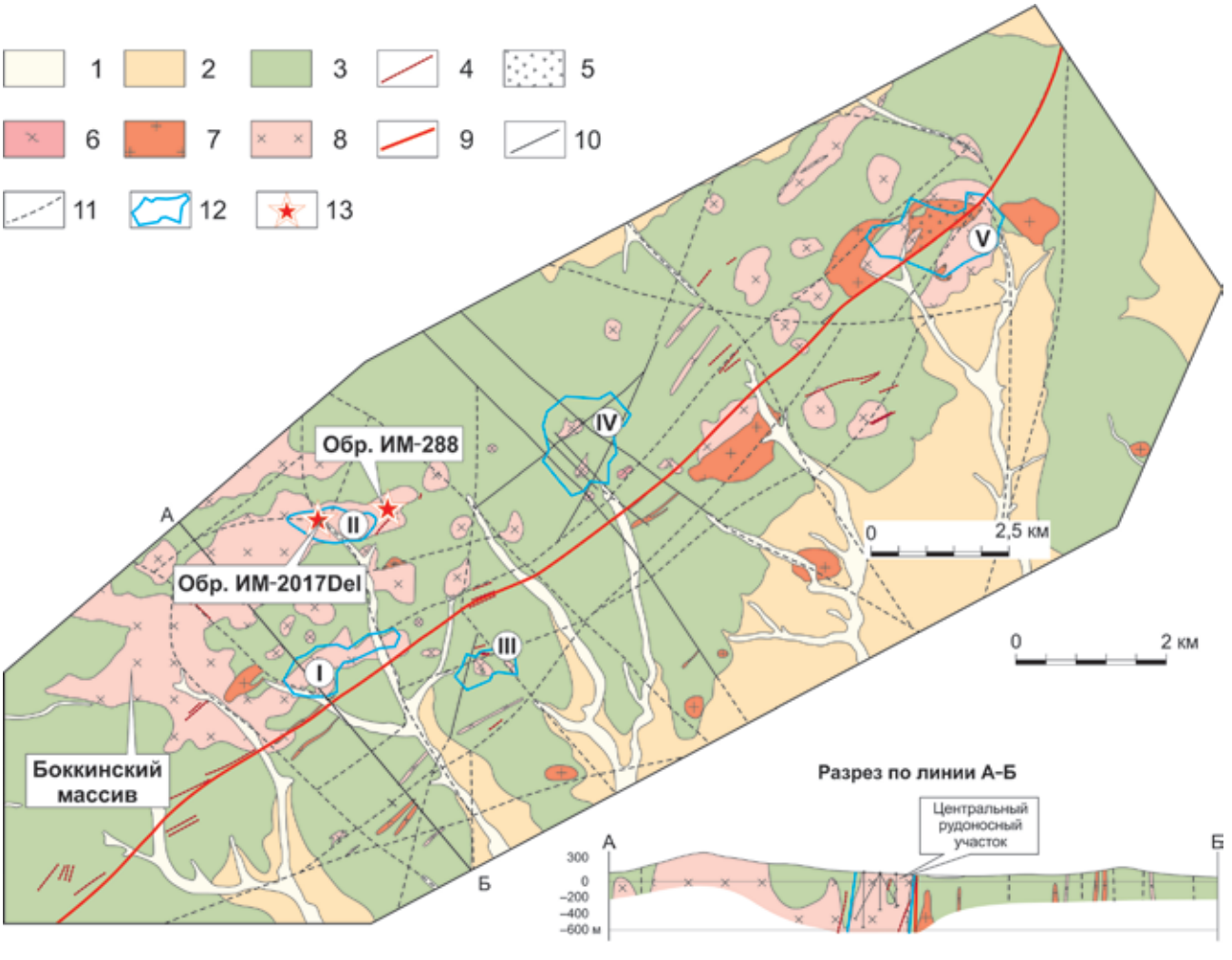

Рис. 2. Схема геологического строения Малмыжского рудного поля

1, *2* – четвертичные отложения (*1* – речные аллювиальные и делювиальные, *2* – суглинки, супеси, дресва, щебень, глины с редкой галькой и гравием); *3* – нижнемеловые терригенные отложения (Ларгасинская свита: песчаники, алевролиты, гравелиты, туффиты); *4–8* – магматические образования позднемелового (сеноманского) возраста (*4* – гипабиссальный дайковый комплекс: диорит- и кварцевые диорит-порфиры, гранодиорит-порфиры, *5* – гидротермально-магматические эруптивные брекчии, *6* – диорит-порфиры, *7* – порфировидные гранодиориты и гранодиорит-порфиры, *8* – порфировидные кварцевые диориты, кварцевые диорит-порфиры); *9* – ось Малмыжской зоны разломов; *10*, *11* – тектонические нарушения (*10* – установленные, *11* – предполагаемые); *12* – проекция на дневную поверхность штокверковых золото-медно-порфировых рудных тел (рудоносные участки – римские цифры в кружочках: I – Центральный, II – Северный, III – Равнина, IV – Долина, V – Свобода); 13 – места отбора проб на изотопно-геохронологические исследования

породы нижнемеловой (альбской) ларгасинской свиты.

На территории рудного поля по структурно-морфологическим особенностям выделяются линейные и ареально-изометрические штокверки, а по вещественным характеристикам – магнетит-сульфидные существенно медные и кварц-сульфидные золотосодержащие медные штокверки.

Установленная в пределах Малмыжского рудного поля гидротермально-метасоматическая зональность, обусловленная процессом внедрения сеноманских гранитоидов, выражается в смене от центра к периферии кварц-биотит-калишпатовых гидротермалитов сначала кварц-серицит-карбонат-хлоритовыми, затем кварц-серицитовыми метасоматитами или филлизитами, а далее – пропилитами, образующими самый внешний ореол гидротермальных изменений. По особенностям внутреннего строения выявленная зональность мало чем отличается от типовой диоритовой модели строения рудоносной порфировой системы, предложенной Дж. Лоуэлом и Дж. Джильбертом [23]. Отмеченные в восточной части рудного поля ореолы аргиллизации имеют гипергенную природу, накладываясь на все выше перечисленные типы гидротермально-метасоматических изменений.

Большинство рудных тел Малмыжского месторождения контролируется разрывными нарушениями преимущественно северо-восточного простирания. Рудная минерализация представлена вкрапленностью и прожилками магнетита, пирита, халькопирита и борнита. В подчиненном количестве отмечаются сфалерит, галенит, пирротин, арсенопирит и молибденит. Серебро- и медьсодержащее самородное золото, теллуриды золота и серебра, а также различные минералы серебра и платиноидов присутствуют в руде в виде тонких включений в халькопирите, борните, пирите и магнетите.

В зоне окисления широкое развитие получили гетит, ярозит, гематит, лимонит, куприт, малахит, азурит, самородная медь, халькозин, ковеллин и дигенит, замещающие минералы первичных сульфидных руд.

Это одно из самых крупных золото-медно-порфировых месторождений Российской Федерации. Его запасы составляют 1,3 млрд т руды, в том числе 5,16 млн т меди и 278 т золота при средних содержаниях этих металлов в рудах – 0,41 % и 0,21 г/т соответственно. К 2023 г. Русская медная компания планирует построить на месторождении горно-обогатительный комбинат мощностью переработки 56 млн т руды в год. Оператором освоения месторождения является ООО «Амур Минералс», которое стало входить в Группу «Русская медная компания» (информация с сайта: https://amurminerals.ru/).

Рудные образования Малмыжского месторождения всесторонне изучены с использованием самых современных аналитических методов и технологий [1–7; 11–14; 18; 19; 27].

Понийское потенциально рудное поле. Расположено в 50 км к северо-востоку от Малмыжского месторождения и принадлежит Пони-Мулинскому рудно-россыпному узлу, который, как и Малмыжское рудное поле, находится в центре Амурской части Журавлёвско-Амурского раннемелового террейна – турбидитового осадочного бассейна границы континент – океан, интрудированного гранитоидами позднего мела (см. рис. 1).

В геологическом строении Понийского потенциально рудного поля, в пределах которого выявлен целый ряд перспективных рудных объектов золото-кварцевого и золото-медно-порфирового геолого-промышленных типов, преобладают смятые в разномасштабные складки нижнемеловые песчано-алевролитовые и туфогенные образования горнопротокской свиты (апт-альб) с пластами туфопесчаников и конгломератов (рис. 3).

Стратифицированные терригенные и туфогенно-терригенные образования прорваны гранитоидами позднемелового (сеноманского) интрузивного комплекса. Породы *первой фазы* внедрения этого комплекса представлены гранитоидами и монцонитоидами Тудурского и Ходжарского массивов и ассоциирующими с ними поясами дайковых тел преимущественно среднего состава. *Второй фазе* внедрения комплекса принадлежат небольшие по размерам массивы овальной формы, а также дайко- и штокообразные интрузивные тела, сложенные диорит-порфирами, кварцевыми диорит-порфирами и монцодиорит-порфирами.

На рассматриваемой территории установлено проявление разнофациальных гидротермально-метасоматических образований, типичных как для месторождений золото-медно-порфирового, так и золото-кварцевого типов: кварц-биотит-калишпатовых, пиритсодержащих кварц-серицитовых и кварц-альбит-серицит-хлорит-карбонатных метасоматитов – филлизитов и березитов, монокварцитов, аргиллизитов и пропилитов хлорит-эпидотовой и актинолитовой фаций. В ореолах контактового воздействия интрузивных тел среди вмещающих их терригенно-осадочных и туфогенных пород нижнего мела получили широкое развитие процессы ороговикования.

Главное значение в размещении перечисленных выше гидротермалитов принадлежит массивам гранитоидов и монцонитоидов позднемелового возраста, а также разрывной тектонике. Ореолы гидротермально измененных пород, контролирующих проявление кварцево-прожилковой и реже кварцево-жильной рудной минерализации, как правило, наложены на участки повышенной трещиноватости пород, сопровождающие более крупные дизъюнктивные нарушения.

