УДК 553.411’43.074(571.61/.620)
DOI: 10.52349/0869–7892_2023_94_75–112

О. В. Петров, В. В. Шатов (ВСЕГЕИ), А. И. Ханчук, В. В. Иванов (ДВГИ ДВО РАН), Ю. П. Змиевский, В. И. Шпикерман, Е. О. Петров, В. В. Снежко, А. В. Шманяк, А. В. Молчанов, В. О. Халенев, Н. В. Шатова, Н. В. Родионов, Б. В. Беляцкий, С. А. Сергеев (ВСЕГЕИ)

О ПЕРСПЕКТИВАХ ОТКРЫТИЯ НОВЫХ ЗОЛОТО-МЕДНО-ПОРФИРОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ МАЛМЫЖСКОГО ТИПА НА ТЕРРИТОРИИ НИЖНЕГО ПРИАМУРЬЯ (ДАЛЬНИЙ ВОСТОК, РОССИЯ)

В статье обсуждаются новые данные, полученные в ходе минералого-петрографического, петрогеохимического, изотопно-геохронологического и изотопно-геохимического изучения магматических пород рудных полей Малмыж и Гион. Результаты изотопно-геохронологических исследований указывают на позднемеловой – сеноманский (97–99 млн лет) и кампанский (76–82 млн лет) радиологический возраст их магматической кристаллизации соответственно. На основе сравнительного анализа изученных образцов как друг с другом, так и с магматическими породами других порфировых месторождений Мира, обсуждаются результаты изучения на вторично-ионном масс-спектрометре (SIMS) закономерностей распределения элементов-примесей (REE+Y, Hf, Ti, U, Th, Pb) в акцессорных цирконах из магматических пород рудных полей Малмыж и Гион с целью оценки их потенциальной рудоносности на золото-медно-порфировое оруденение.

Ключевые слова: элементы-примеси в акцессорных цирконах, золото-медно-порфировое оруденение, рудные поля Малмыж и Гион, Нижнее Приамурье.

O. V. Petrov, V. V. Shatov (VSEGEI), A. I. Khanchuk, V. V. Ivanov (FEGI FEB RAS), Yu. P. Zmievskiy, V. I. Shpikerman, E. O. Petrov, V. V. Snezhko, A. V. Shmanyak, A. V. Molchanov, V. O. Khalenev, N. V. Shatova, N. V. Rodionov, B. V. Belyatskiy, S. A. Sergeev (VSEGEI)

ON THE PROSPECTS FOR THE DISCOVERY OF NEW MALMYZH-TYPE GOLD-COPPER-PORPHYRY DEPOSITS IN THE LOWER AMUR REGION (FAR EAST, RUSSIA)

The paper discusses new data obtained during mineralogical-petrographic, petrogeochemical, isotope geochronological, and isotope geochemical studies of igneous rocks from the Malmyzh and Gion ore fields. Results of isotope geochronological studies indicate the Late Cretaceous-Cenomanian (97–99 Ma) and Campanian (76–82 Ma) radiological ages of their magmatic crystallization, respectively. Based on a comparative analysis of the studied samples with each other and with igneous rocks from other porphyry deposits of the world, the authors describe results of studying at the secondary ion mass-spectrometer (SIMS) of distribution patterns of trace elements (REE+Y, Hf, Ti, U, Th, Pb) in accessory zircons from igneous rocks of the Malmyzh and Gion ore fields in order to assess their ore potential for gold-copper-porphyry mineralization.

Keywords: trace elements in accessory zircons, gold-copper-porphyry mineralization, Malmyzh and Gion ore fields, Lower Amur region.

Для цитирования: Петров О. В. О перспективах открытия новых золото-медно-порфировых месторождений Малмыжского типа на территории Нижнего Приамурья (Дальний Восток, Россия)/ О. В. Петров, В. В. Шатов, А. И. Ханчук, В. В. Иванов, Ю. П. Змиевский, В. И. Шпикерман, Е. О. Петров, В. В. Снежко, А. В. Шманяк, А. В. Молчанов, В. О. Халенев, Н. В. Шатова, Н. В. Родионов, Б. В. Беляцкий, С. А. Сергеев // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 94. – С. 75–112. DOI: 10.52349/0869–7892_2023_94_75–112.

Введение. В настоящее время месторождения порфирового семейства являются одним из главных источников получения меди, золота и молибдена в мире, тогда как в нашей стране на долю данного геолого-промышленного типа приходится не более 20 % разведанных запасов меди, 6 % – золота и 15 % – молибдена (рис. 1).

На данный момент на территории Российской Федерации выявлено 71 месторождение (17 – крупных, 15 – средних и 39 – мелких) и 518 рудо-

© Петров О. В., Шатов В. В., Ханчук А. И., Иванов В. В., Змиевский Ю. П., Шпикерман В. И., Петров Е. О., Снежко В. В., Шманяк А. В., Молчанов А. В., Халенев В. О., Шатова Н. В., Родионов Н. В., Беляцкий Б. В., Сергеев С. А., 2023

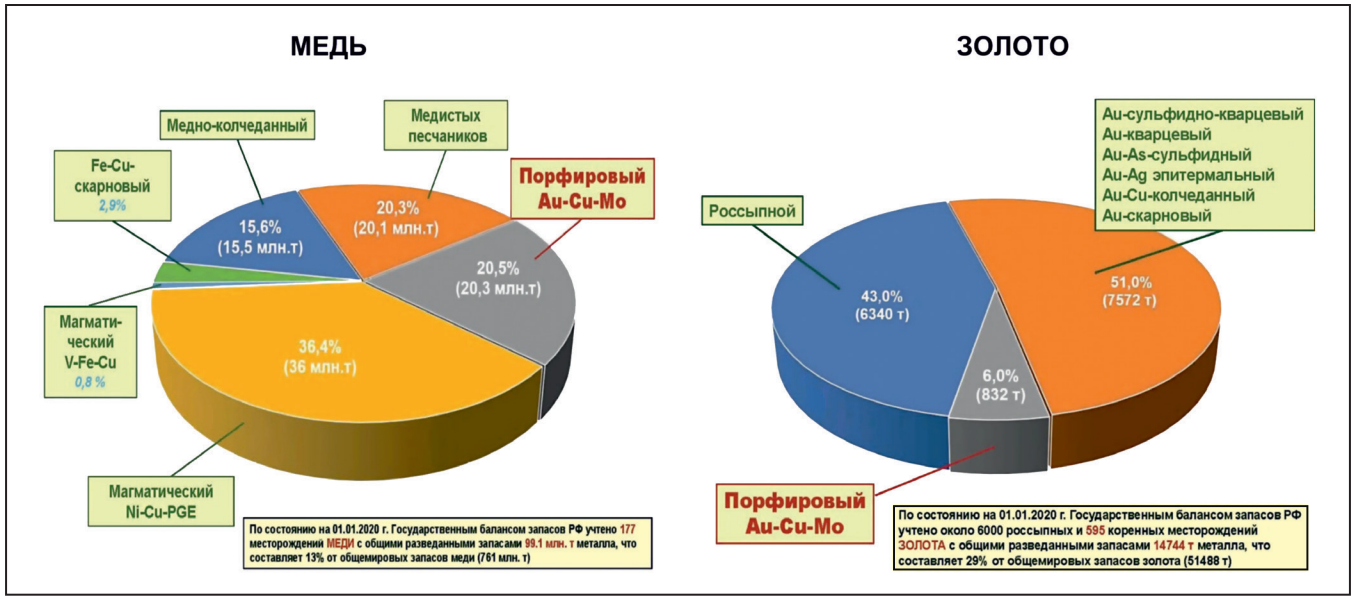
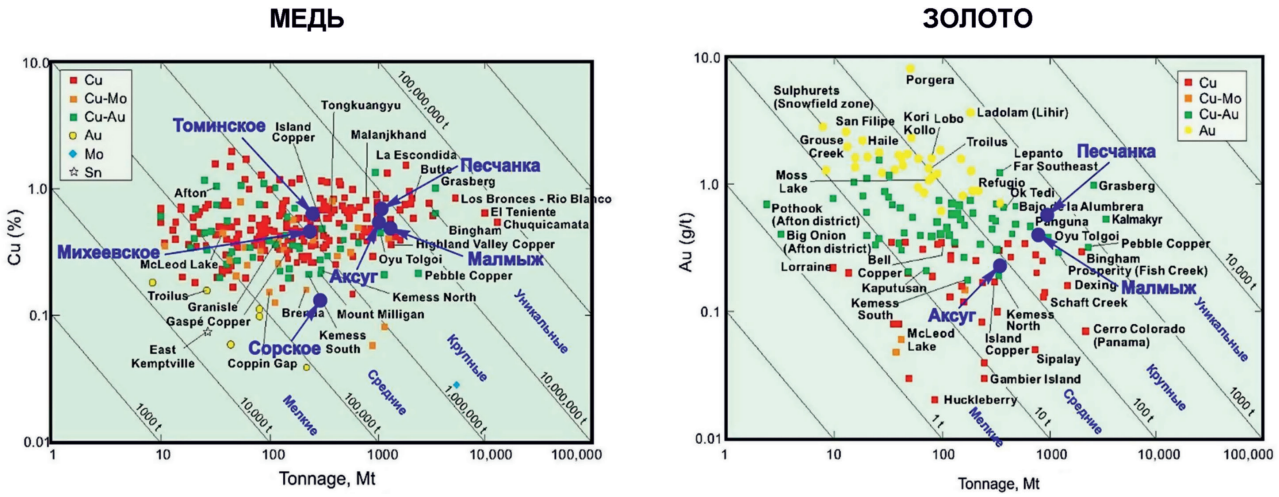


Рис. 1. Структура минерально-сырьевой базы меди и золота Российской Федерации (распределение по геолого-промышленным типам по состоянию на 1.01.2021 г.)



№ п/п	Месторождение	Медь		Золото		Молибден	
		Запасы, млн т	Содержание, %	Запасы, т	Содержание, г/т	Запасы, тыс. т	Содержание,%
1	Песчанка	6,4	0,53	350	0,30	132	0,014
2	Малмыж	8,3	0,35	347	0,20	–	–
3	Аксуг	3,6	0,67	83	0,20	71	0,015
4	Томинское	3,8	0,34	33	0,12	–	–
5	Михеевское	1,9	0,37	88	0,22	121	0,002
6	Сокское	0,4	0,25	–	–	89	0,060

Рис. 2. Положение ведущих порфировых месторождений России на вариационных диаграммах: Запасы (A + B + C_1 + C_2) vrs. Содержание полезного компонента в рудах

проявлений, которые с определенной долей условности можно отнести к порфировому геолого-промышленному типу. Как показано на рис. 2, из шести ведущих золото-медно-порфировых месторождений России (Песчанка, Малмыж, Аксуг, Томинское, Михеевское и Сорское) только пять относятся к крупным по запасам месторождениям, одно – к средним и ни одного – к уникальным (Cu > 10 млн т, Au > 1000 т) типа Эль-Тениенте, Рио-Бланко и Чукакамата в Чили, Гразберг в Папуа-Новая Гвинея, Калмакыр и Дальнее в Узбекистане, Бингэм в США, Ою Толгой в Монголии, Пэббл на Аляске, Кляймакс и Хендерсон в США и др. [6; 8; 22; 23; 35; 39; 50–52 и др.].

Здесь возникает закономерный вопрос: Почему структура МСБ меди, золота и молибдена России так разительно отличается от мировой? В чем причина?

В геологическом отношении территория России выглядит достаточно благоприятно с точки зрения возможностей обнаружения новых порфировых объектов. В ее пределах установлены кайнозойские, мезозойские и палеозойские вулкано-плутонические пояса окраинно-континентального типа, получил широкое развитие мощнейший островодужный или син- и постколлизионный магматизм. То есть, казалось бы, в пределах нашей страны существовали все необходимые условия для формирования порфировых объектов, а месторождений мало.

Ответ на этот вопрос связан, по-видимому, с тем обстоятельством, что в течение длительного времени, еще начиная с советских времен, прогнозу и поискам этого типа рудных объектов на территории Российской Федерации не уделялось должное внимание. Все усилия были направлены на прогнозирование порфирового оруденения в пределах Среднеазиатских и Закавказских Республик бывшего Советского Союза – в Казахстане, Узбекистане, Таджикистане, Кыргызстане и Армении, что привело к открытию там целого ряда порфировых объектов мирового класса таких как Медный Коунрад, Бощекуль, Актогай, Айдарлы, Нурказган, Коктасжал, Каратас, Саяк, Коксай, Талдыбулак, Калмакыр, Дальнее, Каджаран и др.

Тем не менее количество отечественных запасов меди, золота и молибдена, связанных с порфировыми объектами, хоть и медленно, но с каждым годом продолжает увеличиваться, прежде всего в связи с открытием таких крупных порфировых месторождений как Малмыж и Песчанка на Дальнем Востоке России, Быстринское в Забайкалье, Михеевское и Томинское на Урале, Аксуг в Алтае-Саянской складчатой области и др.

То есть можно ожидать, что перспективы воспроизводства МСБ меди, золота и молибдена нашей страны будут связаны в ближайшие годы, в том числе и с открытием и разведкой новых объектов порфирового семейства.

В ФГБУ «ВСЕГЕИ» в последние годы в результате реализации Государственной программы по региональному геологическому изучению недр территории Российской Федерации в масштабе 1 : 1 000 000 (3-е поколение) и 1 : 200 000 (2-е издание) накоплен обширный фактический материал по характеристике золото-медно-порфировых месторождений территории Российской Федерации, обстановкам их проявления и закономерностям размещения, что позволило составить *«Карту закономерностей размещения золото-медно-порфировых месторождений России масштаба 1:2.5М»* [14].