Такие участки повышенной проницаемости приурочены преимущественно к зоне Понийских разломов северо-восточного простирания, расположенной в междуречье Борхи Тонкая и Правая Мудадо, где они контролируют размещение минерализованных дайкообразных тел кварцевых диорит-порфиров, монцодиорит-порфиров

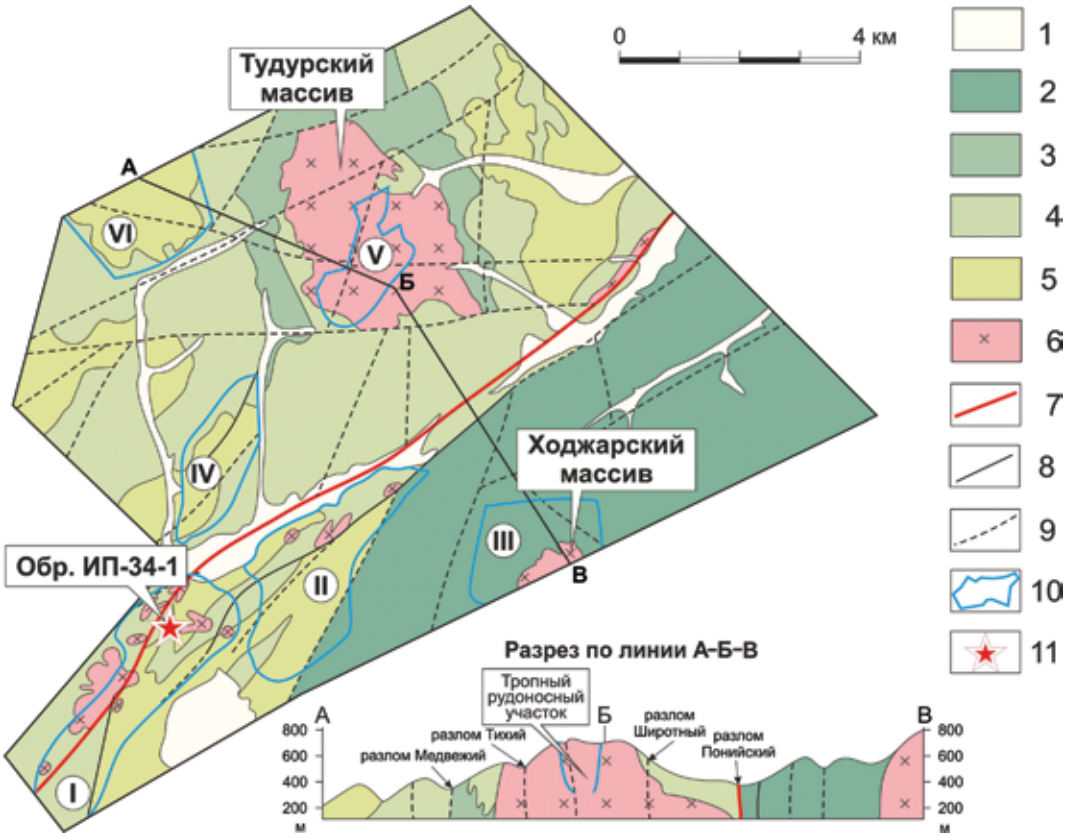

Рис. 3. Схема геологического строения Понийского потенциального рудного поля

1 – четвертичные аллювиальные и пролювиальные отложения; *2–5* – нижнемеловые терригенные отложения (горно-протокская свита): *2* – *нижняя толща*: алевролиты, алевропесчаники, глинистые сланцы, прослои туфопесчаников, *3–5* – *верхняя толща*: *3* – черные и темно-серые алевролиты с редкими прослоями песчаников, *4* – переслаивание алевролитов, песчаников и реже туфопесчаников, *5* – песчаники с прослоями алевролитов и линзами туфов андезидацитов, реже туфогравелитов); *6* – магматические образования позднемелового (сеноманского) возраста: монцониты, монцодиориты, кварцевые диориты, кварцевые монцодиорит-порфиры и диорит-порфиры; *7* – ось Понийской зоны разломов; *8*, *9* – тектонические нарушения (*8* – установленные, *9* – предполагаемые); *10* – рудоносные участки (римские цифры в кружочках: I – Медный и Грибной, II – Борхи Тонкая, III – Ходжар, IV – Базовый, V – Тропный, VI – Тихий); *11* – место отбора пробы на изотопно-геохронологические исследования

и кварцевых диоритов, вмещающих золото-медно-порфировое и золото-кварцевое оруденения. Это рудопроявления Грибное, Медное и Борхи Тонкая. Оруденение первого из них относится к золото-кварцевому, а двух остальных – к золото-медно-порфировому типам.

Кроме вышеперечисленных трех рудоносных участков на территории Понийского потенциально рудного поля выявлено еще несколько перспективных площадей (Ходжар, Базовый, Тропный и Тихий) с золото-медно-порфировой минерализацией.

Границы рудных тел установлены по результатам геохимического опробования. Главными рудными минералами этого прожилково-вкрапленного штокверкового оруденения являются пирит, пирротин, халькопирит, борнит и магнетит. Самородное золото в виде микровключений приурочено к выделениям пирита, халькопирита и магнетита в золото-сульфидно-магнетит-кварцевых прожилках.

На участках Медный и Грибной золотоносная сульфидная прожилково-вкрапленная минерализация приурочена к линейным (лентообразным) ореолам калишпатизации, серицит-кварцевого и серицит-альбит-кварцевого гидротермального изменения, унаследовавших северо-восточное направление сближенных в пространстве крутопадающих разрывных нарушений. В их пределах как магматические (Медный), так и осадочно-терригенные (Грибной) породы претерпели интенсивное рассланцевание, милонитизацию, брекчирование и катаклаз.

Понийское потенциально рудное поле – одно из самых перспективных площадей в Хабаровском крае на обнаружение промышленной рудной минерализации золото-медно-порфирового типа. По оценкам геологов АО «Росгеология», суммарные ресурсы золота только в пределах участков Грибной и Медный данной площади составляют свыше 99 т, а меди – 700 тыс. т при средних содержаниях металлов в рудах – 1,5 г/т и 1 % соответственно.

Результаты изотопного (U-Pb) датирования магматических пород. С целью определения радиологического возраста магматических образований Малмыжского и Понийского рудных полей

Таблица 1

Результаты изучения U-Pb изотопной системы акцессорных цирконов из интрузивных пород участка Северный Малмыжского рудного поля

Образец, зерно, кратер	$^{206}Pb_c$, %	Содержание, г/т			$^{232}Th/^{238}U$	Возраст (1), млн лет		Изотопные отношения (1)						КК
		U	Th	$^{206}Pb^*$		$^{206}Pb^*/^{238}U$		$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	± %	$^{207}Pb^*/^{235}U$	± %	$^{206}Pb^*/^{238}U$	± %	
ИМ-288														
3.1re	1,30	81	38	1,03	0,49	93,8	± 2,1	0,0408	18	0,0820	18	0,01465	2,2	0,125
1.1re	2,72	47	20	0,61	0,44	93,9	± 3,1	0,0480	30	0,0980	30	0,01467	3,3	0,108
11.1	1,61	72	45	0,94	0,65	95,3	± 2,3	0,0479	18	0,0980	19	0,01489	2,4	0,130
13.1	1,57	75	49	0,97	0,67	95,5	± 2,3	0,0437	20	0,0900	20	0,01492	2,4	0,121
2.1	1,81	66	26	0,87	0,40	96,2	± 3,0	0,0440	24	0,0910	24	0,01503	3,1	0,130
7.2	2,08	54	25	0,72	0,47	96,2	± 2,7	0,0460	24	0,0950	24	0,01503	2,9	0,118
6.1	1,48	77	47	1,01	0,64	96,9	± 2,3	0,0484	17	0,1010	17	0,01514	2,3	0,139
10.1	1,48	73	48	0,97	0,68	96,9	± 2,3	0,0447	18	0,0930	19	0,01515	2,4	0,128
14.1	0,67	175	135	2,30	0,80	97,2	± 1,8	0,0476	9,4	0,0997	9,6	0,01519	1,9	0,199
2.1re	2,24	49	17	0,66	0,35	97,4	± 2,7	0,0410	30	0,0860	31	0,01523	2,8	0,092
12.1	2,12	52	24	0,70	0,48	97,8	± 2,7	0,0440	26	0,0920	27	0,01528	2,7	0,103
9.1	1,28	89	56	1,19	0,64	98,1	± 2,2	0,0483	15	0,1020	15	0,01533	2,2	0,150
5.1	0,01	155	98	2,05	0,65	98,5	± 1,8	0,0482	4,3	0,1023	4,7	0,01539	1,9	0,402
8.1	1,47	75	32	1,02	0,44	98,7	± 2,3	0,0455	18	0,0970	18	0,01543	2,3	0,131
3.1	1,16	99	47	1,33	0,49	99,4	± 2,6	0,0496	14	0,1060	14	0,01554	2,6	0,183
1.1	1,90	61	37	0,84	0,62	101,2	± 3,2	0,0510	21	0,1120	21	0,01582	3,2	0,148
7.1	1,57	70	34	0,97	0,50	101,2	± 2,6	0,0440	19	0,0960	20	0,01582	2,6	0,131
4.1	0,18	482	433	8,43	0,93	129,7	± 2,1	0,0488	2,9	0,1368	3,3	0,02032	1,7	0,503
ИМ-2017Del														
7.1	4,49	45	25	0,61	0,57	95,3	± 4,0	0,0370	61	0,0770	61	0,01490	4,2	0,069
5.1re	0,01	126	94	1,63	0,77	96,4	± 1,8	0,0491	4,8	0,1019	5,2	0,01506	1,9	0,371
6.1	1,46	182	118	2,40	0,67	96,7	± 2,2	0,0390	19	0,0810	19	0,01511	2,3	0,120
2.1	1,36	87	60	1,16	0,71	97,7	± 2,6	0,0502	16	0,1060	16	0,01527	2,7	0,168
8.1	3,46	74	49	1,00	0,69	97,9	± 3,3	0,0380	45	0,0810	46	0,01530	3,4	0,075
14.1	3,76	54	25	0,75	0,48	98,2	± 3,7	0,0410	47	0,0860	47	0,01535	3,8	0,080
7.1re	3,23	34	18	0,46	0,55	98,9	± 3,3	0,0350	50	0,0740	50	0,01546	3,4	0,067
11.1	1,55	132	98	1,78	0,77	99,2	± 2,4	0,0377	21	0,0810	21	0,01551	2,4	0,115
1.1	2,55	45	21	0,62	0,48	99,5	± 3,6	0,0560	29	0,1200	29	0,01556	3,7	0,125
5.1	1,92	131	105	1,80	0,83	100,1	± 2,5	0,0387	25	0,0840	25	0,01566	2,6	0,101
13.1	2,13	97	71	1,35	0,75	100,9	± 3,0	0,0490	22	0,1060	23	0,01578	3,0	0,133
10.1	0,96	123	92	1,69	0,77	101,0	± 2,4	0,0425	14	0,0930	14	0,01579	2,4	0,174
3.1	2,07	56	32	0,78	0,60	101,2	± 3,3	0,0530	22	0,1150	23	0,01583	3,3	0,145
9.1	1,63	70	50	0,98	0,75	102,5	± 3,0	0,0454	21	0,1000	21	0,01603	2,9	0,140
6.1re	1,42	80	36	1,11	0,47	102,5	± 2,3	0,0479	16	0,1060	16	0,01603	2,3	0,139
15.1	1,29	85	68	1,19	0,83	102,5	± 2,7	0,0469	16	0,1040	16	0,01603	2,7	0,163
4.1	0,01	49	18	0,68	0,38	102,6	± 3,2	0,0519	9,5	0,1150	10	0,01604	3,1	0,310
12.1	1,70	103	34	1,71	0,34	120,9	± 3,1	0,0482	21	0,1260	21	0,01893	2,6	0,124

Примечание. Погрешности приведены на уровне 1δ. Pb_c и Pb* – свинец нерадиогенный и свинец радиогенный соответственно. (1) – скорректировано на измеренный нерадиогенный Pb. Погрешность калибровки по стандарту Temora 0,43 %. КК – коэффициент корреляции между ошибками определения изотопных отношений $^{206}Pb/^{238}U$ и $^{207}Pb/^{235}U$. Номера кратеров соответствуют номерам кратеров пробоотбора (диаметр 25 мкм) в цирконах на рис. 8.