Карта подготовлена в формате ArcGIS 10.2 и включает в себя целый ряд тематических «слоев», а также базу данных по рудным объектам порфирового семейства. На карте отражено положение всех известных месторождений, рудопроявлений и проявлений порфировой рудной минерализации, а также 297 рудных и потенциально рудных узлов, перспективных на обнаружение порфирового оруденения.

Анализ карты дал возможность локализовать на территории Российской Федерации более 200 перспективных на обнаружение порфировой рудной минерализации участков недр, привязанных к номенклатурным листам масштаба 1 : 200 000 с целью постановки в их пределах ГДП-200/2, в том числе по территории Дальневосточного федерального округа (ДВФО) – 179 единиц (50 – первой и 129 – второй очереди) [11; 13; 14].

Здесь возникает вопрос: Что делать с этим многообразием перспективных участков недр и каким образом выделить среди них наиболее интересные в поисковом отношении объекты?

Общеизвестно, что одной из главных проблем геологосъемочных работ на современном этапе является повышение их поисковой эффективности. Актуальность этой проблемы не вызывает сомнений в связи с тем, что лимит легко открываемых в нашей стране месторождений, в том числе и золото-медно-порфирового геолого-промышленного типа, в настоящее время практически полностью исчерпан. Новые рудные объекты могут быть обнаружены только за счет скрытых, не выходящих на дневную поверхность рудных месторождений. Повышение поисковой эффективности геологосъемочных работ можно ожидать от широкого привлечения наряду с геохимическими, геофизическими, дистанционными и другими методами, также и *прецизионных изотопно-геохимических методов исследования вещества горных пород, руд и минералов*.

В последние годы за рубежом, главным образом в Китае, Австралии, Канаде, США, Аргентине, Чили и в других странах на основе использования современных инновационных технологий получило широкое развитие новое научное направление – так называемое *«изотопно-геохимическое картирование»* интрузивных комплексов, нацеленное на оценку их потенциальной рудоносности на золото-медно-порфировое оруденение.

В частности, в ходе этих исследований было показано, что циркон, как акцессорный минерал магматических пород, благодаря своим уникальным физическим свойствам, способности фикси-

ровать условия среды минералообразования и консервативным изотопно-геохимическим характеристикам может рассматриваться в качестве одного из самых надежных *минералов-индикаторов продуктивных на золото-медно-порфировое оруденение* интрузивных массивов [3; 5; 16; 17; 24; 26–30; 32; 36; 38; 41–46; 49; 50; 54 и др.].

Начиная с 2020 г., данная методика, позволяющая на основе изучения закономерностей распределения некоторых элементов-примесей (REE+Y, Hf, Nb, Ta, U, Th, Pb, Ti и др.) в акцессорных цирконах с большей долей вероятности разбраковывать порфировые интрузивы *на продуктивные и заведомо «безрудные»*, также широко используется во ФГБУ «ВСЕГЕИ» при прогнозно-минерагеническом анализе территории Российской Федерации на золото-медно-порфировое оруденение.

Эта методика уже успешно апробирована нами на примере целого ряда порфировых объектов Дальневосточного региона России – Малмыж, Пони, Песчанка, Рябиновое, Морозкинское, Россошинское, Доронинское, Лора, Лазурное, Медьгора и др., где показала свою эффективность [10; 14; 24; 44 и др.].

В настоящей статье авторы поставили перед собой задачу продемонстрировать на примере территории Нижнего Приамурья, в пределах которой расположено крупное золото-медно-порфировое месторождение Малмыж, эффективность данного методического подхода для разбраковки порфировых гранитоидных комплексов позднемелового возраста на продуктивные и «безрудные» на основе использования индикативных геохимических параметров циркона (Porphyry Indicator Zircons – PIZs [38; 45]), указывающих на то – был ли материнский гранитоидный расплав в достаточной степени флюидо- и водонасыщен, окислен, обогащен серой и рудогенными элементами для того, чтобы запустить механизм процесса формирования порфировой рудоносной гидротермально-метасоматической системы.

В статье также обсуждаются новые данные, полученные коллективом специалистов из ВСЕГЕИ и Дальневосточного геологического института ДВО РАН в ходе минералого-петрографического, петрогеохимического, изотопно-геохронологического и изотопно-геохимического изучения магматических пород рудных полей Малмыж и Гион (Маноминский перспективный участок). Это позволило авторам статьи на основе сравнительного анализа изученных образцов магматических пород как друг с другом, так и с магматическими породами других порфировых месторождений Мира, прийти к выводу о высоких перспективах обнаружения в пределах потенциального рудного поля Гион золото-медно-порфировой рудной минерализации Малмыжского типа.

Положение рудных полей Малмыж и Гион в региональных геологических структурах, потенциальных геофизических полях и металлогенической зональности территории Нижнего Приамурья. Как показано на рис. 3, в структурах Сихотэ-Алинского орогенного пояса территория Нижнего Приамурья принадлежит к *Журавлевско-Амурскому террейну* турбидитового осадочного бассейна, сформированного на океанической плите в раннемеловое время на границе континент–океан и деформированного в позднем альбе – сеномане в результате синсдвиговой коллизии с континентальной окраиной раннемеловой островной дуги.

Важную роль в металлогении территории Нижнего Приамурья, как и всего юга Дальнего Востока России, играют проявления позднеальб-сеноманского синколлизионного и кампанского постколлизионного гранитоидного и монцонитоидного магматизма, 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. [2; 7; 11; 13; 18–21].

Особое звучание эта проблема приобрела в связи с открытием в пределах Журавлевско-Амурского террейна крупного золото-медно-порфирового месторождения Малмыж и целого ряда перспективных на золото и медь рудопроявлений, таких как Пони и Тырское. Все эти объекты имеют очень важное значение для развития минерально-сырьевой базы Дальнего Востока России.

Многочисленными работами А. И. Ханчука [2; 18–21; 31], О. В. Петрова [11; 13; 14] и соавторов была дана развернутая характеристика геологических, минерагенических, петрохимических и геохимических особенностей синорогенных (коллизионных) позднемеловых рудоносных магматических пород, впервые произведена оценка возраста их кристаллизации по акцессорным цирконам, предложены к рассмотрению геологические, регионально-минерагенические и геодинамические модели формирования магматических образований, как Журавлевско-Амурского террейна, так и всего Сихотэ-Алинского орогенного пояса.

В результате этих работ выяснилось, что даже территориально сближенные позднеальб-сеноманские и кампанские интрузивы Сихотэ-Алиня могут иметь пестрые петрогеохимические характеристики. В одном случае они представлены габбро, монцогаббро и монцонитами, а в другом – адакитами и гранитоидами A-, 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-порфирового оруденения в раннемеловом террейне турбидитового осадочного бассейна на границе континент–океан и Cu-Au-W оруденения в террейне средне-позднеюрской аккреционной призмы (рис. 3).

На основании чего эти авторы смогли прийти к выводу о проявлении на рассматриваемой территории на рубеже 100 ± 10 млн лет медного, вольфрамового, оловянного и золотого оруденения, сформированного в результате синсдвигового

орогенеза в обстановке трансформной континентальной окраины в период и после коллизии островной дуги.

Однако, несмотря на открытие Малмыжского месторождения и рудопроявлений Пони и Тырское, минерагенический потенциал территории Нижнего Приамурья в отношении золото-медно-порфирового оруденения можно считать до конца еще не исчерпаным.

В ходе работ ГК-200/2 и ГК-1000/3 в ее пределах установлена целая серия перспективных участков недр (Подхоренковский, Переселенка, Мухенский, Маноминский – Гион, Мачтовый, Ситогинский, Дидбиранский, Золотогорский, Благодатненский и Амысканский), также связанных с проявлением позднемелового гранитоидного и монцонитоидного магматизма и в пределах которых ожидается обнаружение рудной минерализации золото-медно-порфирового геолого-промышленного типа (рис. 3, 4).

Из вышеперечисленных перспективных участков наиболее интересным в прогностическом отношении является Маноминская площадь, расположенная на правом берегу р. Амур, в 50 км к югу от месторождения Малмыж и которая в геологической литературе нередко фигурирует под названием «потенциальное рудное поле Гион» [13].

На рис. 5 демонстрируется положение рудных полей Малмыж и Гион в региональных геологических структурах, на космическом снимке и в потенциальных геофизических полях территории Нижнего Приамурья. При рассмотрении этой иллюстрации, прежде всего, обращает на себя внимание факт чрезвычайно высокой степени сходства этих двух рудных полей как по особенностям их геологического строения, выраженности на местности положительными формами рельефа, так и по положению в потенциальных геофизических полях. В обоих случаях территории этих рудных полей хорошо фиксируются высокоградиентными положительными магнитными и гравитационными аномалиями. Особенно детально этот вопрос изучен на примере Малмыжского рудного поля, для которого, по результатам работ ряда исследователей [9; 25], была предложена геолого-геофизическая модель Малмыжской рудно-магматической системы с целью использования магнитометрических и гравиметрических данных при прогнозировании на территории Нижнего Приамурья перспективных участков недр на золото-медно-порфировое оруденение.

На рис. 6 приводится фрагмент геолого-геофизического разреза земной коры по опорному профилю 8-ДВ, пересекающему в интервале ПК 1450–1525 км территории рудных полей Гион и Малмыж.

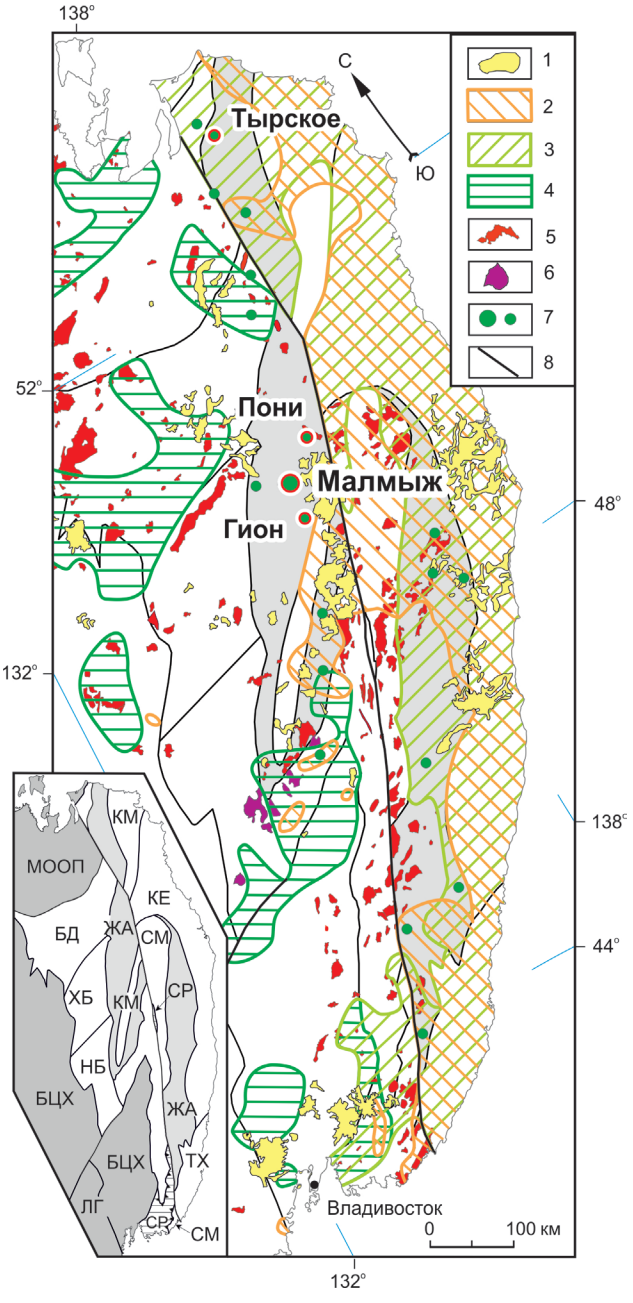


Рис. 3. Положение золото-медно-порфировых рудных полей Малмыж, Гион, Пони и Тырское в структурах Сихотэ-Алинского орогенного пояса

1–6 – меловые и кайнозойские магматические комплексы (штрихами показаны ареалы распространения): *1* – плиоцен (платобазальты), *2* – поздний палеоцен – миоцен (риолиты, бимодальные вулканиты, базальты и габбро-граниты), *3* – турон – ранний палеоцен (андезиты–риолиты и гранитоиды), *4* – поздний альб – нижний сеноман (базальты, андезиты, риолиты), *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 средне-позднеюрской аккреционной призмы: БД – Баджальский и НБ – Наданьхада-Бикинский, СМ – Самаркинский и ХБ – Хабаровский; террейны позднетитон-валанжинской аккреционной призмы: ТХ – Таухинский; террейны баррем-раннеальбской аккреционной призмы: КМ – Киселевско-Маноминский; террейны баррем-раннеальбской островной дуги: КЕ – Кемско-Удыльский; террейны раннемелового турбидитового бассейна: ЖА – Журавлевско-Амурский; СР – Сергеевский террейн 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