Таблица 2

Результаты изучения U-Pb изотопной системы акцессорных цирконов (обр. ИП-34-1) из интрузивных пород участка Медный Понийского потенциально рудного поля

Зерно, кратер	$^{206}Pb_c$, %	Содержание, г/т			$^{232}Th/^{238}U$	Возраст (1), млн лет		Изотопные отношения (1)					КК
		U	Th	$^{206}Pb^*$		$^{206}Pb^*/^{238}U$	$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	±%	$^{207}Pb^*/^{235}U$	±%	$^{206}Pb^*/^{238}U$	±%	
1.1	0,29	3682	9920	46,6	2,78	**94,0**	**± 1,3**	–	–	0,0477	2,6	0,0966	3,0	0,01469	1,4	0,457
1.2	0,01	3078	8694	37,7	2,92	**91,2**	**± 1,2**	–	–	0,0480	1,4	0,0944	1,9	0,01425	1,4	0,702
3.1	0,05	2356	5233	29,3	2,30	**92,5**	**± 1,2**	–	–	0,0479	2,4	0,0954	2,7	0,01445	1,4	0,495
6.1	1,52	131	96	1,73	0,75	**96,8**	**± 2,4**	–	–	0,0478	16,0	0,1000	17,0	0,01512	2,5	0,151
6.2	2,08	118	79	1,49	0,69	**92,4**	**± 2,3**	–	–	0,0480	22,0	0,0950	22,0	0,01443	2,5	0,113
8.1	1,12	100	44	1,34	0,45	**98,1**	**± 2,4**	–	–	0,0495	15,0	0,1050	15,0	0,01533	2,4	0,162
8.2	1,79	142	111	1,82	0,80	**93,7**	**± 2,2**	–	–	0,0452	20,0	0,0910	20,0	0,01464	2,4	0,118
5.1	0,01	1120	450	28,6	0,42	**189,0**	**± 2,5**	–	–	0,0498	1,5	0,2044	2,0	0,02976	1,4	0,682
5.2	0,01	2141	826	54,2	0,40	**187,1**	**± 2,5**	–	–	0,0499	1,1	0,2026	1,7	0,02944	1,3	0,774
4.1	0,09	599	73	177,0	0,13	**1901**	**± 22**	**1833**	± 9	0,1120	0,5	5,2980	1,4	0,34300	1,3	0,935
7.1	0,83	253	21	102,0	0,09	**2460**	**± 28**	**2635**	± 10	0,1781	0,6	11,4100	1,5	0,46470	1,4	0,913
7.2	0,08	90	63	42,4	0,73	**2810**	**± 34**	**2841**	± 12	0,2019	0,7	15,2100	1,7	0,54650	1,5	0,901

Примечание. См. примеч. к табл. 1. Номера кратеров соответствуют номерам кратеров пробоотбора (диаметр 25 мкм) в цирконах на рис. 9.

в настоящей работе было использовано три представительных образца плутонитов массой 2–3 кг каждый. В процессе изотопно-геохронологических исследований в ЦИИ ВСЕГЕИ методом U-Pb датирования изучались монофракции акцессорных цирконов, возраст которых определялся локальным U-Pb методом на вторично-ионном микрозонде SIMS SHRIMP II по стандартной методике [28].

Всего было проведено 49 локальных изотопных анализов в однородных, свободных от включений и трещин участках хорошо сохранившихся кристаллов циркона. Результаты датирования приведены в табл. 1 и 2.

Из магматических пород Малмыжского рудного поля были проанализированы образцы ИМ-288 и ИМ-2017Del, характеризующие гранитоиды северо-восточной части Боккинского массива в пределах Северного рудоносного участка.

Образец ИМ-288 отобран из керна скв. № 081 с глубины 288 м. Он представляет собой среднекристаллический биотит-роговообманковый порфировидный кварцевый диорит. Порода состоит на 10–15 % из кварца, 35–40 % – основного плагиоклаза (андезина), 15–20 % – биотита и роговой обманки и 20–25 % – новообразованных минералов стадии пропилитизации-березитизации. Как показано на рис. 4, темноцветные минералы исходной породы, биотит и роговая обманка, практически полностью замещены агрегатными псевдоморфозами хлорит-карбонатного и хлорит-эпидотового состава, к которым нередко приурочены микровключения пирита, халькопирита и магнетита. Идиоморфные кристаллы андезина серицитизированы. Порода незначительно минерализована за счет проявления коротко-прожилковых обособлений и вкрапленности пирит-халькопиритового и магнетит-халькопирит-пиритового состава, что сказалось на повышенных содержаниях некоторых элементов – меди, серебра и др. (табл. 3).

Образец ИМ-2017Del отобран из элювиально-делювиальных глыбовых развалов гранитоидов северо-восточной части Боккинского массива. По данным микроскопического изучения прозрачно-полированных шлифов, образец представляет собой среднекристаллический равномерно-зернистый биотит-роговообманковый клинопироксенсодержащий диорит, состоящий на 5–10 % из кварца, 45–50 % – основного плагиоклаза (андезина), 15–20 % – биотита и роговой обманки, 2–5 % – клинопироксена и 10–15 % – новообразованных минералов стадии пропилитизации. Как и в предыдущем случае, темноцветные минералы породы (особенно биотит) псевдоморфно замещены хлоритом, эпидотом, пренитом и кальцитом. Плагиоклаз же подвержен слабой серицитизации и карбонатизации (рис. 5).

Из магматических пород Понийского рудного поля был проанализирован образец под номером ИП-34-1 из дайкового тела монцонитоидов, вскрытого канавой 34 на фланге Медного рудоносного участка.

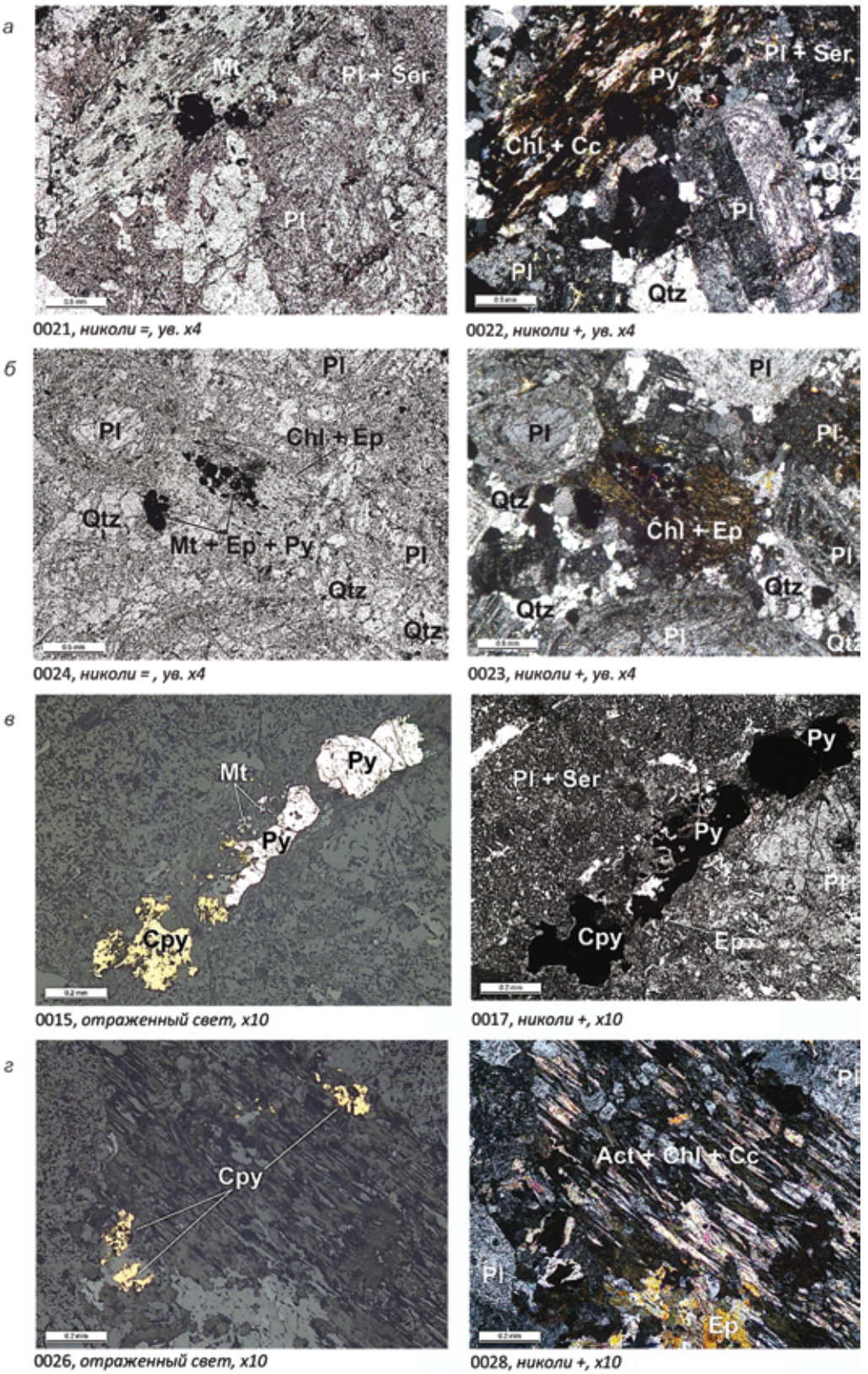

Рис. 4. Микрофотографии (обр. ИМ-288) прозрачно-полированных шлифов, характеризующих особенности строения (*а, б*) средне-кристаллических биотит-роговообманковых порфировидных кварцевых диоритов и проявление в них рудной пирит-халькопиритовой минерализации (*в, г*)