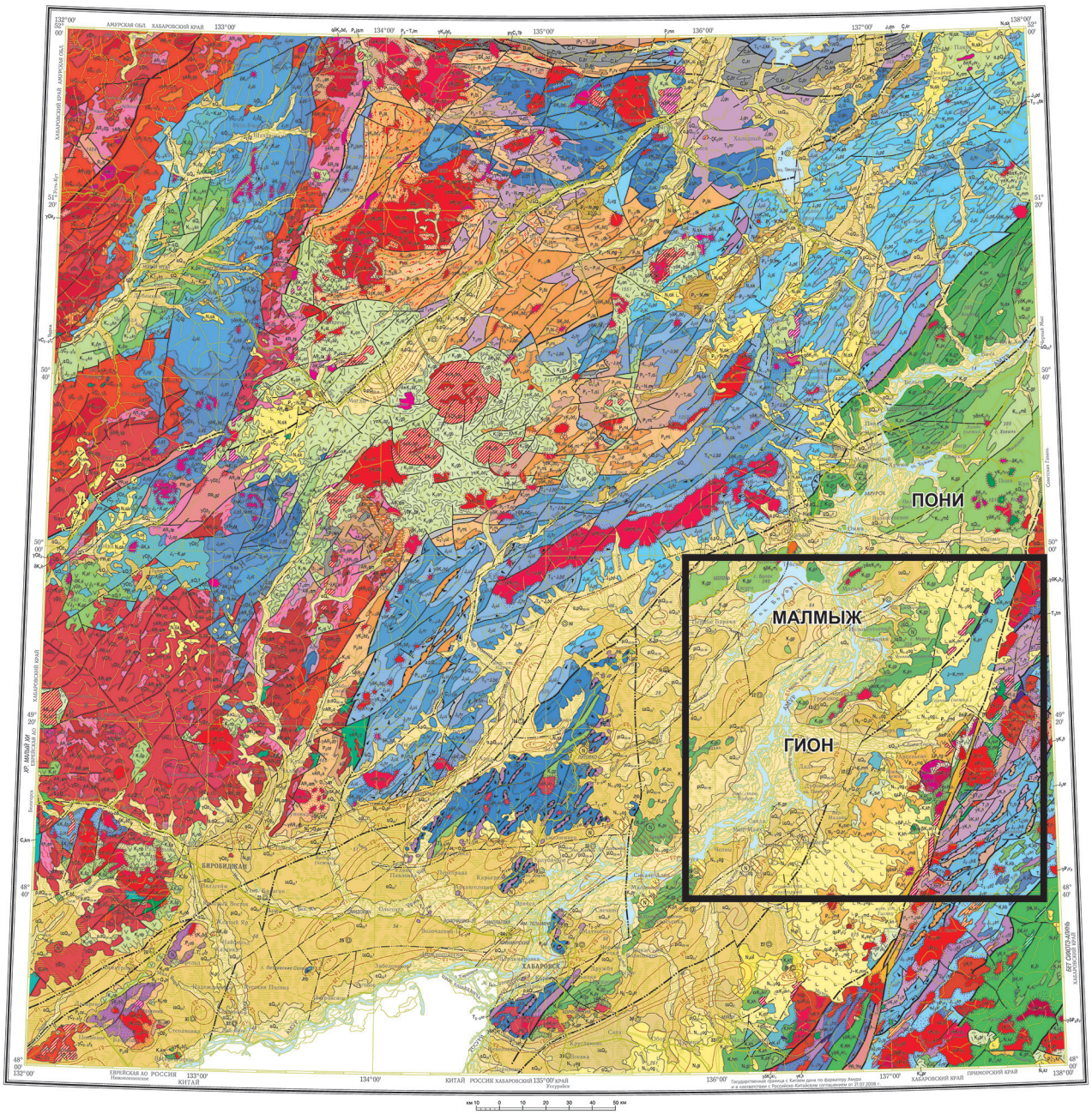


Рис. 4. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1М, лист М-53 (Хабаровск)
Черной рамкой показано местоположение изученной территории (см. рис. 5)

В целом данный фрагмент геолого-геофизического разреза (ПК 1450–1590) освещает глубинное строение зоны сочленения Западно-Сихотэалинской и Центрально-Сихотэалинской СФЗ. В пределах Западно-Сихотэалинской СФЗ на данном фрагменте выделяются Приамурская и Приуссурийская подзоны, которые сложены раннемеловыми турбидитовыми и аккреционными комплексами пород, сформированными на океанической плите на границе континент–океан.

Приамурская подзона, в пределах которой и расположены рудные поля Малмыж и Гион, в своей верхней, складчато-надвиговой части представляет собой крупную синформу, выполненную турбидитовыми отложениями нижнего мела мощностью до 8–12 км, смятыми в симметричные складки.

В западной ее части (ПК 1450–1485) на глубинах 8–12 км на границе верхнего складчато-метаморфического слоя с нижележащей зоной гранитизации мелового возраста, четко выделяется слой куполовидной формы со сгущением площадок отражения мощностью 2–8 км, который интерпретируется как реликт палеоокеанической коры, представленный базитами. В палеогеодинамическом плане данная структура рассматривается в качестве задугового спредингового бассейна. Турбидитовый состав осадков позволяет отнести

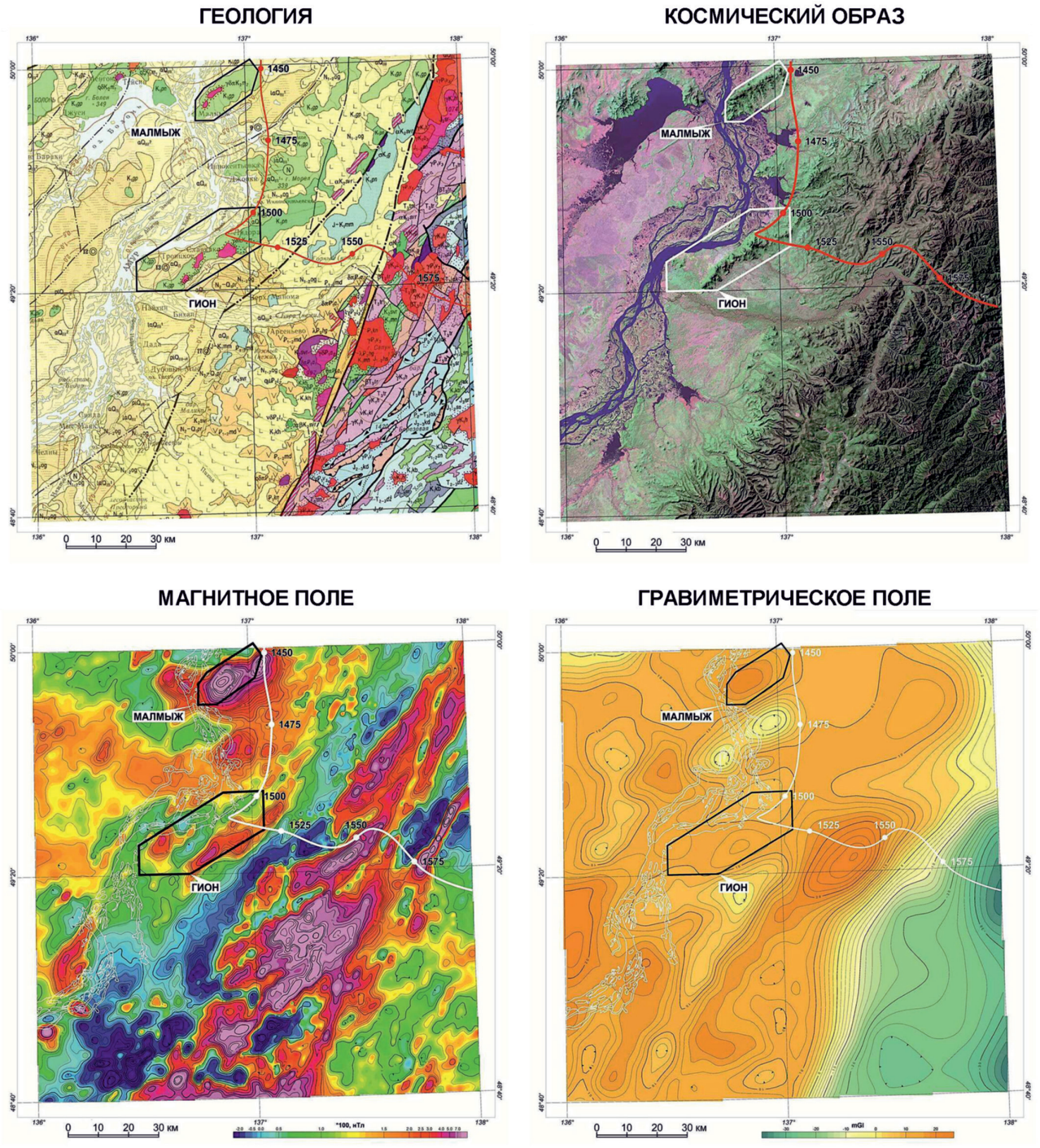


Рис. 5. Положение рудных полей Гион и Малмыж в региональных геологических структурах, на космическом снимке и в потенциальных геофизических полях территории Нижнего Приамурья

Космический образ представлен в виде цветовой композиции RGB 12, 8 и 4-го каналов КС SENTINEL2, совмещенной с цифровой моделью рельефа поверхности.

Красной и белой линиями на рисунках показан фрагмент траектории комплексного геолого-геофизического разреза земной коры 8-ДВ в интервале 1450–1595 км

данную структуру к трансформным. Останцы палеоокеанической коры над зоной мелового магмообразования могли служить источником флюидов, заимствующих благородные металлы для формирования месторождений золото-молибденовой формации. Именно к этой зоне и приурочено месторождение Малмыж.

Восточнее, ПК 1480–1525, в интервале которого расположено потенциальное рудное поле Гион, подобный слой со сгущением площадок отражения наблюдается уже на глубинах 18–20 км, где залегает под областью меловой гранитизации (магмообразования), погружаясь под Приуссурийскую подзону. В целом, выделенную область

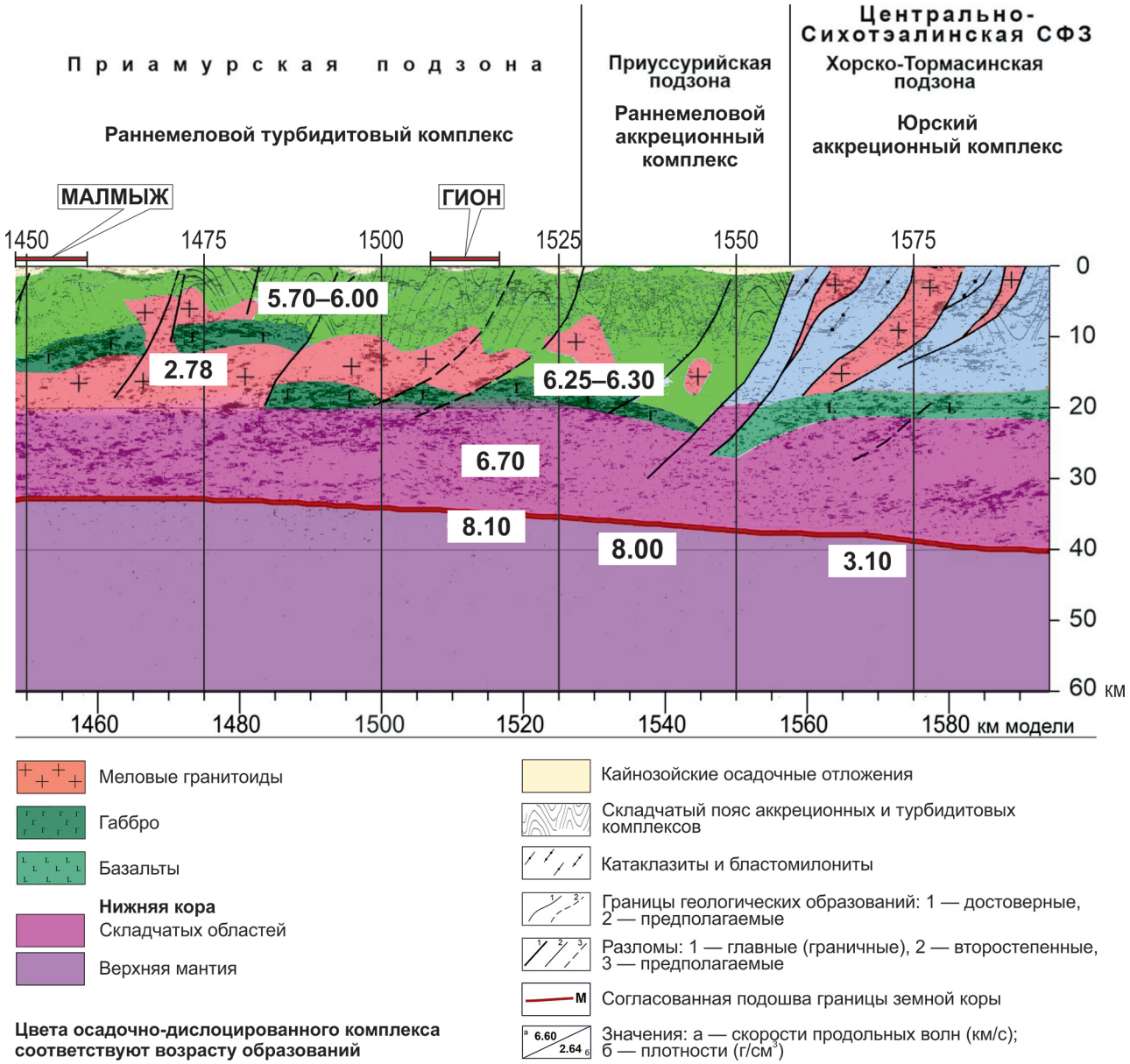


Рис. 6. Комплексный геолого-геофизический разрез земной коры 8-ДВ. Фрагмент: интервал ПК 1450–1595 км, пересекающий территории рудных полей Гион и Малмыж

гранитизации вполне можно сопоставить с гранитным слоем, который здесь и по совокупности геофизических данных имеет аномально малую мощность – 5–8 км. Базитовый слой характеризуется относительно большей мощностью – 15–17 км, с увеличением мощности к востоку, к границе с Приуссурийской подзоной, до 18 км.