а – замещение роговой обманки агрегатной псевдоморфозой хлорит-карбонатного состава среди серицитизированных зерен плагиоклаза; *б* – замещение биотита хлоритом и эпидотом, к выделениям которого приурочены микровключения магнетита и пирита; *в* – коротко-прожилковое обособление пирит-халькопиритового состава на границе порфирового выделения плагиоклаза с мелкокристаллической кварц-полевошпатовой основной массой; *г* – приуроченность микровключений халькопирита к периферии зерна роговой обманки, замещаемой агрегатной псевдоморфозой эпидот-актинолит-хлорит-карбонатного состава. *На рис. 4–6:* Act – актинолит, Cc – карбонатит, Chl – хлорит, Cpy – халькопирит, Cpx – клинопироксен, Ep – эпидот, Hb – роговая обманка, Kfs – калиевый полевой шпат, Mt – магнетит, Pl – плагиоклаз, Prh – пренит, Py – пирит, Qtz – кварц, Ser – серицит

Таблица 3

Содержания петрогенных и малых элементов в интрузивных породах Малмыжского (участок Северный) и Понийского (участок Медный) рудных полей

Компонент	Номер образца			Предел обнаружения
	ИП-34-1	ИМ-288	ИМ-2017Del	
SiO_2, %	54,30	63,40	58,20	0,02
Al_2O_3	19,60	15,70	19,90	0,05
TiO_2	0,47	0,40	0,39	0,01
$Fe_2O_{3\ общ}$	7,11	6,78	4,78	0,01
MnO	0,19	0,14	0,24	0,01
MgO	2,63	1,88	1,90	0,10
CaO	6,16	6,12	8,32	0,01
Na_2O	3,72	2,65	3,15	0,10
K_2O	2,75	0,59	0,95	0,01
P_2O_5	0,31	0,11	0,13	0,05
п.п.п.	2,64	2,11	1,53	0,10
Сумма	99,80	99,90	99,60	
Fe_2O_3	3,50	3,74	2,73	0,30
FeO	3,26	2,74	1,85	0,25
K_2O+Na_2O	6,47	3,24	4,10	
K_2O/Na_2O	0,74	0,22	0,30	
Sc, г/т	8,4	7,2	9,9	0,2
V	183	94	98	2,5
Cr	3,1	20,2	3,4	1,0
Ni	2,4	1,6	1,4	1,0
Co	12,8	6,2	6,5	0,5
Pd	0,04	0,02	0,028	0,002
Pt	< 0,002	0,003	< 0,002	0,002
Au	< 0,002	0,030	0,004	0,002
Ag	0,07	0,63	0,12	0,01
Cu	90	1280	83	1,0
Pb	9	7	28	1,0
Zn	84	84	129	1,0
Sb	0,31	0,57	0,84	0,1
Re	< 0,005	0,0083	< 0,005	0,005
Bi	< 0,1	< 0,1	0,2	0,1
Li	30	8	3	1,0

Компонент	Номер образца			Предел обнаружения
	ИП-34-1	ИМ-288	ИМ-2017Del	
Rb, г/т	95	16	18	2,0
Ba	950	190	260	50
Sr	716	265	426	1,0
Zr	59	56	82	0,5
Hf	1,70	1,60	2,20	0,01
Ta	0,5	0,4	0,5	0,1
Nb	4,3	3,2	4,1	0,5
Th	5,7	2,2	3,1	0,1
U	1,6	0,6	0,9	0,1
Mo	0,7	2,9	< 0,6	0,6
W	0,6	0,6	0,6	0,5
Sn	1,1	1,0	0,8	0,2
Be	1,1	< 1,0	< 1,0	1,0
Y	14,4	13,2	14,9	0,1
La	20,30	9,99	12,00	0,01
Ce	40,20	20,10	26,40	0,01
Pr	4,33	2,38	3,26	0,01
Nd	16,20	9,80	13,00	0,01
LREE	81,03	42,27	54,66	
Sm	2,90	2,05	2,48	0,005
Eu	1,05	0,68	0,81	0,005
Gd	2,89	2,28	2,51	0,01
Tb	0,44	0,37	0,45	0,005
Dy	2,41	2,14	2,36	0,01
Ho	0,49	0,46	0,49	0,005
MREE	10,18	7,98	9,10	
Er	1,50	1,54	1,57	0,01
Tm	0,26	0,27	0,28	0,005
Yb	1,42	1,45	1,62	0,01
Lu	0,22	0,27	0,27	0,005
HREE	3,40	3,53	3,74	
∑REE	94,61	53,78	67,50	

Примечание. Обр. ИП-34-1 – монцодиорит-порфир (участок Пони), образцы ИМ-2017Del и ИМ-288 – равномерно-зернистые диориты и порфировидные кварцевые диориты (Малмыжское рудное поле).

Образец ИП-34-1. По данным проведенного микроскопического анализа – это мелкокристаллический клинопироксен-роговообманковый биотитсодержащий монцодиорит-порфир, состоящий из кварца (3–5 %), основного плагиоклаза (30–35 %), калиевого полевого шпата (10–15 %), клинопироксена (10–15 %), биотита и роговой обманки (10–15 %) и новообразованных минералов (10–15 %) стадии пропилитизации – эпидот, хлорит, пренит, кварц, серицит и кальцит (рис. 6). На долю порфировых выделений, представленных плагиоклазом, клинопироксеном и роговой обманкой, приходится до 40–45 %, а на долю основной массы, сложенной мелкокристаллическим агрегатом плагиоклаза, калиевого полевого шпата, кварца и биотита, – 50–55 % объема породы.

Проанализированные монофракции цирконов представлены желтоватыми, коричневыми, серыми, рыжими, мутноватыми, прозрачными и полупрозрачными удлиненно-призматическими и редко как бы окатанными (ксеногенными) зернами и обломками кристаллов размером от 40 до 250 мкм. На катодолюминесцентных изображениях зерна циркона имеют слабое свечение с серыми и темными участками, а также с каймами обрастания и следами тонкой зональности. Некоторые зерна обладают секториальной зональностью и пористой структурой. В отдельных зернах наблюдаются признаки перекристаллизации. При этом некоторые зерна захвачены этим процессом практически полностью.

В результате выполненных исследований было установлено:

1) Радиологический U-Pb возраст магматической кристаллизации пород северо-восточного фланга Малмыжского рудного поля

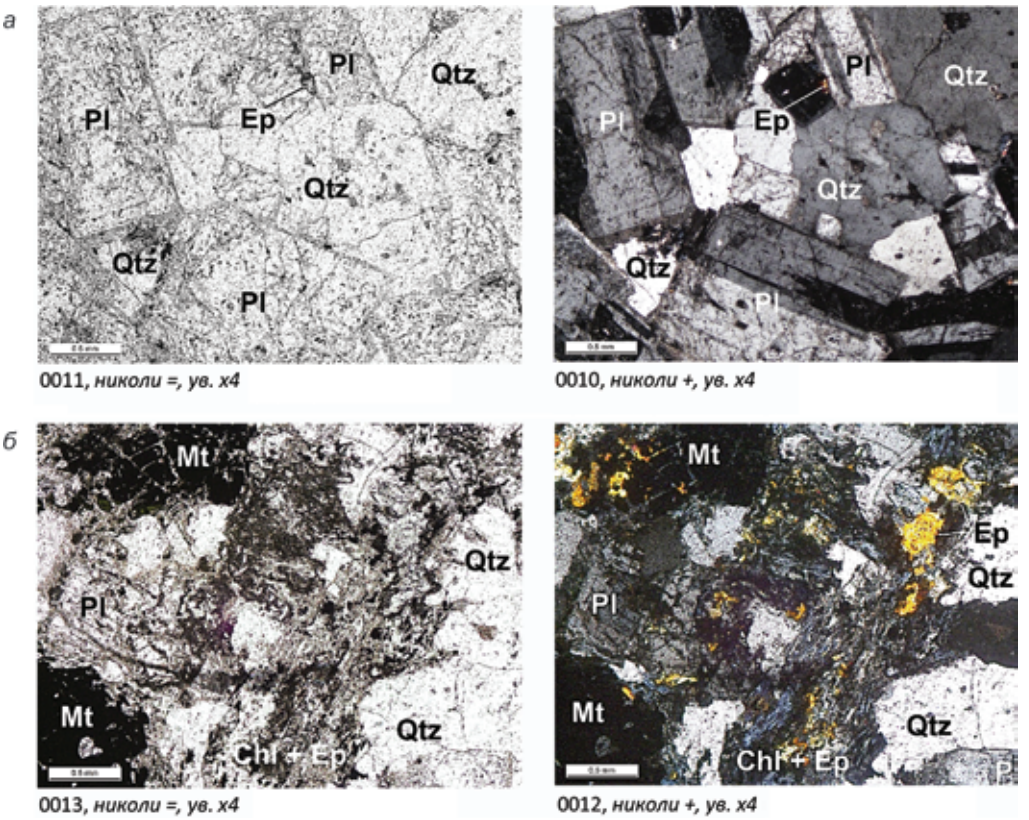

Рис. 5. Микрофотографии (обр. ИМ-2017Del) прозрачно-полированных шлифов, характеризующих особенности строения среднекристаллических биотит-роговообманковых клинопироксенсодержащих диоритов