Поверхность М по профилю от ПК 1450 до ПК 1525 держится примерно на глубине 32–33 км, то есть земная кора в Приамурской подзоне, как и других зонах Сихотэ-Алинской орогенной системы, имеет сокращенную мощность.

Рудное поле Малмыж. 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. 7).

На современном уровне эрозионного среза Боккинский массив и сопровождающие его в виде саттелитов 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

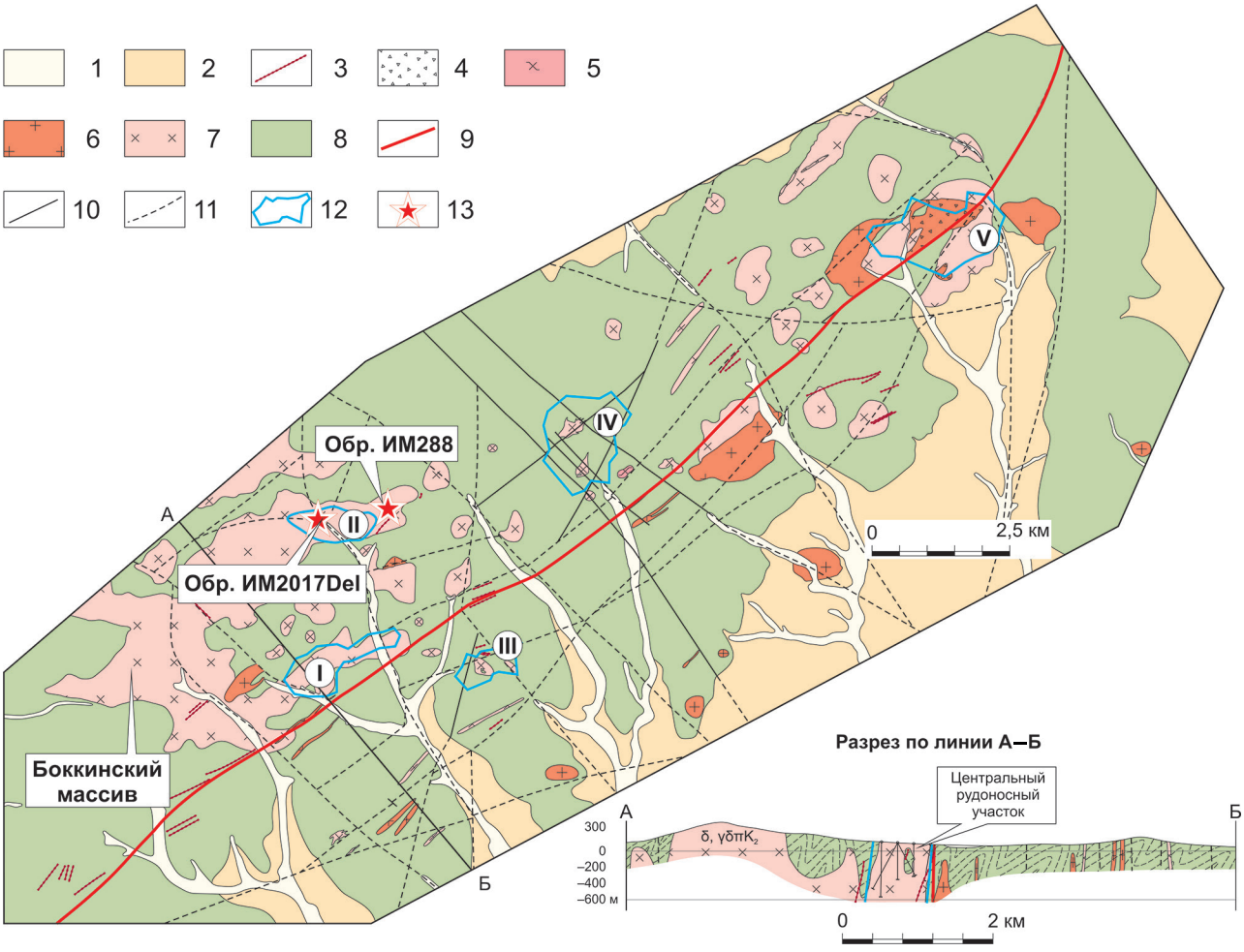


Рис. 7. Схема геологического строения рудного поля Малмыж

1–2 – четвертичные отложения (*1* – речные аллювиальные и делювиальные отложения, *2* – суглинки, супеси, дресва, щебень, глины с редкой галькой и гравием); *3–7* – магматические образования позднемелового (сеноманского) возраста (*3* – гипабиссальный дайковый комплекс: диорит- и кварцевые диорит-порфиры, гранодиорит-порфиры, *4* – гидротермально-магматические эруптивные брекчии, *5* – диорит-порфиры, *6* – порфировидные гранодиориты и гранодиорит-порфиры, *7* – порфировидные кварцевые диориты, кварцевые диорит-порфиры); *8* – нижнемеловые терригенные отложения (Ларгасинская свита: песчаники, алевролиты, гравелиты, туффиты); *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 и изотопно-геохимические исследования

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 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, а затем кварц-серицитовыми метасоматитами или филлизитами, а еще дальше – 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 [37]. Выявленные в восточной части рудного поля ореолы аргиллизации имеют гипергенную природу, «накладываясь» на все вышеперечисленные 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 количе-

Таблица 1

Содержания петрогенных и малых элементов в интрузивных породах рудных полей Гион и Малмыж (участок Северный)

Оксиды, малые элементы, %	Малмыж		Гион				Предел обнаружения
	Кварцевый диорит	Диорит	Кварцевый диорит-порфир	Гранодиорит-порфир	Кварцевый диорит-порфир	Гранодиорит-порфир	
	Обр. ИМ-288	Обр. ИМ-2017 DEL	Обр. 2-2	Обр. 3-4	Обр. 3-9А	Обр. 3-11	
SiO_2	63,40	58,20	62,30	65,00	62,40	64,10	0,02, %
Al_2O_3	15,70	19,90	15,80	15,80	16,70	16,20	0,05
TiO_2	0,40	0,39	0,70	0,64	0,68	0,59	0,01
$Fe_2O_{3общ}$	6,78	4,78	5,60	4,39	4,83	4,39	0,01
MnO	0,14	0,24	0,11	0,12	0,05	0,09	0,01
MgO	1,88	1,90	2,98	2,33	3,11	2,61	0,10
CaO	6,12	8,32	4,67	2,53	5,12	3,71	0,01
Na_2O	2,65	3,15	3,97	3,45	3,81	3,94	0,10
K_2O	0,59	0,95	2,40	3,36	1,85	2,50	0,01
P_2O_5	0,11	0,13	0,26	0,21	0,27	0,19	0,05
ппп	2,11	1,53	1,08	2,12	1,00	1,54	0,10
Сумма	99,90	99,60	99,90	99,90	99,90	99,80	
Fe_2O_3	3,74	2,73	2,83	1,54	1,49	1,82	0,30
FeO	2,74	1,85	2,50	2,57	2,91	2,31	0,25
Fe_2O_3/FeO	1,36	1,48	1,13	0,60	0,51	0,79	
K_2O+Na_2O	3,24	4,10	6,37	6,81	5,66	6,44	
K_2O/Na_2O	0,22	0,30	0,60	0,97	0,49	0,63	
Sc, г/т	7,2	9,9	7,8	10,0	6,9	4,4	0,2, г/т
V	94	98	120	96	110	100	2,5
Cr	20	3,4	48	28	45	28	1,0
Ni	16	14	25	40	36	27	1,0
Co	6,2	6,5	10,0	18,0	12,0	8,4	0,5
Pd	0,02	0,028	0,037	0,030	0,048	0,041	0,002
Pt	0,003	<0,002	0,0092	0,013	0,012	0,0035	0,002
Au	0,030	0,004	0,0083	0,0085	0,0063	0,002	0,002
Ag	0,63	0,12	0,026	0,093	0,12	0,04	0,01
Cu	1280	83	19	82	63	9	1,0
Pb	7,0	28	11	14	4,2	7,8	1,0
Zn	84	129	54	71	23	40	1,0
As	н.о.	н.о.	2,8	1,6	1,6	1,3	0,5
Sb	0,57	0,84	0,28	1,72	0,17	0,58	0,1
Re	0,0083	<0,005	н.о.	н.о.	н.о.	н.о.	0,005
Bi	<0,1	0,20	0,14	<0,1	0,18	0,47	0,1
Rb	16	18	65	124	75	58	2,0
Cs	н.о.	н.о.	1,3	2,8	3,0	1,6	0,1
Ba	190	260	650	930	560	770	50
Sr	265	426	724	636	870	818	1,0
Zr	56	82	131	142	119	136	0,5
Hf	1,60	2,20	3,29	3,82	2,88	3,48	0,01
Ta	0,4	0,5	0,6	0,8	0,6	0,5	0,1
Nb	3,2	4,1	9,7	10,4	8,5	8,4	0,5
Th	2,2	3,1	7,8	12,7	6,8	8,4	0,1

Окончание табл. 1

Оксиды, малые элементы, %	Малмыж		Гион				Предел обнаружения
	Кварцевый диорит	Диорит	Кварцевый диорит-порфир	Гранодиорит-порфир	Кварцевый диорит-порфир	Гранодиорит-порфир	
	Обр. ИМ-288	Обр. ИМ-2017 DEL	Обр. 2-2	Обр. 3-4	Обр. 3-9А	Обр. 3-11	
U	0,6	0,9	1,9	2,6	1,6	1,8	0,1
Mo	2,9	<0,6	0,7	0,6	1,5	1,3	0,6
W	0,6	0,6	0,8	1,4	6,8	0,6	0,5
Sn	1,0	0,8	0,9	1,0	1,6	0,8	0,2
Be	<1,0	<1,0	1,6	1,1	1,3	1,5	1,0
Sr/Y	20	29	67	46	42	61	
Y	13,2	14,9	13,0	20,4	10,6	11,2	0,1
La	9,99	12,00	27,20	39,30	29,10	28,70	0,01
Ce	20,10	26,40	52,60	67,10	56,20	53,00	0,01
Pr	2,38	3,26	5,88	8,98	6,32	5,90	0,01
Nd	9,80	13,00	21,40	30,40	22,00	20,60	0,01
LREE	**42,27**	**54,66**	**107,08**	**145,78**	**113,62**	**108,20**	
Sm	2,05	2,48	3,48	6,15	3,77	3,71	0,005
Eu	0,68	0,81	1,12	1,77	1,16	1,10	0,005
Gd	2,28	2,51	3,63	5,30	3,44	3,15	0,01
Tb	0,37	0,45	0,48	0,81	0,44	0,39	0,005
Dy	2,14	2,36	2,40	4,02	2,18	2,10	0,01
Ho	0,46	0,49	0,44	0,68	0,35	0,36	0,005
MREE	**7,98**	**9,10**	**11,55**	**18,73**	**11,34**	**10,81**	
Er	1,54	1,57	1,19	2,08	1,01	1,08	0,01
Tm	0,27	0,28	0,23	0,33	0,14	0,16	0,005
Yb	1,45	1,62	1,21	1,77	0,81	1,02	0,01
Lu	0,27	0,27	0,16	0,23	0,14	0,15	0,005
HREE	**3,53**	**3,74**	**2,79**	**4,41**	**2,10**	**2,41**	
∑REE	**53,78**	**67,50**	**121,42**	**168,92**	**127,06**	**121,42**	

Примечание. Малмыж: обр. ИМ-2017Del – равномернозернистый диорит, обр. ИМ-288 – порфировидный кварцевый диорит. Гион: обр. 2-2 – биотит-роговообманковый кварцевый диорит-порфир, обр. 3-4 – биотитовый гранодиорит-порфир, обр. 3-9А – биотит-роговообманковый кварцевый диорит-порфир и обр. 3-11 – биотит-роговообманковый гранодиорит-порфир.

стве 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 гётит, 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 (A + B + C_1) составляют 1,3 млрд т руды, в том числе 6,18 млн т меди и 273 т золота при средних содержаниях этих металлов в рудах – 0,35 % и 0,20 г/т соответственно. К 2023 г. Русская медная компания (РМК) планирует построить на месторождении горно-обогатительный комбинат мощностью переработки 56 млн т руды в год. Оператором освоения месторождения является ООО «Амур Минералс», которое входит в Группу РМК [*с сайта – https://amurminerals.ru/*].

Рудные образования Малмыжского месторождения всесторонне изучены с использованием самых современных аналитических методов и технологий [1; 4; 7; 15; 22; 44; 53].

Результаты изотопно-геохронологических исследований. Для определения радиологического возраста магматических образований Мал-

мыжского рудного поля в ЦИИ ВСЕГЕИ локальным U-Pb методом было изучено два представительных образца под номерами ИМ-288 и ИМ-2017Del, характеризующих гранитоиды северо-восточной части Боккинского массива в пределах Северного рудоносного участка [10; 44].

Обр. 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, на 35–40 % – основного плагиоклаза (андезина), на 15–20 % – биотита и роговой обманки и на 20–25 % – новообразованных минералов стадии пропилитизации–березитизации. Темноцветные минералы исходной породы, биотит и роговая обманка практически полностью замещены агрегатными псевдоморфозами хлорит-карбонатного и хлорит-эпидотового составов, 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. 1).

Обр. 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, на 45–50 % – основного плагиоклаза (андезина), на 15–20 % – биотита и роговой обманки, на 2–5 % – клинопироксена и на 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.

В процессе изотопно-геохронологических исследований изучались монофракции акцессорных цирконов, возраст которых определялся локальным U-Pb методом на вторично-ионном микрозонде SIMS SHRIMP-IIe в ЦИИ ВСЕГЕИ по стандартной методике [48; 56].