а – общий вид породы; *б* – замещение биотита хлоритом и эпидотом

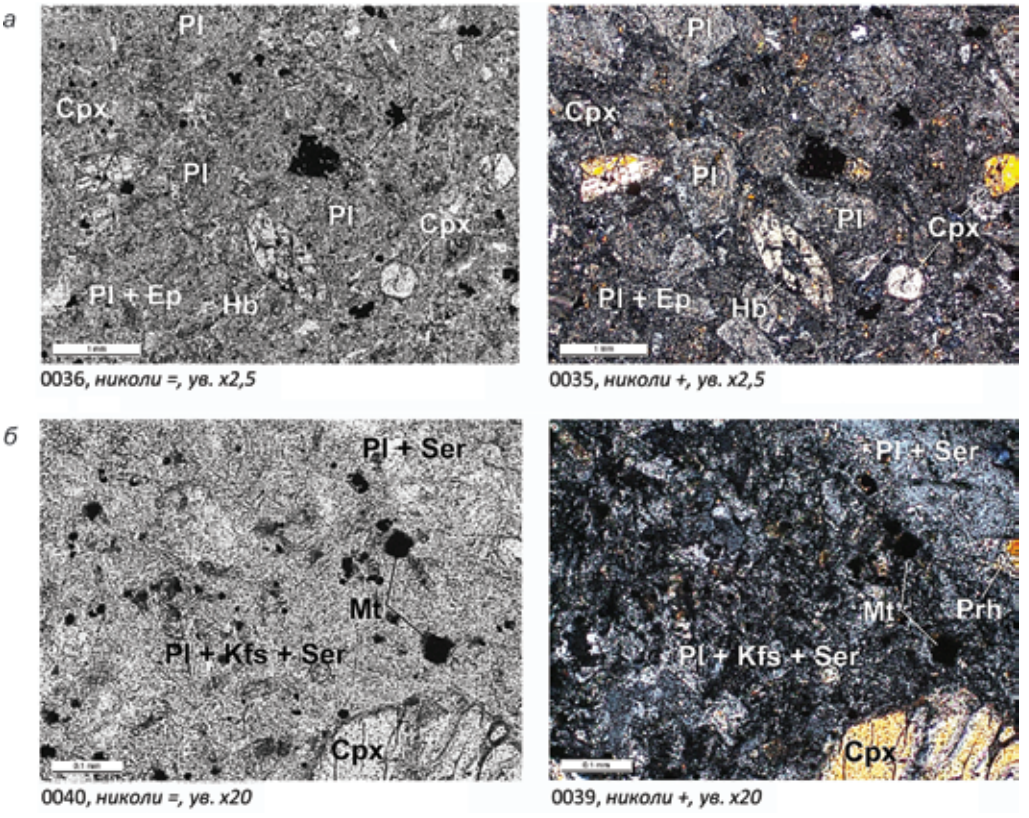

Рис. 6. Микрофотографии (обр. ИП-34-1) прозрачно-полированных шлифов, характеризующих особенности строения мелкокристаллических клинопироксен-роговообманковых биотитсодержащих монцодиорит-порфиров

а – общий вид породы; *б* – особенности строения мелкокристаллической основной массы породы, представленной тонким срастанием ксеноморфных зерен калиевого полевого шпата с более идиоморфными кристаллами серицитизированного плагиоклаза

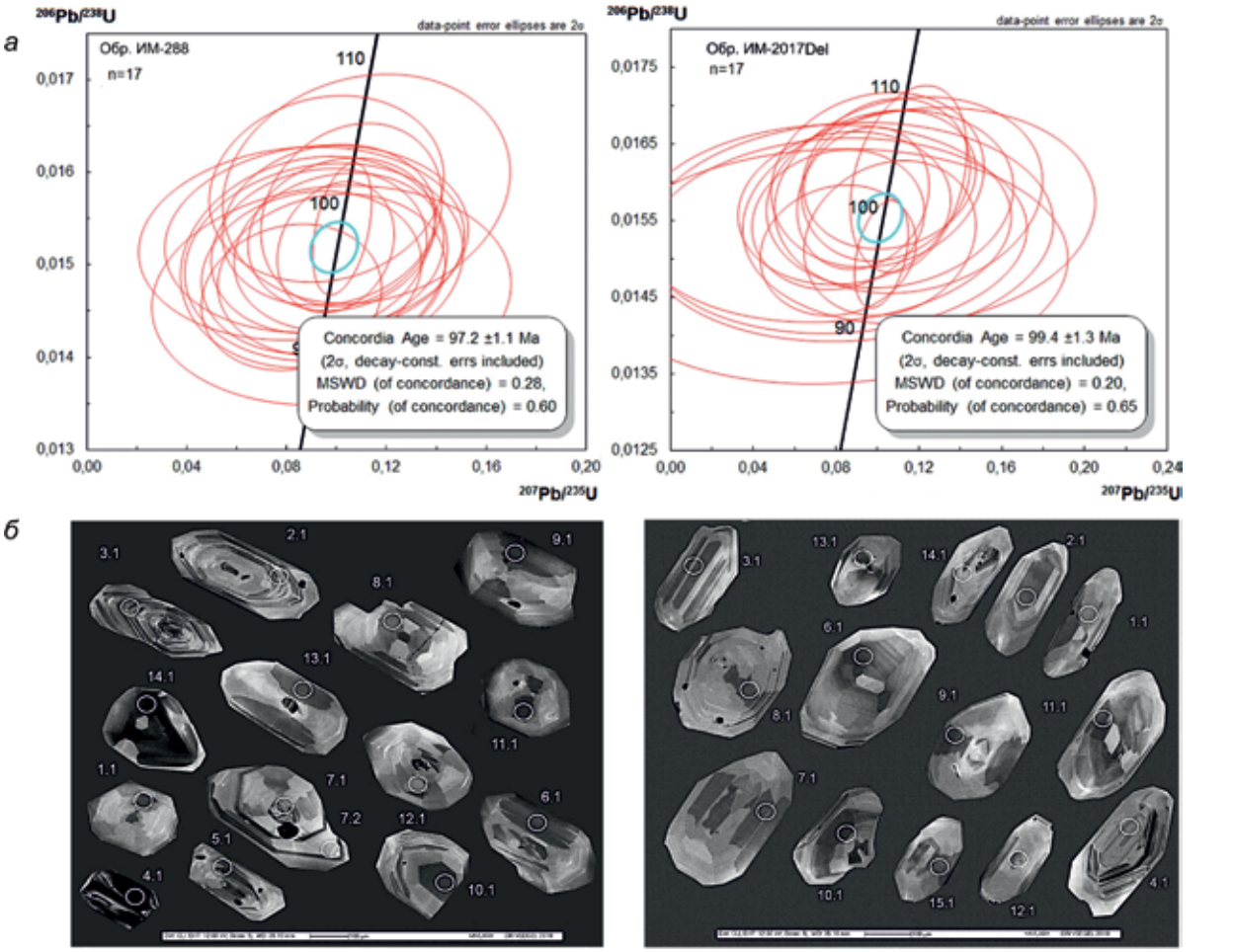

Рис. 7. Результаты U-Pb датирования интрузивных пород участка Северный Малмыжского рудного поля на примере образцов ИМ-288 и ИМ-2017Del

а – $^{206}Pb/^{238}U$ – $^{207}Pb/^{235}U$ диаграммы с конкордиями для цирконов из диоритов и кварцевых диоритов, характеризующих возраст магматической кристаллизации пород; *б* – катодолюминесцентные изображения изученных зерен цирконов с местоположением точек измерений

оценивается интервалом 97–99 млн лет (рис. 7, табл. 1). Порфировидные биотит-роговообманковые кварцевые диориты (обр. ИМ-288) показали радиологический возраст в 97,2 ± 1,1 млн лет, а равномерно-зернистые биотит-роговообманковые клинопироксенсодержащие диориты (обр. ИМ-2017Del) – 99,4 ± 1,3 млн лет.

2) Радиологический U-Pb возраст кристаллизации пород юго-западной части Понийского рудного поля на примере дайкового тела клинопироксен-роговообманковых биотитсодержащих монцодиорит-порфиров (обр. ИП-34-1) оценивается значением в 93,3 ± 1,2 млн лет (рис. 8, табл. 2).

3) В магматических породах как Малмыжского, так и Понийского рудного поля, наряду с автохтонными кристаллами цирконов, выявлены и захваченные аллохтонные (ксеногенные) кристаллы цирконов, характеризующие процесс контаминации гранитоидного и монцонитоидного расплавов веществом вмещающих терригенных и туфогенных пород нижнего мела. Морфологически эти аллохтонные цирконы представляют собой окатанные короткопризматические кристаллы, чаще обломки неправильной формы с темными включениями. Спектр возрастов изученных аллохтонных (ксеногенных) цирконов варьирует в широких пределах от архея до мезозоя включительно.

Основная же часть аллохтонных (ксеногенных) цирконов из диоритов и кварцевых диоритов Малмыжского рудного поля датирована 120–130 млн лет, что соответствует возрасту вмещающих туфогенно-терригенных пород ларгасинской свиты нижнего мела.

Монцодиорит-порфиры Понийского рудного поля в этом отношении существенно отличаются от магматических пород Малмыжского месторождения. Установленные в них многочисленные аллохтонные цирконы показали более широкий разброс в значениях радиологического возраста – от 188 млн лет до 2,8 млрд лет, что отвечает диапазону от нижней юры до мезоархея. Скорее всего, это свидетельствует о более широком возрастном спектре пород областей сноса обломочного материала при формировании терригенных

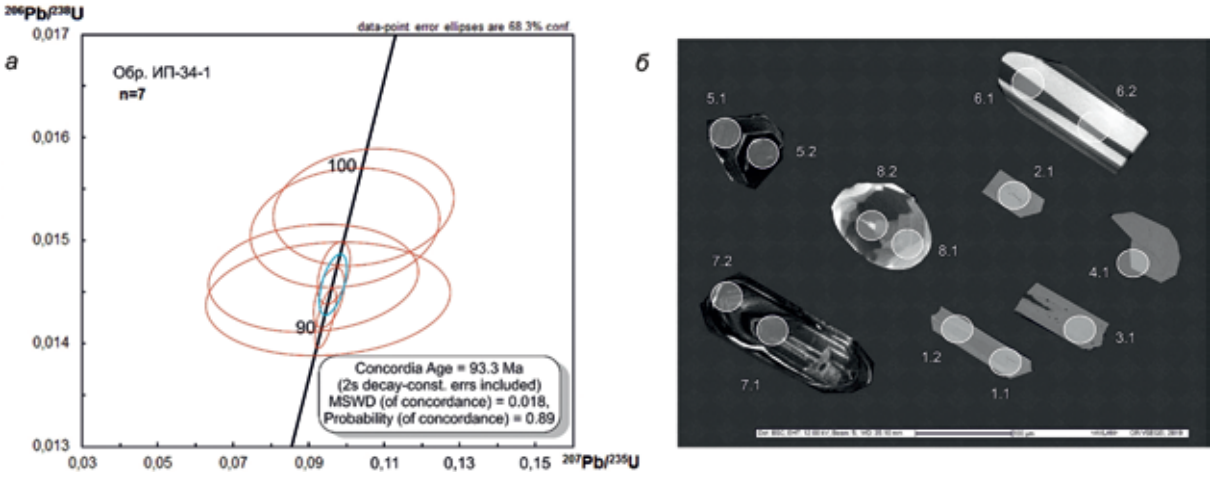

Рис. 8. Результаты U-Pb датирования интрузивных пород участка Медный Понийского потенциального рудного поля на примере обр. ИП-34-1

а – $^{206}Pb/^{238}U$ – $^{207}Pb/^{235}U$ диаграмма с конкордиями для цирконов из монцодиорит-порфиров, характеризующих возраст магматической кристаллизации породы; *б* – катодолюминесцентные изображения изученных зерен цирконов с местоположением точек измерений

и туфогенно-терригенных пород горнопротокской свиты нижнего мела, веществом которых были контаминированы гранитоидные и монцонитоидные расплавы при внедрении в данную часть земной коры Журавлёвско-Амурского террейна.

Обсуждение результатов исследования. Результаты проведенных изотопно-геохронологических исследований магматических пород Малмыжского и Понийского рудных полей указывают на весьма близкий – сеноманский радиологический возраст их кристаллизации: 97–99 и 93 млн лет соответственно. Это свидетельствуют о том, что магматические породы данных рудных полей были сформированы в рамках одного достаточно короткого по времени (4–6 млн лет) этапа проявления интрузивной магматической деятельности в пределах Журавлёвско-Амурского террейна раннемелового турбидитового осадочного бассейна.

На рис. 9–11 приведены материалы, иллюстрирующие положение состава изученных образцов магматических пород этих рудных полей на петрохимических TAS [$(Na_2O + K_2O) – SiO_2$] и $CaO/(Na_2O + K_2O + CaO) – Al_2O_3/(Na_2O + K_2O + CaO)$, а также вариационных диаграммах $Fe_2O_3/FeO – SiO_2$ и Sr/Y – Y. Для сравнения на них вынесены фигуративные точки усредненных составов рудовмещающих интрузивных пород большинства ведущих порфировых месторождений мира.

Сравнительный анализ изученных образцов магматических пород как друг с другом, так и с рудоносными магматическими породами ведущих порфировых месторождений мира позволил сделать ряд выводов генетического, геодинамического и прогнозно-минерагенического характера.

1. Петрогеохимически изученные образцы малмыжских кремнекислых пород заметно отличаются от отобранных в пределах Понийского рудного поля (рис. 9, *а*). Если понийские магматические породы относятся к монцонитоидной серии и характеризуются повышенной щелочностью ($Na_2O + K_2O = 6,47$ %) при незначительном преобладании натрия над калием ($K_2O/Na_2O = 0,74$), то малмыжские гранитоиды принадлежат известково-щелочной серии гранитоидов, отличаясь нормальной щелочностью ($Na_2O + K_2O =$ = 3–4 %) при резком преобладании натрия над калием (K_2O/Na_2O = 0,2–0,3). Такие различия петрохимического состава изученных образцов магматических пород не могли не сказаться и на их геохимической специализации. Так, более калиевые монцонитоиды Понийского рудного поля значительно обогащены по сравнению с малмыжскими гранитоидами барием, рубидием, литием, стронцием, торием, ураном, оловом и суммой редкоземельных элементов.

2. На петрохимической диаграмме $CaO/[Na_2O + K_2O + CaO] – Al_2O_3/[Na_2O + K_2O + CaO]$ фигуративные точки состава изученных образцов располагаются в поле умеренно глиноземистых пород на границе с их сильноглиноземистыми разностями (рис. 9, *б*). Будучи близкими друг другу по этому показателю, они практически не отличаются от гранитоидов и монцонитоидов большинства ведущих порфировых месторождений мира. Скорее всего, все это указывает на проявление процессов контаминации магматических расплавов веществом вмещающих высокоглиноземистых осадочно-терригенных пород Журавлёвско-Амурского террейна.

3. На вариационной диаграмме $Fe_2O_3/FeO – SiO_2$ фигуративные точки состава характеризуемых образцов группируются в поле золото-медно-порфировых и медно-порфировых месторождений, связанных с проявлением гранитоидного магматизма магнетитовой серии (рис. 10). В этом отношении гранитоиды и монцонитоиды

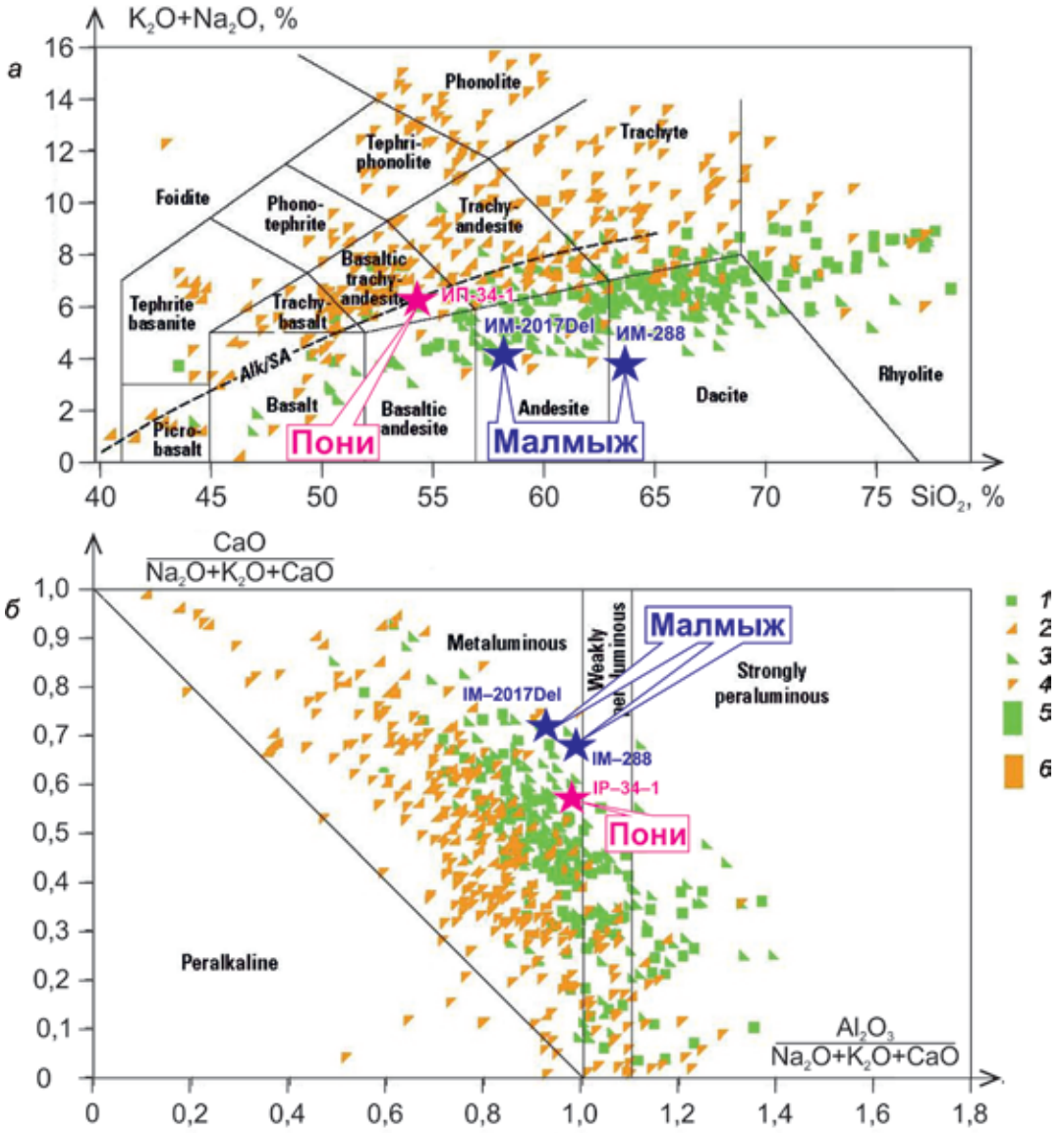

Рис. 9. Положение состава изученных образцов магматических пород Малмыжского и Понийского рудных полей на петрохимических диаграммах, на которых для сравнения вынесены фигуративные точки составов рудовмещающих интрузивных пород большинства ведущих Au-Cu-, Au-Cu-Mo- и Cu-Mo-порфировых месторождений мира (по [22, Fig. 3] с дополнениями авторов)

а – TAS [(Na_2O + K_2O) – SiO_2]; *б* – CaO/(Na_2O + K_2O + CaO) – Al_2O_3/(Na_2O + K_2O + CaO). *Состав порфировых интрузивов: 1* – кварцево-монцодиорит-гранитовый Cu-(Mo); *2* – монцонитовый Cu-(Mo-Au); *3* – тоналит-гранодиоритовый Cu-(Au-Mo); *4* – сиенитовый Cu-(Au); *5* – габбродиоритовый; *6* – щелочно-сиенитовый

Малмыжского и Понийского рудных полей практически не отличаются как друг от друга, так и от магматических пород большинства порфировых месторождений мира.

4. На вариационной диаграмме Sr/Y – Y фигуративные точки состава данных образцов дислоцировались в области адакитовых магматических пород порфировых месторождений Китая, Центральной Азии и Ирана, внутри нее малмыжские гранитоиды расположились в поле Южного Тибета, а понийские монцонитоиды – в поле Восточно-Тибетских порфировых месторождений (рис. 11).

По этому показателю и уровню повышенной глиноземистости из всего многообразия порфировых месторождений мира изученные магматические породы Журавлёвско-Амурского террейна сопоставимы только со синсдвиговыми интрузивными породами территории китайского Тибета, где в последние годы была открыта серия золото-медно-молибден-порфировых месторождений, связанных с проявлениями высокоглиноземистого адакитового гранитоидного магматизма [20–22; 24; 25; 29].

Полученные результаты исследования важны для решения проблем прогнозирования и оценки золото-медно-порфирового оруденения не только на территории Сихотэ-Алиня, но и в пределах всего Дальневосточного региона России.