Как было показано в наших более ранних публикациях [10; 44], радиологический U-Pb возраст магматической кристаллизации пород северо-восточного фланга Малмыжского рудного поля находится в интервале **97–99 млн лет**, что не противоречит результатам, полученным ранее Д. С. Бухановой [1].

При этом порфировидные биотит-роговообманковые кварцевые диориты (обр. ИМ-288) имеют радиологический возраст в 97,2 ± 1,1 млн лет, а равномернозернистые биотит-роговообманковые клинопироксенсодержащие диориты (обр. ИМ-2017Del) – 99,4 ± 1,3 млн лет.

Наряду с автохтонными кристаллами цирконов в магматических породах Малмыжского рудного поля также были выявлены и захваченные аллохтонные (ксеногенные) кристаллы цирконов, характеризующие процесс контаминации гранитоидного расплава веществом вмещающих терригенных и туфогенных пород нижнего мела. Морфологически эти аллохтонные цирконы представляют собой «окатанные» короткопризматические кристаллы, чаще – обломки неправильной формы с темными включениями.

Большинство аллохтонных (ксеногенных) цирконов из диоритов и кварцевых диоритов Малмыжского рудного поля имеет возраст 120–130 млн лет, что соответствует возрасту вмещающих туфогенно-терригенных пород Ларгасинской свиты нижнего мела.

В табл. 1 приводится подробная петрохимическая и геохимическая характеристика изученных образцов магматических пород рудных полей Малмыж (участок Северный) и Гион.

Рудное поле Гион. Потенциальное рудное поле Гион расположено в междуречье Амура и его правого притока – р. Манома, в 50 км к югу от месторождения Малмыж. В геоморфологическом отношении территория рудного поля представляет собой цепь невысоких холмов с абс. отм. от 300 до 475 м, образующих узкую гряду (или хребет) шириной от 4 до 8 км, вытянутую в северо-восточном направлении более чем на 40 км.

В геологическом строении рудного поля принимают участие турбидитовые терригенные и вулканогенно-терригенные отложения Ларгасинской и Уктурской свит раннемелового возраста, представленные мощной пачкой переслаивания алевролитов, песчаников, гравелитов и конгломератов. В составе пачки выделяются маломощные горизонты туффитов, туфов и лав андезитового и андезит-дацитового состава (рис. 8).

Весь этот комплекс раннемеловых вулканогенно-терригенных пород в различных частях рассматриваемой территории прорван гранитоидами Нижнеамурского интрузивного комплекса. На хр. Гион закартировано несколько небольших по размерам штокообразных интрузивных тел неправильной формы.

Судя по характеру положительной магнитной аномалии (рис. 5), все выходы гранитоидов принадлежат к одному крупному интрузиву линейного типа, вытянутому в северо-восточном направлении более чем на 40 км и обнажающемуся на современном уровне эрозионного среза в виде серии небольших по размерам штокообразных массивов. Наиболее крупный из них, расположенный в районе перевала Гольдского (рис. 8), занимает площадь около 16 км^2, остальные – не более 2–4 км^2. В верхних частях Гольдского массива – на водоразделах и склонах – установлены выходы кварцевых диорит-порфиров и гранодиорит-порфиров, а в урезах ручьев, вниз по рельефу в сторону долины р. Манома получили развитие полнокристаллические порфировидные

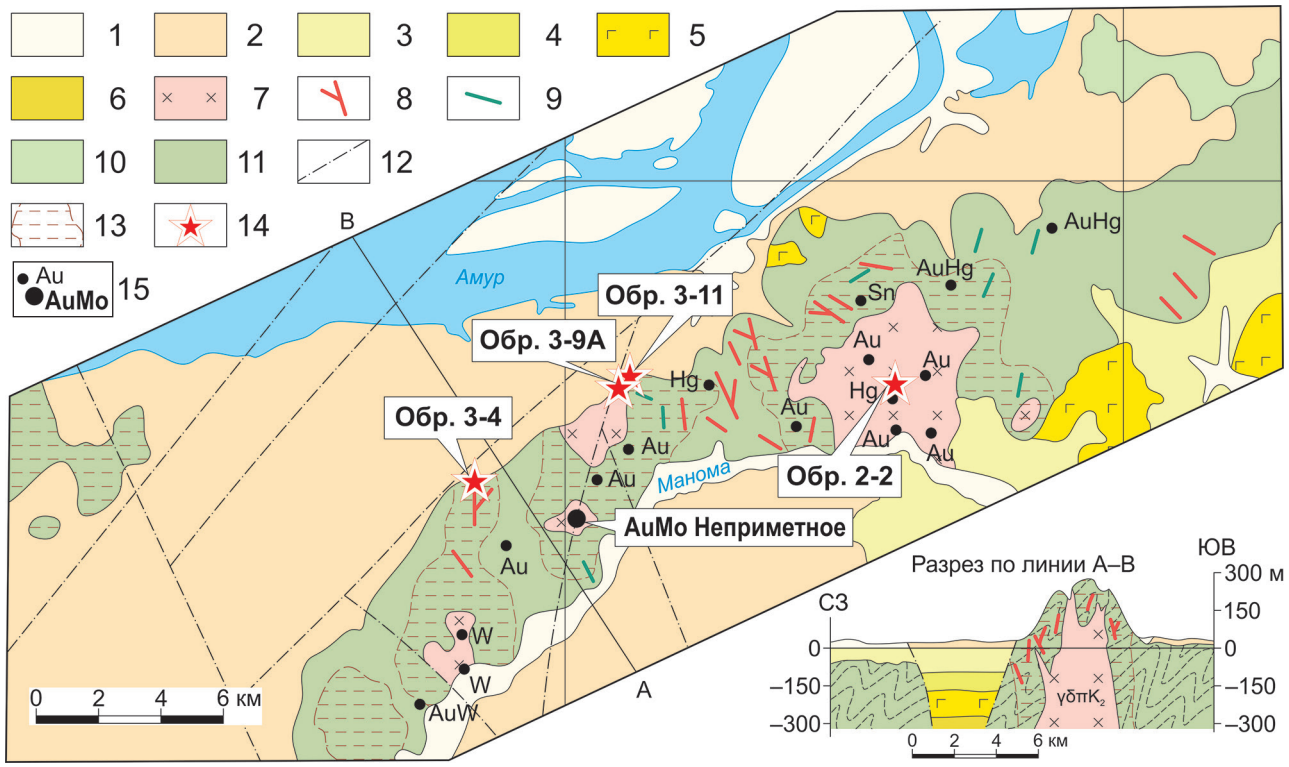


Рис. 8. Схема геологического строения потенциального рудного поля Гион

1–2 – четвертичные отложения (*1* – верхнечетвертичные отложения: речные аллювиальные и делювиальные отложения русел, поймы и надпойменных террас, *2* – нижне- и среднечетвертичные отложения: пески, галечники, суглинки, супеси, алевриты, глины с редкой галькой и гравием); *3–6* – неогеновые образования (*3* – плиоцен: Приамурская свита – пески, гравийники, галечники, глины, *4–6* – миоцен: *4* – Головинская свита – глины, алевриты, пески (на разрезе), *5* – Кизинская свита – покровы базальтов, *6* – Ушумунская свита – глины, алевриты, пески, прослои углей (на разрезе); *7–9* – магматические образования позднемелового Нижнеамурского интрузивного комплекса (*7* – диорит-порфиры, кварцевые диорит-порфиры и гранодиорит-порфиры, *8* – дайки кварцевых диорит-порфиров и гранодиорит-порфиров, *9* – дайки габбродиоритов и диорит-порфиров); *10–11* – нижнемеловые терригенные и туфогенно-терригенные отложения (*10* – Ларгасинская свита – песчаники, конгломераты, гравелиты, алевролиты, *11* – Уктурская свита, верхняя подсвита: песчаники, алевролиты, конгломераты, гравелиты, туфы и лавы андезитов); *12* – тектонические нарушения (установленные и предполагаемые); *13* – участки проявления интенсивных гидротермально-метасоматических изменений пород (окварцевание, сульфидизация, биотитизация, эпидотизация, хлоритизация, серицитизация и др.); *14* – места отбора образцов на изотопно-геохронологические и изотопно-геохимические исследования; *15* – проявления рудной минерализации (рудопроявления и пункты минерализации)

гранодиориты и кварцевые диориты. Нередко в этом интрузиве можно наблюдать небольшие (до 0,5 км^2) останцы вмещающих осадочных пород.

На хр. Гион с коренными выходами гранитоидов ассоциируют многочисленные дайки гранодиорит-порфиров, кварцевых диорит-порфиров и диоритовых порфиритов. Мощность даек варьирует от 1 м до первых десятков метров. Их простирание преимущественно северо-западное и субмеридиональное. Контакты дайковых тел крутые, иногда с апофизами во вмещающие породы.

На контакте гранитоидов с вмещающими вулканогенно-терригенными породами, последние несут отчетливые признаки интенсивного ороговикования, выраженного в виде разнообразных минеральных парагенезисов биотитового, кварц-биотитового, кварц-полевошпат-биотитового, кварц-биотит-кордиеритового, кварц-серицит-биотитового и кварц-амфибол-биотитового состава (рис. 9). При этом кварц-биотитовые и биотитовые разности роговиков заметно превалируют над остальными. Интенсивность биотитизации зависит от двух факторов: 1) от расстояния до контакта с гранитоидами и 2) от состава вмещающих пород. Наиболее сильно ей подвержены субаркозовые песчаники, алевропесчаники и алевролиты, а также эффузивные породы среднего состава. В узких приконтактовых зонах получили развитие кварц-полевошпат-биотитовые и пятнистые кварц-биотит-кордиеритовые роговики, которые во все стороны от контакта с гранитоидами постепенно сменяются обширными площадными ореолами биотитизации, размеры которых нередко достигают первых десятков км^2 (рис. 8).

Среди этих площадных ореолов ороговикования и биотитизации установлены многочисленные более локальные по размерам участки пропилитизации и березитизации, контролирующие размещение в пространстве зон штокверкового окварцевания линейного и ареального типов, несущих прожилково-вкрапленную сульфидную (пирит, пирротин, халькопирит, молибденит и т. д.) минерализацию (рис. 9). Именно к таким участкам и приурочены небольшие (площадью около 1 км^2) шлиховые ореолы со знаковым содержанием золота. Судя по величине обломков кварца в делювии

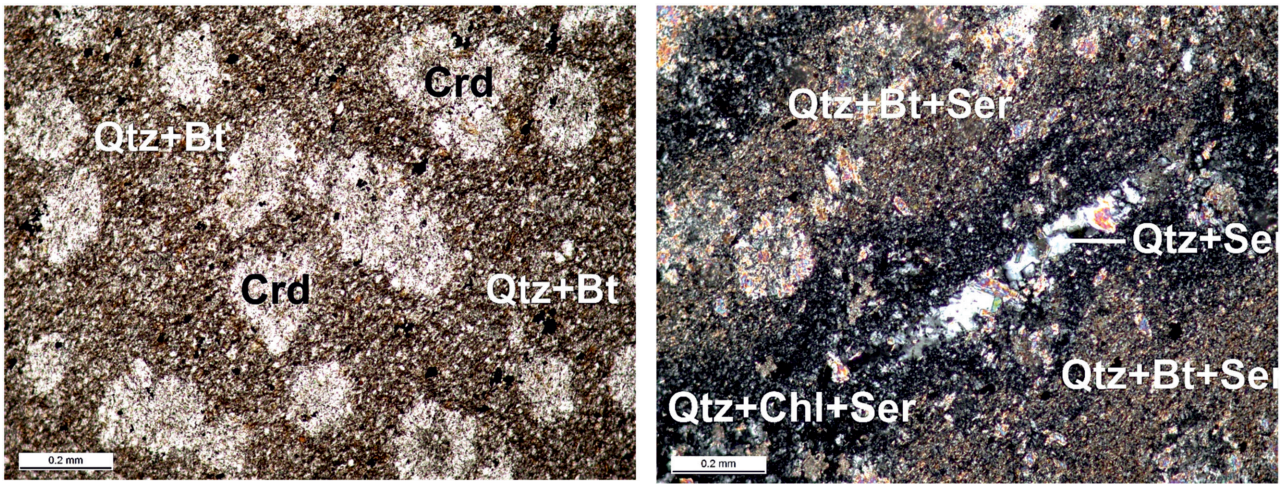


Рис. 9. Микрофотографии прозрачно-полированных шлифов, характеризующих особенности проявления гидротермально-метасоматических изменений в алевролитах ларгасинской свиты

Слева – общий вид кварц-биотит-кордиеритовых роговиков, получивших развитие по алевролитам Ларгасинской свиты (Обр. 1-1. ув. ×10, николи =).

Справа – характер проявления процесса березитизации в орговикованных алевролитах Ларгасинской свиты. Кварц-серицитовые прожилки секут мелкокристаллические агрегаты кварц-биотит-кордиеритовых роговиков. При этом, вдоль прожилков, симметрично с обеих сторон, получили развитие метасоматические «оторочки» кварц-серицит-хлоритового и кварц-хлоритового составов, а метакристаллы кордиерита в кварц-биотитовом матриксе роговиков повсеместно замещаются агрегатными псевдоморфозами кварц-серицитового и хлорит-хлорит-серицитового состава (Обр. 1-1. ув. ×10, николи +).

Здесь и далее, на рис. 11: Qtz – кварц, Chl – хлорит, Ser – серицит, Ep – эпидот, Pl – плагиоклаз, Hb – роговая обманка, Bt – биотит, Kfs – калиевый полевой шпат, Crd – кордиерит

и аллювии, в пределах таких зон жильно-штокверкового окварцевания и локализуется основная масса кварцевых жил мощностью до первых десятков см. Кварц в них серый, сахаровидно-белый, массивного сложения, трещиноватый, содержащий густую вкрапленность пирита и других сульфидов. Наиболее широко такие кварцевые жилы распространены в эндо- и экзоконтактах большинства обнажающихся массивов гранитоидов, а также в пределах рудопроявления Неприметное.

Рудопроявление *Неприметное* приурочено к минерализованным гранитоидам Нижнеамурского комплекса, которыми сложен небольшой (около 2 км^2) изометричный по форме куполовидный интрузив в центральной части рудного поля. Гранитоиды здесь прорывают терригенные отложения Уктурской свиты, представленные сильно ороговикованными субаркозовыми и полимиктовыми песчаниками, реже алевропесчаниками и алевролитами.

Вблизи контакта с вмещающими породами гранодиорит-порфиры интенсивно пропилитизированы, березитизированы и пиритизированы. В центральной части участка проходит крупное разрывное нарушение северо-восточного простирания. Здесь наблюдается наибольшее количество обломков и глыб кварца, а также повышенные содержания золота и киновари в делювиальных развалах пород. В кварце установлены скопления крупных (до 3–5 мм) кристаллов пирита, галенита, халькопирита и чешуек молибденита. Из-за плохой обнаженности в коренном залегании жилы кварца не вскрыты. Рудные минералы на участке рудопроявления представлены золотом, халькопиритом, базовисмутитом, молибденитом и шеелитом. Вкрапленность этих минералов выявлена главным образом в кварцевых жилах и прожилках, реже в минерализованных гранодиорит-порфирах и зеленовато-серых кварцитах по роговикам. Золото в этих пиритизированных породах отмечается спорадически с содержаниями, достигающими величин в 0,1–1,0 г/т. Содержания молибдена нередко поднимаются до значений 0,1–0,2 %. Тогда как концентрации меди, свинца и цинка варьируют от 0,05 до 0,4 %, а вольфрама и висмута – от 0,005 до 0,06 %. В отдельных шлиховых пробах из шурфов, пройденных в долине ручья, установлены единичные знаки золота, киновари и до 10–15 знаков базовисмутита. В таких же количествах эти минералы отмечаются и в шлиховых пробах из делювия. Металлометрическим опробованием установлены ореолы повышенных содержаний золота (0,01–0,03 г/т), тяготеющие к разрывному нарушению северо-восточного простирания. В пределах этого же нарушения локализован вторичный ореол рассеяния молибдена с содержанием 0,001–0,004 %.

Проведенные авторами данной статьи в 2021 г. полевые работы с пробоотбором и последующей лабораторно-аналитической обработкой представительного каменного материала позволили получить новые данные, касающиеся минерало-го-петрографических, петрогеохимических, изотопно-геохронологических и изотопно-геохимических особенностей гранитоидов и вмещающих их вулканогенно-терригенных пород раннемелового

возраста, участвующих в строении потенциального рудного поля Гион.

Всего в ходе полевых работ было отобрано 46 штуфных геохимических проб, сколков для изготовления прозрачно-полированных шлифов и образцов горных пород, включая четыре представительных образца гранитоидов весом 3–4 кг каждый для проведения изотопно-геохронологических и изотопно-геохимических исследований в ЦИИ ВСЕГЕИ (рис. 8). Определение петрогенных и малых элементов осуществлялось в ЦЛ ВСЕГЕИ методами ICP-MS, атомной абсорбции и рентгено-спектрального флюоресцентного анализа (см. пределы обнаружения элементов в табл. 1).

В табл. 2 приводится развернутая петрохимическая и геохимическая характеристика в различной степени гидротермально измененных пород рудного поля Гион, представленных обширными ореолами орговикования, пропилитизации и березитизации, обусловленными процессом внедрения и длительного становления гранитоидного плутона Гион (рис. 8).

Таблица 2

Петрохимические и геохимические особенности в различной степени гидротермально измененных пород рудного поля Гион

Оксиды, малые элементы, %	Ороговикование		Пропилитизация		Березитизация			
	по алевролитам		по андезитам и андезибазальтам		по субаркозовым алевропесчаникам		по гранодиорит-порфирам	
	I–III	VII–IX	I–III	VII–IX	I–III	VII–IX	I–III	VII–IX
SiO_2	75,23	66,40	54,03	50,73	73,47	75,37	65,10	67,40
Al_2O_3	13,10	16,30	14,73	13,87	13,43	12,57	16,20	16,50
TiO_2	0,44	0,73	1,07	1,32	0,51	0,48	0,58	0,37
$Fe_2O_{3общ}$	2,76	5,08	8,36	10,02	3,15	2,82	5,28	4,07
MnO	0,04	0,07	0,10	0,23	0,05	0,07	0,08	0,06
MgO	1,01	1,75	7,24	9,49	1,19	0,82	2,19	1,54
CaO	0,57	2,36	6,86	7,63	0,83	1,49	2,02	1,99
Na_2O	2,41	2,59	3,06	2,28	2,67	2,25	4,07	3,47
K_2O	3,03	3,44	2,07	1,75	2,98	2,87	2,44	2,18
P_2O_5	0,05	0,31	0,41	0,47	0,08	0,05	0,13	0,14
ппп	1,37	0,99	1,94	2,10	1,52	1,18	1,80	2,11
Сумма	99,95	100,00	99,85	99,87	99,87	99,97	99,90	99,80
Fe_2O_3	0,86	0,89	2,50	3,13	1,35	1,10	2,13	2,58
FeO	1,71	3,78	5,29	6,21	1,62	1,55	2,84	1,34
Sc, г/т	4,0	10,6	8,5	10,1	6,5	3,2	6,4	2,7
V	55,0	79,0	175,0	206,7	70,0	59,0	110,0	60,0
Cr	26,5	28,0	127,3	223,3	31,7	31,0	17,0	18,0
Ni	16,0	15,5	70,8	86,0	19,0	16,3	16,0	22,0
Co	8,3	7,1	21,5	19,7	8,1	8,3	8,1	5,2
Pd	0,007	0,014	0,040	0,035	0,009	0,015	0,029	0,030
Pt	0,008	0,030	0,016	0,012	0,026	0,016	0,010	0,005
Au	0,006	0,020	0,018	0,009	0,016	0,021	0,004	0,008
Ag	0,099	0,048	0,108	0,087	0,084	0,324	0,035	0,120
Cu	14,3	15,7	198,9	48,7	15,4	13,7	26,9	70,5
Pb	7,8	13,7	5,6	6,6	10,4	18,0	11,9	148,0
Zn	32,4	64,0	47,0	158,0	31,5	24,3	57,8	249,0
As	8,3	2,8	4,8	3,9	15,1	5,5	2,7	11,4
Sb	0,4	0,2	0,31	0,44	0,4	0,6	0,2	0,2
Bi	0,7	0,2	0,25	0,41	0,3	0,6	0,1	0,2
Cd	0,1	0,1	0,13	0,21	0,1	0,1	0,1	0,1
Te	0,6	0,2	0,40	0,20	0,3	0,3	0,2	0,2
Li	10,0	10,0	10,0	10,0	12,3	10,0	10,0	17,0
Rb	104,2	144,5	79,9	49,5	100,6	90,3	73,1	37,9
Cs	3,5	8,0	4,5	0,9	3,9	2,7	2,9	0,8
Ba	640,0	545,0	570,0	466,7	646,7	656,7	670,0	790,0

Окончание табл. 2

Оксиды, малые элементы, %	Ороговикование		Пропилитизация		Березитизация			
	по алевролитам		по андезитам и андезибазальтам		по субаркозовым алевропесчаникам		по гранодиорит-порфирам	
	I–III	VII–IX	I–III	VII–IX	I–III	VII–IX	I–III	VII–IX
Sr	192,0	220,0	227,5	160,0	135,0	213,3	130,0	54,0
Zr	204,3	208,5	136,3	130,3	196,3	233,3	123,0	105,0
Hf	5,6	5,5	3,2	3,3	5,2	6,2	3,1	2,8
Ta	0,7	1,0	0,6	0,7	0,7	0,7	0,5	0,4
Nb	9,0	13,5	10,5	11,7	9,1	8,9	7,2	5,6
Th	8,6	11,5	7,7	7,0	8,8	6,9	7,7	6,7
U	2,1	2,4	1,6	1,4	2,0	1,9	1,5	1,9
Mo	1,0	1,0	0,8	0,6	1,4	0,6	0,6	1,2
W	1,3	2,7	1,6	1,4	2,1	2,0	0,6	1,4
Sn	2,1	1,7	2,6	1,6	2,2	6,3	0,8	1,1
Be	1,6	0,8	1,3	0,9	1,6	1,7	1,1	1,8
Y	16,1	28,9	15,9	17,4	16,8	15,9	11,0	9,7
La	24,28	33,90	33,70	32,57	25,13	18,74	23,60	22,60
Ce	51,33	71,75	69,38	65,50	52,17	39,83	47,00	36,80
Pr	5,78	8,18	8,31	8,09	5,96	4,70	5,35	4,31
Nd	20,25	29,55	29,63	30,53	20,33	16,71	18,40	13,90
LREE	**101,6**	**143,4**	**141,0**	**136,7**	**103,6**	**79,9**	**94,4**	**77,6**
Sm	4,11	6,49	6,01	6,17	3,99	3,33	3,65	2,88
Eu	0,76	1,25	1,59	1,69	0,75	0,81	0,95	0,74
Gd	3,46	5,93	4,98	5,21	3,32	3,04	3,02	2,38
Tb	0,53	0,91	0,64	0,73	0,50	0,48	0,45	0,34
Dy	2,82	4,83	3,09	3,48	2,95	2,72	2,12	1,69
Ho	0,54	0,93	0,53	0,63	0,56	0,54	0,45	0,29
MREE	**12,2**	**20,3**	**16,8**	**17,9**	**12,1**	**10,9**	**10,6**	**8,3**
Er	1,67	2,87	1,61	1,70	1,67	1,66	1,16	0,85
Tm	0,27	0,41	0,23	0,24	0,28	0,27	0,17	0,12
Yb	1,79	2,69	1,36	1,59	1,86	1,90	1,14	0,74
Lu	0,25	0,39	0,20	0,21	0,28	0,27	0,17	0,13
HREE	**3,98**	**6,35**	**3,39**	**3,73**	**4,09**	**4,11**	**2,64**	**1,84**
ΣREE	**117,8**	**170,1**	**161,2**	**158,3**	**119,8**	**95,0**	**107,6**	**87,8**
n	4	2	4	3	3	3	4	4

Примечание. I–IX степень ГМ изменения: I–III – слабая–умеренная (<15 % новообразований), VII–IX – интенсивная–полная (>50 % новообразований); *n* – количество проб.

В табл. 3 суммирована информация о средневзвешенных значениях коэффициентов привноса–выноса петрогенных и малых элементов в ходе формирования главных типов гидротермально измененных пород рудного поля Гион.

Как показано в табл. 2–3, для ореолов березитизации, получивших развитие как по гранитоидам Нижнеамурского комплекса, так и по ороговикованным субаркозовым алевропесчаникам Уктурской свиты, наиболее характерным является многократный (по сравнению с малоизмененными породами) привнос в среду минералообразования прежде всего таких элементов как свинец, цинк, мышьяк, серебро, медь, кадмий, висмут, вольфрам, молибден и золото. Тенденцию к выносу испытывает ряд сидерофильных (Sc, V, Co, Ni, Pt) и литофильных (Rb, Cs, Sr, Nb, Th и REE+Y) элементов, тогда как остальные компоненты ведут себя индифферентно.

Для рудного поля Гион геохимическая формула, отражающая уровень концентрации элементов-примесей в ходе развития процесса березитизации по гранитоидам Нижнеамурского комплекса, выглядит следующим образом: $\mathbf{Pb_{+1144}}$ $\mathbf{Zn_{+331}}$ $\mathbf{As_{+329}}$ $\mathbf{Ag_{+243}}$ Cu_{+162} Cd_{+124} W_{+122} Mo_{+100} (Au_{+50} Bi_{+50}). То есть геохимически они мало чем отличаются от околорудных

Таблица 3

Привнос–вынос петрогенных и малых элементов (ΔC) в ходе формирования главных типов гидротермально измененных пород рудного поля Гион

Оксиды, малые элементы, %	Роговики	Пропилиты	Березиты	
	по алевролитам	по андезитам и андезибазальтам	по субаркозовым алевропесчаникам	по гранодиорит-порфирам
SiO_2	–12	–6	3	4
Al_2O_3	24	–6	–6	2
TiO_2	66	24	–6	–36
Fe_2O_3	3	25	–19	21
FeO	121	18	–4	–53
MnO	84	124	31	–31
MgO	73	31	–31	–30
CaO	316	11	79	–1
Na_2O	7	–25	–16	–15
K_2O	14	–15	–4	–11
P_2O_5	470	15	–35	8
CO_2+H_2O	–28	8	–23	17
Sc	168	18	–50	–58
V	44	18	–16	–45
Cr	6	76	–2	6
Ni	–3	22	–14	38
Co	–14	–9	2	–36
Pd	86	–13	65	3
Pt	291	–27	–40	–45
Au	248	–49	28	50
Ag	–52	–19	284	243
Cu	10	–76	–11	162
Pb	77	17	73	1144
Zn	97	236	–23	331
As	–66	–19	–64	329
Sb	–45	43	44	–17
Bi	–69	66	132	50
Cd	–21	58	25	124
Te	–66	–50	–16	0
Li	0	0	–19	70
Rb	39	–38	–10	–48
Cs	125	–79	–32	–73

Оксиды, малые элементы, %	Роговики	Пропилиты	Березиты	
	по алевролитам	по андезитам и андезибазальтам	по субаркозовым алевропесчаникам	по гранодиорит-порфирам
Ba	–15	–18	2	18
Sr	15	–30	58	–58
Zr	2	–4	19	–15
Hf	–3	2	19	–9
Ta	43	19	–3	–13
Nb	50	11	–2	–22
Th	34	–9	–21	–12
U	14	–14	–9	29
Mo	3	–33	–56	100
W	104	–11	–2	122
Sn	–19	–37	186	41
Be	–51	–27	4	64
Y	80	10	–5	–12
La	40	–3	–25	–4
Ce	40	–6	–24	–22
Pr	41	–3	–21	–19
Nd	46	3	–18	–24
LREE	41	–3	–23	–18
Sm	58	3	–17	–21
Eu	66	6	8	–22
Gd	71	5	–9	–21
Tb	71	15	–4	–24
Dy	71	13	–8	–20
Ho	71	20	–4	–36
MREE	66	6	–10	–22
Er	72	5	0	–27
Tm	53	3	–1	–29
Yb	50	17	2	–35
Lu	52	6	–6	–24
HREE	60	10	0	–30
ΣREE	44	–2	–21	–18
n	*6*	*7*	*6*	*8*

Примечание. Коэффициент привноса–выноса элементов (ΔC) приведен в процентах и рассчитывался по формуле: $\Delta C = (Ci–C)/C \times 100$ %, где Ci – содержание элемента в интенсивно/полностью измененной породе, C – содержание элемента в минимально измененной породе. Для главных компонентов расчет баланса вещества осуществлялся атомно-объемным методом с учетом плотностных характеристик исходных пород и замещающих их метасоматитов (Казицын, Рудник, 1968); *n* – общее количество проб в сравниваемых выборках (см. табл. 2).