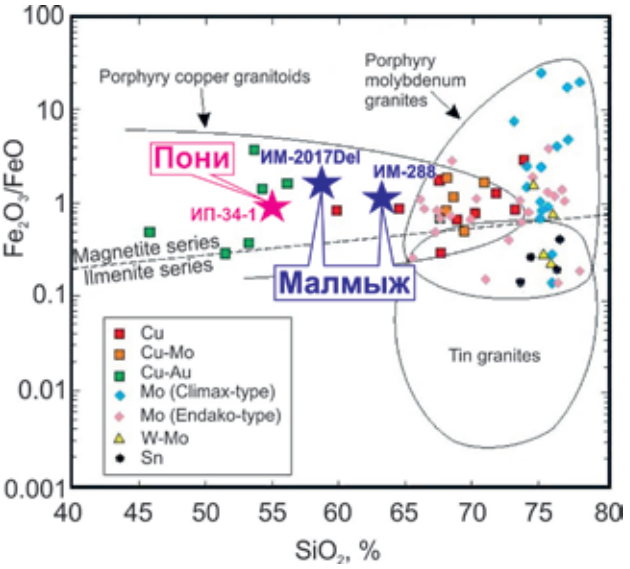

Рис. 10. Положение состава изученных образцов магматических пород Малмыжского и Понийского рудных полей на вариационной диаграмме Fe_2O_3/FeO – SiO_2 [26, Fig. 12], на которой для сравнения вынесены фигуративные точки усредненных составов рудовмещающих интрузивных пород некоторых ведущих Cu-, Au-Cu-, Au-Cu-Mo-, Mo-, W-Mo- и Sn-порфировых месторождений мира

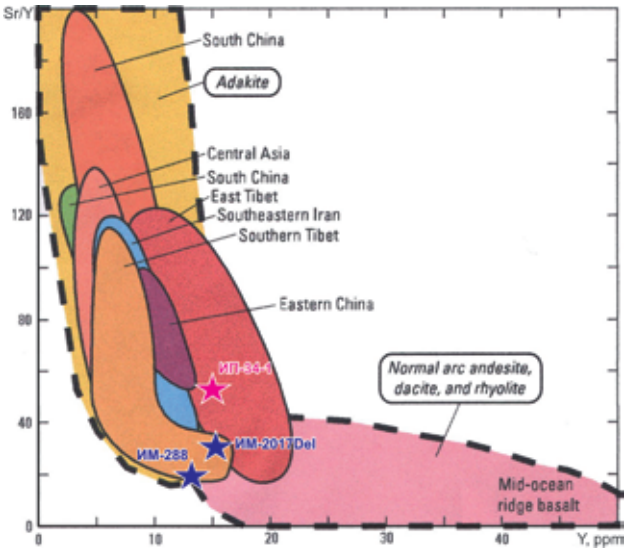

Рис. 11. Положение состава изученных образцов магматических пород Малмыжского и Понийского рудных полей на диаграмме Sr/Y – Y [22, Fig. 4], на которой для сравнения вынесены поля усредненных составов рудовмещающих интрузивных пород некоторых Cu- и Au-Cu-порфировых месторождений Азиатского региона (Китай, Центральная Азия, Иран)

Авторы выражают благодарность ведущему инженеру отдела прогнозной и геолого-экономической оценки месторождений полезных ископаемых ВСЕГЕИ Т. В. Бузковой за оказанную техническую помощь в подготовке и оформлении иллюстраций к данной статье.

1. Буханова Д. С. Минералогические особенности руд золото-медно-порфирового месторождения Малмыжское, Нижнее Приамурье // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит. – 2016. – С. 281–284.

2. Буханова Д. С., Плечов П. Ю. Условия формирования Au-Cu-порфирового месторождения Малмыжское, Хабаровский край (по данным исследования флюидных включений) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. – 2017. – № 34 (2). – С. 61–71.

3. Буханова Д. С. Первые данные о возрасте Малмыжского золото-медно-порфирового месторождения, Хабаровский край // Новое в познании процессов рудообразования: Материалы VIII Рос. молодеж. науч.-практ. школы. – М., 2018. – С. 81–82.

4. Гурман М. А., Полтарецкая А. Е. Технологические исследования первичных медно-порфировых руд Малмыжского месторождения // Проблемы недропользования. – 2019. – № 2. – С. 94–100.

5. Иванов В. В., Кононов В. В., Игнатьев Е. К. Минералого-геохимические особенности рудной минерализации в метасоматитах золото-медного рудного поля Малмыж (Нижнее Приамурье) // Тектоника, глубинное строение и минерагения Востока Азии: VIII Косыгинские чтения. – Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН. – 2013. – С. 258–261.

6. Крюков В. Г. Типоморфные минералы зоны окисления золото-медно-порфировых руд Малмыжского месторождения (участок Свобода) / В. Г. Крюков, Н. А. Лаврик, Н. М. Литвинова, В. Ф. Степанова // Георесурсы. – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 91–98.

7. Малышев Ю. Ф. Глубинное строение и перспективы поисков крупных и сверхкрупных месторождений на Дальнем Востоке / Ю. Ф. Малышев, М. В. Горошко, С. М. Родионов, Н. П. Романовский // Крупные и сверхкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования. – М.: ИГЕМ РАН. – 2005. – С. 423–430.

8. Медно-порфировые месторождения / А. И. Кривцов, В. С. Звездов, И. Ф. Мигачев, О. В. Минина. – М.: Изд-во ЦНИГРИ, 2001. – 232 с.

9. Петров О. В. Государственное геологическое картографирование – эффективный путь к открытию месторождений-лидеров / О. В. Петров, Е. А. Киселёв, А. Ф. Морозов, В. И. Шпикерман, Т. Н. Зубова, В. В. Шатов, Ю. П. Змиевский // Региональная геология и металлогения. – 2015. – № 64. – С. 5–10.

10. Петров О. В. Прогноз размещения месторождений золото-медно-порфирового типа в вулкано-плутонических поясах восточных районов России по результатам работ составления листов Госгеолкарты-1000/3 / О. В. Петров, Е. А. Киселёв, В. И. Шпикерман, Ю. П. Змиевский // Региональная геология и металлогения. – 2019. – № 80. – С. 50–74.

11. Прохоров К. В., Бурдонов А. Е. Хлорид-гипохлоритное выщелачивание золота из окисленных руд Малмыжского месторождения // Горный журнал. – 2018. – № 10. – С. 62–66.

12. Рязанова Е. И. Новейшее открытие Дальнего Востока России – золото-медно-порфировое месторождение Малмыж // Геология в развивающемся мире. – 2015. – С. 52–55.

13. Рязанова Е. И. Пространственное распределение природных типов руд на месторождении Малмыж // Геология в развивающемся мире. – 2017. – С. 37–39.

14. Секисов А. Г. Геохимические особенности руд зоны окисления медно-золоторудного месторождения Малмыж и результаты их геотехнологического тестирования / А. Г. Секисов, В. В. Иванов, А. А. Рассказова, Е. К. Игнатьев // Горный журнал. – 2018. – № 10. – С. 30–35.

15. Ханчук А. И. Палеогеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока

России // Рудные месторождения континентальных окраин. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – С. 5–34.

16. Ханчук А. И., Гребенников А. В., Иванов В. В. Альб-сеноманский окраинно-континентальный орогенный пояс и магматическая провинция Тихоокеанской Азии // Тихоокеанская геология. – 2019. – Т. 38, № 3. – С. 4–37.

17. Ханчук А. И. Альб-сеноманский магматизм и медный рудогенез Сихотэ-Алиня / А. И. Ханчук, В. В. Иванов, Е. К. Игнатьев, С. В. Коваленко, Д. В. Семенова // Докл. РАН. – 2019. – Т. 488, № 3. – С. 69–73.

18. Читалин А. Ф. Малмыж – новая крупная золото-медно-порфировая система мирового класса на Сихотэ-Алине / А. Ф. Читалин, А. А. Ефимов, К. И. Воскресенский, Е. К. Игнатьев, А. Г. Колесников // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. – 2013. – № 3. – С. 65–69.

19. Шашорин Б. Н. Геолого-геофизическая модель Малмыжской рудно-магматической системы и возможности ее использования в прогнозировании (Сихотэ-Алинь) / Б. Н. Шашорин, Ф. И. Макаров, В. В. Руднев, Д. Е. Выдрич // Разведка и охрана недр. – 2018. – № 2. – С. 9–16.

20. Hou Z. Q. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: produced by large-scale strike-slip faulting at Eastern Tibet / Z. Q. Hou, H. W. Ma, K. Zaw, Y. Q. Zhang, M. J. Wang, Z. Wang, G. T. Pan, R. L. Tang // Economic Geology. – 2003. – Vol. 98. – Pp. 125–145.

21. Hou Z. Q. Re-Os age for molybdenites from the Gangdese porphyry copper belt in the Tibetan plateau: implication to mineralization duration and geodynamic setting / Z. Q. Hou, X. M. Qu, S. X. Wang, A. D. Du, Y. F. Gao // Science China. – 2004. – Vol. 47. – Pp. 221–231.

22. John D. A. Porphyry copper deposit model / D. A. John, R. A. Ayuso, M. D. Barton, R. J. Blakely, R. J. Bodnar, J. H. Dilles, F. Gray et al. // Scientific Investigations Report 2010-5070-B, U. S. Geological Survey. – Reston, Virginia. – 2010. – 169 p.

23. Lowell J. D., Guilbert J. M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits // Economic Geology. – 1970. – Vol. 65, N 4. – Pp. 373–408.

24. Muller D., Groves D. I. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization. – Springer, 2016. – 311 p.

25. Sillitoe R. H. Porphyry copper systems // Economic Geology. – 2010. – Vol. 105, N 1. – Pp. 3–41.

26. Sinclair W. D. Porphyry deposits // Mineral deposits of Canada: Geological Association of Canada Special Publication 5. – 2007. – Pp. 223–243.

27. Soloviev S. G. The superlarge Malmyzh porphyry Cu-Au deposit, Sikhote-Alin, eastern Russia: Igneous geochemistry, hydrothermal alteration, mineralization, and fluid inclusion characteristics / S. G. Soloviev, S. G. Kryazhev, S. S. Dvurechinskaya, V. E. Vasyukov, D. A. Shumilin, K. I. Voskresensky // Ore Geology Reviews. – 2019. – Vol. 113. – Pp. 1–27.

28. Williams I. S. U-Th-Pb geochronology by ion microprobe // Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes / Eds.: M. A. McKibben, W. C. Shanks III and W. I. Ridley. – Reviews in Economic Geology, 1998. – Vol. 7. – Pp. 1–35.

29. Zheng Y. Progress in porphyry copper exploration from the Gangdise belt, Tibet, China / Y. Zheng, J. Duo, S. Cheng, S. Gao, F. Dai // Frontiers Earth Science China. – 2007. – Vol. 1. – Pp. 226–232.

---

1. Bukhanova D. S. Mineralogical characteristics of gold-copper-porphyry ores of the Malmyzh deposit, Lower Amur River Region. *Geological processes in environments of subduction, collision and sliding of lithospheric plates.* 2016. Pp. 281–284. (In Russian).

2. Bukhanova D. S., Plechov P. Yu. Conditions for the formation of Au-Cu-porphyry deposits Malmyzhskoe, Khabarovsk Territory (according to the study of fluid inclusions). *Vestnik KRAUNTS. Series: Earth Sciences.* 2017. No 34 (2), pp. 61–71. (In Russian).