березитов-филлизитов большинства порфировых месторождений России и стран СНГ (Малмыж, Песчанка, Аксуг, Михеевское, Томинское, Актогай, Бощекуль, Медный Коунрад, Коксай и др.).

Пропилиты, роговики и биотититы, как «подрудные» ГМ-образования, имеют принципиально иную геохимическую специализацию. Из числа рассеянных элементов тенденцию к накоплению в пропилитах-роговиках, развитых по терригенным и вулканогенным породам нижнего мела, испытывают прежде всего сидерофильные (Cr, Ni, V, Sc, Pd, Pt), а также ряд халькофильных (Au, Pb, Zn) и литофильных (Rb, Cs, Nb, W, REE+Y) элементов.

Результаты изотопно-геохронологических исследований. Для определения радиологического возраста магматических образований потенциального рудного поля Гион локальным U-Pb

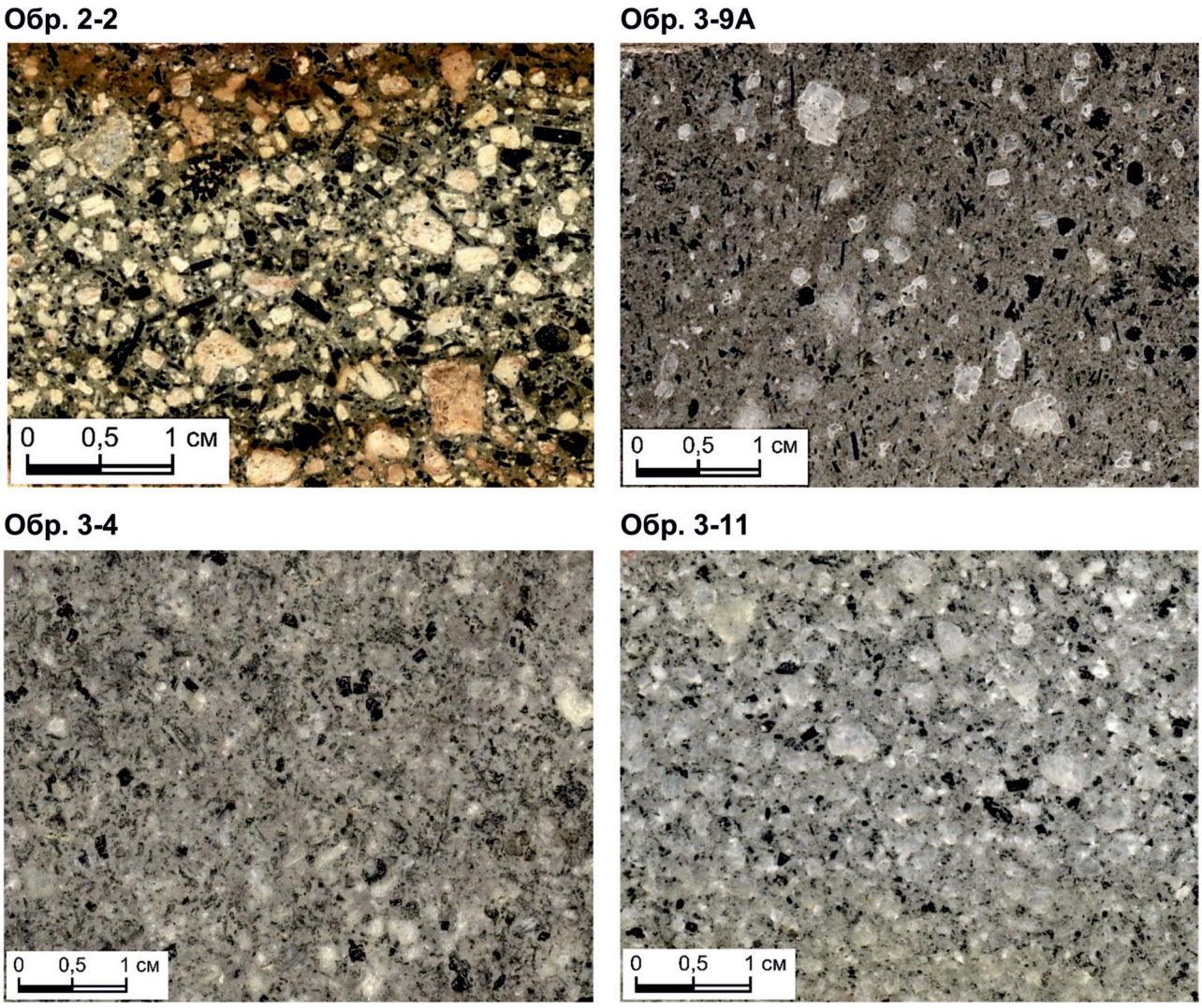


Рис. 10. Фотографии изученных образцов магматических пород рудного поля Гион

Образцы*:* 2-2 – биотит-роговообманковый кварцевый диорит-порфир, 3-4 – биотитовый гранодиорит-порфир, 3-9А – биотит-роговообманковый кварцевый диорит-порфир, 3-11 – биотит-роговообманковый гранодиорит-порфир

методом в ЦИИ ВСЕГЕИ было изучено четыре представительных образца под номерами 2-2, 3-4, 3-9А и 3-11, характеризующих гранитоидные образования из центральной и северной частей района работ (рис. 10, 11).

Обр. 2-2 отобран из крупноглыбовых однородных по составу элювиально-делювиальных развалов, слагающих восточный борт руч. Гольдский (рис. 8). Образец представляет собой средне-мелкокристаллический биотит-роговообманковый *кварцевый диорит-порфир*. Порода состоит на 45–55 % из порфировых выделений плагиоклаза (андезина и олигоклаза), роговой обманки и биотита, среди которых плагиоклаз заметно превалирует над темноцветными минералами. Основная масса породы сложена кварцем (10–15 %), андезином (15–20 %), биотитом и роговой обманкой (5–10 %), а также новообразованными минералами стадии пропилитизации – 5–10 % (эпидот, хлорит, пренит, альбит). Биотит практически полностью замещен агрегатными псевдоморфозами хлорит-эпидотового и хлорит-пренитового составов, к которым нередко приурочены микровключения пирита и магнетита. Порфировые вкрапленники андезина в незначительной степени альбитизированы и серицитизированы.

Обр. 3-4 отобран из коренных выходов гранитоидов, слагающих небольшое по размерам интрузивное тело, вскрытое крутым уступом-расчисткой строящегося газопровода в северо-западной части рудного поля. По данным микроскопического изучения прозрачно-полированных шлифов образец представляет собой средне-мелкокристаллический биотит-роговообманковый *гранодиорит-порфир*, состоящий на 15–20 % из кварца, на 40–45 % – плагиоклаза (олигоклаза), на 15–20 % – биотита и роговой обманки и на 5–10 % – новообразованных минералов стадии пропилитизации (эпидот, хлорит, серицит, карбонат). Как и в предыдущем случае, на долю порфировых выделений в составе породы приходится не менее 40–45 % от их объема. Однако здесь, в отличие от предыдущего образца, в составе фенокристаллов темноцветные минералы (биотит и роговая обманка) и анде-

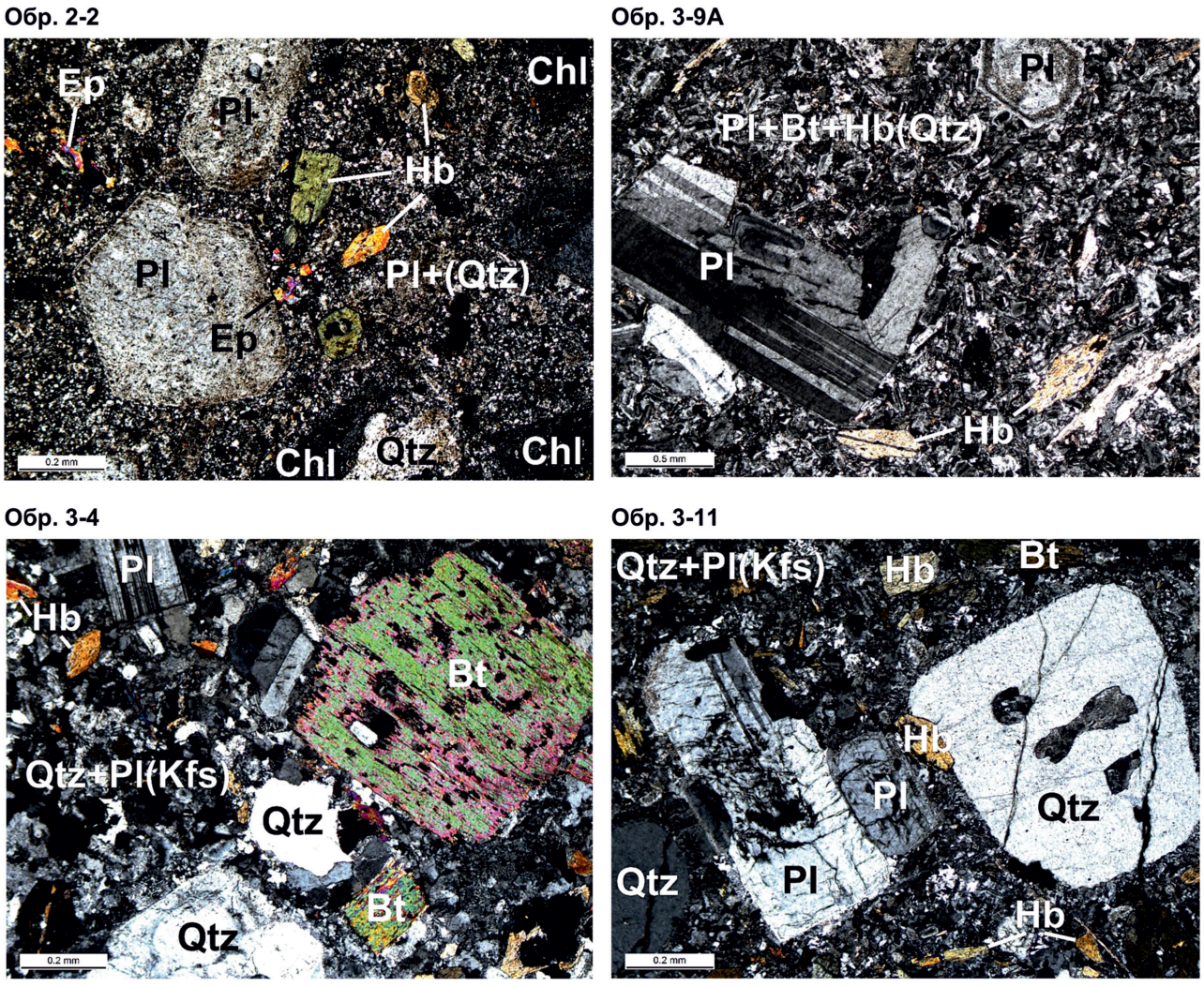


Рис. 11. Микрофотографии прозрачно-полированных шлифов (ППШ), характеризующих общий вид и особенности внутреннего строения изученных образцов магматических пород рудного поля Гион

ППШ: 2-2 – биотит-роговообманковый кварцевый диорит-порфир (ув. ×10, николи +), 3-4 – биотитовый гранодиорит-порфир (ув. ×10, николи +), 3-9А – биотит-роговообманковый кварцевый диорит-порфир (ув. ×4, николи +), 3-11 – биотит-роговообманковый гранодиорит-порфир (ув. ×10, николи +)

зин-олигоклаз находятся в примерно равных пропорциях.

Обр. 3-9А и ***3-11*** отобраны из коренных выходов гранитоидов, слагающих овальное по форме интрузивное тело размером 4 км^2 в северной части рудного поля, где оно, как и в предыдущем случае, вскрыто стенкой уступа строящегося газопровода.