3. Bukhanova D. S. First data on the age of the Malmyzhsky gold-copper-porphyry deposit, Khabarovsk Territory. *New in the knowledge of ore formation processes: Materials of the VIII Regional Youth Scientific School.* – Moscow. – 2018. – Pp. 81–82. (In Russian).

4. Gurman M. A., Poltaretskaya A. E. Technological investigations of primary copper-porphyry ores of the Malmyzh deposit. *Problemy nedropol'zovaniya.* 2019. No 2, pp. 94–100. (In Russian).

5. Ivanov V. V., Kononov V. V., Ignat'ev E. K. Mineralogical and geochemical patterns of ore mineralization in metasomatites from the Malmyzh gold-copper ore field (Lower Amur River Region). *Tectonics, deep structure and minerageny of Eastern Asia: VIII Kosyginskie reading.* – Khabarovsk: ITiG DVO RAN. 2013. Pp. 258–261. (In Russian).

6. Kryukov V. G., Lavrik N. A., Litvinova N. M., Stepanova V. F. Typomorphyc minerals from oxidation zone of the Malmyzh gold-copper-porphyry deposit (Freedom prospect area). *Georesursy.* 2019. Vol. 21. No 3, pp. 91–98. (In Russian).

7. Malyshev Yu. F., Goroshko M. V., Rodionov S. M., Romanovskiy N. P. Deep structure and prospecting perspectives of large and superlarge mineral deposits of the Russian Far East. *Large and superlarge mineral deposits: distribution patterns and condition of formation.* Moscow: IGEM RAS. 2005. Pp. 423–430. (In Russian).

8. Krivtsov A. I., Zvezdov V. S., Migachev I. F., Minina O. V. Medno-porfirovye mestorozhdeniya [Copper-porphyry deposits]. Moscow: TSNIGRI. 2001. 232 p.

9. Petrov O. V., Kiselev E. A., Morozov A. F., Shpikerman V. I., Zubova T. N., Shatov V. V., Zmievskiy Yu. P. State Geological Mapping – effective way to discovery of world-class mineral deposits. *Regional'naya geologiya i metallogeniya.* 2015. No 64, pp. 5–10. (In Russian).

10. Petrov O. V., Kiselev E. A., Shpikerman V. I., Zmievskiy Yu. P. Anticipating the distribution of gold-copper-porphyry-type deposits in volcanic-plutonic belts of Russia's eastern regions based on results of compiling sheets of the State Geological Map-1000/3. *Regional'naya geologiya i metallogeniya.* 2019. No 80, pp. 50–74. (In Russian).

11. Prokhorov K. V., Burdonov A. E. Chloride-hypochlorous leaching of gold from oxidized ores of the Malmyzh deposit. *Gornyi Zhurnal.* 2018. No 10, pp. 62–66. (In Russian).

12. Ryazanova E. I. Newest discovery on the Russian Far East – the Malmyzh gold-copper-porphyry deposit. *Geology in the developing world.* 2015, pp. 52–55. (In Russian).

13. Ryazanova E. I. Spatial distribution of ore types within the Malmyzh deposit. *Geology in the developing world.* 2017. Pp. 37–39. (In Russian).

14. Sekisov A. G., Ivanov V. V., Rasskazova A. A., Ignat'ev E. K. Geochemical features and geotechnical investigation of oxidized zone in the Malmyzh copper-gold deposit. *Gornyi Zhurnal.* 2018. No 10, pp. 30–35. (In Russian).

15. Khanchuk A. I. Paleogeodynamic analysis of the formation of ore deposits in Russian Far East. *Ore deposits of the continental margin.* Vladivostok: Dal'nauka. 2000. Pp. 5–34. (In Russian).

16. Khanchuk A. I., Grebennikov A. V., Ivanov V. V. Albian-Cenomanian orogenic belt and igneous province of the Pacific Asia. *Tikhookeanskaya Geologiya.* 2019. Vol. 38. No 3, pp. 4–37. (In Russian).

17. Khanchuk A. I., Ivanov V. V., Ignat'ev E. K., Kovalenko S. V., Semenova D. V. Albian-Cenomanian magmatism and copper ore genesis of the Sikhote-Alin. *Dokl. RAN.* 2019. Vol. 488. No 3, pp. 69–73. (In Russian).

18. Chitalin A. F., Efimov A. A., Voskresenskiy K. I., Ignat'ev E. K., Kolesnikov A. G. Malmyzh – a new large world-class porphyry copper-gold system in the Sikhote-Alin. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*. 2013. No 3, pp. 65–69. (In Russian)

19. Shashorin B. N., Makarov F. I., Rudnev V. V., Vydrich D. E. Geological-geophysical model of Malmyzhskiy ore-bearing system and possibility of its use in forecasting (the Northern Sikhote-Alin). *Razvedka i okhrana nedr*. 2018. No 2, pp. 9–16.

20. Hou, Z. Q., Ma, H. W., Zaw, K., Zhang, Y. Q., Wang, M. J., Wang, Z., Pan, G. T., Tang, R. L. 2003: The Himalayan Yulong porphyry copper belt: produced by large-scale strike-slip faulting at Eastern Tibet. *Economic Geology*. 98. 125–145.

21. Hou, Z. Q., Qu, X. M., Wang, S. X., Du, A. D., Gao, Y. F. 2004: Re-Os age for molybdenites from the Gangdese porphyry copper belt in the Tibetan plateau: implication to mineralization duration and geodynamic setting. *Science China*. 47. 221–231.

22. John, D. A., Ayuso, R. A., Barton, M. D., Blakely, R. J., Bodnar, R. J., Dilles, J. H., Gray, F. et al. 2010: Porphyry copper deposit model. *Scientific Investigations Report 2010-5070-B, U. S. Geological Survey: Reston, Virginia*. 169.

23. Lowell, J. D., Guilbert, J. M. 1970: Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*. 65. 4. 373–408.

24. Muller, D., Groves, D. I. 2016: *Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization*. Springer. 311.

25. Sillitoe, R. H. 2010: Porphyry copper systems. *Economic Geology*. 105. 1. 3–41.

26. Sinclair, W. D. 2007: Porphyry deposits. *Mineral deposits of Canada: Geological Association of Canada Special Publication 5*. 223–243.

27. Soloviev, S. G., Kryazhev, S. G., Dvurechinskaya, S. S., Vasyukov, V. E., Shumilin, D. A., Voskresensky, K. I. 2019: The superlarge Malmyzh porphyry Cu-Au deposit, Sikhote-Alin, eastern Russia: Igneous geochemistry, hydrothermal alteration, mineralization, and fluid inclusion characteristics. *Ore Geology Reviews*. 113. 1–27.

28. Williams, I. S. 1998: U-Th-Pb geochronology by ion microprobe. *In* McKibben, M. A., Shanks III, W. C. and Ridley, W. I. (eds.): *Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. Reviews in Economic Geology*. 7. 1–35.

29. Zheng, Y., Duo, J., Cheng, S., Gao, S., Dai, F. 2007: Progress in porphyry copper exploration from the Gangdise belt, Tibet, China. *Frontiers Earth Science China*. 1. 226–232.

Петров Олег Владимирович – чл.-корр. РАН, доктор геол.-минерал. наук, доктор экон. наук, ген. директор, ВСЕГЕИ [1]. <vsegei@vsegei.ru>

Ханчук Александр Иванович – академик РАН, доктор геол.-минерал. наук, науч. руководитель, ДВГИ ДВО РАН [2]. <axanchuk@mail.ru>

Иванов Владимир Викторович – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, руководитель лаборатории, ДВГИ ДВО РАН [2]. <d159327@yandex.ru>

Киселёв Евгений Аркадьевич – зам. министра природных ресурсов и экологии Российской Федерации, руководитель, Федеральное агентство по недропользованию (Роснедра). Большая Грузинская ул., 4/6, стр. 1, Москва, 125993, Россия.

Шатов Виталий Витальевич – канд. геол.-минерал. наук, вед. специалист, ВСЕГЕИ [1]. <vitaly_shatov@vsegei.ru>

Змиевский Юрий Петрович – канд. геол.-минерал. наук, вед. специалист, ВСЕГЕИ [1]. <yuri_zmievskii@vsegei.ru>

Молчанов Анатолий Васильевич – доктор геол.-минерал. наук, директор, Центр прогнозно-металлогенических исследований ВСЕГЕИ [1]. <anatoly_molchanov@vsegei.ru>

Терехов Артем Валерьевич – канд. геол.-минерал. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ [1]. <artem_terekhov@vsegei.ru>

Сергеев Сергей Андреевич – канд. геол.-минерал. наук, директор, Центр изотопных исследований ВСЕГЕИ [1] (ЦИИ ВСЕГЕИ). <sergey_sergeev@vsegei.ru>

Petrov Oleg Vladimirovich – Corresponding Member of RAS, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Doctor Economic Sciences, Director General, VSEGEI [1]. <vsegei@vsegei.ru>

Khanchuk Alexander Ivanovich – Academician of RAS, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Research Supervisor, FEGI FEB RAS [2].<axanchuk@mail.ru>

Ivanov Vladimir Victorovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Scientist, Head of Laboratory, FEGI FEB RAS [2]. <d159327@yandex.ru>

Kiselev Evgeniy Arkad'evich – Deputy Minister of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation, Head, Federal Agency of Mineral Resources (Rosnedra). 4/6 Bol'shaya Gruzinskaya, str. 1, Moscow, 125993, Russia.

Shatov Vitaly Vitalievich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Geologist, VSEGEI [1].
<vitaly_shatov@vsegei.ru>

Zmievskiy Yuriy Petrovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Expert, VSEGEI [1].
<yuri_zmievskii@vsegei.ru>

Molchanov Anatoly Vasilievich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Director, Centre of Predictive Metallogenic Studies of VSEGEI [1]. <anatoly_molchanov@vsegei.ru>

Terekhov Artem Valerievich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department, VSEGEI [1].
<artem_terekhov@vsegei.ru>

Sergeev Sergey Andreevich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Director, Centre of Isotopic Research of VSEGEI [1] (CIR VSEGEI). <sergey_sergeev@vsegei.ru>

[1] Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, 199106, Russia.

[2] Дальневосточный геологический институт ДВО РАН (ДВГИ ДВО РАН). Пр-т 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, 690022, Россия.

Far East Geological Institute of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (FEGI FEB RAS). 159 Prospekt 100-letiya Vladivostoka, Vladivostok, 690022, Russia.