Обр. 3-9А представляет собой средне-мелкокристаллический биотит-роговообманковый *кварцевый диорит-порфир*. Порода состоит на 35–40 % из порфировых вкрапленников плагиоклаза (андезина), роговой обманки и, в меньшей степени, биотита, среди которых плагиоклаз заметно преобладает над темноцветными минералами. Мелкокристаллическая основная масса породы сложена кварцем (5–15 %), андезином (15–20 %) и роговой обманкой (5–10 %), а также новообразованными минералами стадии пропилитизации – 2–5 % (эпидот, хлорит, альбит).

По данным микроскопического изучения шлифов, *обр. 3-11* представляет собой средне-мелкокристаллический биотит-роговообманковый *гранодиорит-порфир*, состоящий на 15–25 % из кварца, на 40–45 % – плагиоклаза (олигоклаза–андезина), на 15–20 % – биотита и роговой обманки и на 5–10 % – новообразованных минералов стадии пропилитизации и березитизации (кварц, хлорит, серицит, карбонат, пирит, халькопирит). Как и в случае с вышеописанными образцами, здесь на долю порфировых выделений в составе породы также приходится не менее 40–45 % от их объема с примерно близким количественным соотношением между кварц-плагиоклазовой и темноцветной составляющими. Из числа изученных образцов обр. 3–11 является единственным, в составе которого была выявлена густая вкрапленность мелкокристаллического пирита объемом до 1,5 % с редкими микровключениями халькопирита, обусловленная проявлением в породе березитовых новообразований кварц-серицит-карбонат-хлоритового состава.

Всего в ЦИИ ВСЕГЕИ на вторично-ионном микрозонде SIMS SHRIMP-IIe было выполнено

Таблица 4

Результаты изучения U-Pb изотопной системы акцессорных цирконов из интрузивных пород рудного поля Гион

№ п/п	Образец, зерно, кратер	$^{206}Pb_c$, %	Содержание, г/т			$^{232}Th/^{238}U$	Возраст (1), млн лет		Изотопные отношения (1)						КК
			U	Th	$^{206}Pb^*$		$^{206}Pb^*/^{238}U$		$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	± %	$^{207}Pb^*/^{235}U$	± %	$^{206}Pb^*/^{238}U$	± %	
Обр. 2-2															
1	1,1	1,21	804	730	8,34	0,94	76,68	± 0,91	0,0507	6,7	0,0837	6,8	0,01197	1,2	0,176
2	2,1	0,44	771	753	8,11	1,01	78,04	± 0,92	0,0466	6,3	0,0783	6,4	0,01218	1,2	0,187
3	3,1	0,48	699	683	7,54	1,01	79,92	± 0,96	0,0466	6,7	0,0802	6,8	0,01247	1,2	0,178
4	4,1	1,12	517	336	5,40	0,67	77,3	± 1,0	0,0498	9,3	0,0828	9,4	0,01206	1,3	0,141
5	5,1	1,21	446	349	4,64	0,81	76,7	± 1,1	0,0492	10,0	0,0812	10,0	0,01198	1,4	0,136
6	6,1	1,49	388	216	4,13	0,58	78,5	± 1,1	0,0504	11,0	0,0852	11,0	0,01226	1,5	0,129
7	7,1	0,60	608	496	6,11	0,84	74,31	± 0,94	0,0463	8,3	0,0739	8,4	0,01159	1,3	0,151
8	8,1	1,06	676	559	6,84	0,85	74,94	± 0,93	0,0503	7,2	0,0811	7,3	0,01169	1,3	0,171
9	9,1	1,16	499	359	5,23	0,74	77,5	± 1,0	0,0496	9,3	0,0826	9,4	0,01210	1,4	0,144
10	10,1	1,27	299	147	4,49	0,51	110,6	± 1,6	0,0513	8,9	0,1220	9,0	0,01730	1,4	0,157
11	11,1	1,23	501	378	5,15	0,78	75,9	± 1,0	0,0501	9,0	0,0818	9,1	0,01184	1,3	0,147
12	12,1	0,67	522	100	5,50	0,20	77,9	± 1,0	0,0460	9,9	0,0771	10,0	0,01216	1,3	0,134
13	13,1	0,29	795	890	8,37	1,16	78,12	± 0,93	0,0454	6,5	0,0763	6,6	0,01219	1,2	0,181
14	14,1	0,70	535	273	5,32	0,53	73,85	± 0,99	0,0497	5,9	0,0789	6,0	0,01152	1,3	0,223
Обр. 3-4															
15	1,1	0,21	927	533	9,98	0,59	80,1	± 1,1	0,0483	3,7	0,0834	3,9	0,01251	1,3	0,344
16	2,1	0,36	507	268	5,53	0,55	81,0	± 1,2	0,0472	5,6	0,0823	5,8	0,01264	1,4	0,248
17	3,1	0,26	697	427	7,65	0,63	81,6	± 1,1	0,0466	4,4	0,0818	4,6	0,01273	1,3	0,288
18	4,1	0,32	573	379	6,34	0,68	82,2	± 1,1	0,0485	5,0	0,0858	5,2	0,01284	1,4	0,266
19	5,1	0,18	618	312	6,65	0,52	80,2	± 1,1	0,0471	5,6	0,0813	5,7	0,01251	1,4	0,238
20	6,1	0,32	602	285	6,52	0,49	80,6	± 1,1	0,046	5,2	0,0798	5,4	0,01259	1,4	0,256
21	7,1	0,16	1022	905	11,10	0,92	80,7	± 1,0	0,0504	3,0	0,0875	3,3	0,01259	1,3	0,387
22	8,1	0,27	707	584	7,87	0,85	82,7	± 1,1	0,0449	5,4	0,0800	5,5	0,01292	1,3	0,241
23	9,1	0,41	478	222	5,19	0,48	80,7	± 1,2	0,0459	6,4	0,0797	6,5	0,0126	1,5	0,226
24	10,1	0,30	510	406	5,52	0,82	80,4	± 1,2	0,0481	4,9	0,0832	5,1	0,01256	1,4	0,284
25	11,1	0,19	830	612	8,84	0,76	79,3	± 1,0	0,0463	3,6	0,0791	3,8	0,01238	1,3	0,340
26	12,1	0,41	479	255	5,21	0,55	80,9	± 1,2	0,0474	6,4	0,0825	6,6	0,01263	1,5	0,224
27	13,1	0,001	422	273	4,65	0,67	82,2	± 1,2	0,0485	4,0	0,0858	4,2	0,01283	1,5	0,350
28	14,1	0,41	768	499	8,45	0,67	81,7	± 1,1	0,0458	5,2	0,0806	5,3	0,01275	1,3	0,248
29	15,1	0,24	770	589	8,43	0,79	81,5	± 1,1	0,0474	4,1	0,0831	4,3	0,01272	1,3	0,303
Обр. 3-9А															
30	1,1	2,34	447	336	4,99	0,78	81,7	± 1,2	0,0525	12,0	0,0920	12,0	0,01276	1,4	0,124
31	2,1	1,37	637	630	7,08	1,02	81,9	± 1,5	0,0487	8,9	0,0859	9,1	0,01279	1,9	0,208
32	3,1	1,05	739	757	7,98	1,06	80,02	± 0,94	0,0516	6,1	0,0889	6,2	0,01249	1,2	0,191
33	5,1	0,85	567	382	5,99	0,70	78,31	± 0,98	0,0493	6,8	0,0831	6,9	0,01222	1,3	0,183
34	6,1	0,68	858	588	9,47	0,71	81,68	± 0,94	0,0464	6,4	0,0816	6,5	0,01275	1,2	0,178
35	7,1	1,72	321	256	3,43	0,82	78,6	± 1,3	0,0510	16,0	0,0860	16,0	0,01227	1,6	0,102
36	8,1	0,65	519	358	5,57	0,71	79,4	± 1,0	0,0462	9,1	0,0789	9,2	0,01239	1,3	0,143
37	9,1	1,02	692	603	7,12	0,90	76,05	± 0,93	0,0482	8,1	0,0789	8,1	0,01187	1,2	0,152
38	10,1	0,39	346	172	15,40	0,51	325,0	± 3,7	0,0527	3,4	0,3760	3,6	0,05170	1,2	0,325
39	11,1	1,10	349	165	3,71	0,49	78,3	± 1,2	0,0461	14,0	0,0780	14,0	0,01221	1,5	0,111
40	12,1	0,76	477	307	4,99	0,66	77,3	± 1,0	0,0464	9,8	0,0772	9,9	0,01206	1,4	0,136
41	13,1	0,21	1191	1489	12,20	1,29	76,33	± 0,84	0,0461	4,6	0,0757	4,7	0,01191	1,1	0,237
42	15,1	0,51	587	349	6,10	0,61	76,9	± 1,0	0,0455	8,6	0,0753	8,8	0,01201	1,4	0,154

Окончание табл. 4

№ п/п	Образец, зерно, кратер	$^{206}Pb_c$, %	Содержание, г/т			$^{232}Th/^{238}U$	Возраст (1), млн лет		Изотопные отношения (1)						КК
			U	Th	$^{206}Pb^*$		$^{206}Pb^*/^{238}U$		$^{207}Pb^*/^{206}Pb^*$	± %	$^{207}Pb^*/^{235}U$	± %	$^{206}Pb^*/^{238}U$	± %	
Обр. 3-11															
43	1,1	0,17	1063	895	11,4	0,87	79,6	± 0,97	0,0478	3,1	0,0819	3,3	0,01243	1,2	0,369
44	4,1	0,18	777	506	8,55	0,67	81,9	± 1,1	0,0480	3,4	0,0846	3,6	0,01278	1,3	0,357
45	5,1	0,35	549	214	5,9	0,40	79,8	± 1,1	0,0470	5,5	0,0808	5,7	0,01246	1,4	0,251
46	6,1	0,31	598	357	6,46	0,62	80,4	± 1,1	0,0467	5,1	0,0807	5,3	0,01254	1,4	0,262
47	7,1	0,43	500	192	5,42	0,40	80,4	± 1,2	0,0473	5,6	0,0819	5,8	0,01256	1,4	0,248
48	8,1	0,37	410	185	4,34	0,47	78,8	± 1,2	0,0484	5,6	0,0821	5,8	0,0123	1,5	0,263
49	9,1	0,36	541	285	5,74	0,54	78,8	± 1,1	0,0481	5,9	0,0816	6,1	0,0123	1,4	0,233
50	10,1	0,19	659	525	7,16	0,82	80,8	± 1,1	0,0470	3,7	0,0817	3,9	0,01262	1,3	0,340
51	11,1	0,20	785	496	8,27	0,65	78,4	± 1,0	0,0465	3,7	0,0784	3,9	0,01223	1,3	0,335
52	13,1	0,23	795	509	8,63	0,66	80,8	± 1,0	0,0477	4,0	0,0829	4,2	0,01261	1,3	0,310
53	14,1	0,26	734	601	7,61	0,85	77,1	± 1,4	0,0465	4,4	0,0771	4,8	0,01204	1,8	0,385

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. 12.

U-Pb методом 53 локальных изотопных анализа по стандартной методике [48; 56]. С этой целью выбирались однородные, свободные от включений и трещин, участки в хорошо сохранившихся кристаллах цирконов, выделенных из вышеохарактеризованных образцов магматических пород потенциального рудного поля Гион.

Цирконы выделялись из раздробленных до 300 мкм образцов с последующим осаждением тяжелой фракции в бромоформе, извлечением немагнитной фракции и последующей ручной доочисткой под бинокулярной лупой. Для инструментальных исследований цирконы и стандарты имплантировались в эпоксидные шайбы и приполировывались до половины толщины кристаллов.

Результаты U-Pb датирования приведены в табл. 4 и показаны на рис. 12.

В целом изученные монофракции цирконов представляют собой гомогенную популяцию, сформировавшуюся в процессе магматической кристаллизации гранитоидного расплава. Общими минералогическими особенностями изученных зерен цирконов являются их сравнительно крупные размеры (250–400 мкм), эвгедральный, коротокопризматический облик (коэффициент удлинения равен 3–4), гиацинтовый габитус, ярко выраженная тонкая осцилляторная внутренняя зональность роста и хорошо сохранившиеся ребра и вершины кристаллов. Унаследованные ядра отсутствуют, имеются немногочисленные газово-жидкие и пылевые минеральные включения, степень резорбции поверхности граней выражена незначительно.

В результате выполненных изотопно-геохронологических исследований было установлено, что радиологический U-Pb возраст магматической кристаллизации пород потенциального рудного поля Гион оценивается интервалом **76–82 млн лет,** что соответствует кампанскому веку позднего мела (рис. 12). При этом кварцевые диорит-порфиры (обр. 2-2 и 3-9А) имеют радиологический возраст 76,78 ± 0,73 и 76,62 ± 0,85 млн лет, а гранодиорит-порфиры (обр. 3-4 и 3-11) – 81,01 ± 0,58 и 79,82 ± 0,67 млн лет соответственно.

Как и в случае с Малмыжским месторождением, в магматических породах потенциального рудного поля Гион, наряду с автохтонными кристаллами цирконов, также выявлены и захваченные аллохтонные (ксеногенные) кристаллы цирконов, характеризующие процесс контаминации гранитоидного расплава веществом вмещающих терригенных и вулканогенно-туфогенных пород нижнего мела. В отличие от Малмыжского месторождения, здесь спектр радиологических возрастов изученных аллохтонных (ксеногенных) цирконов варьирует в широких пределах. В обр. 3-11 обнаружено одно аллохтонное зерно с раннеордовикским возрастом 474 млн лет, в обр. 2-2 также зафиксировано одно зерно с раннемеловым возрастом 110 млн лет, а в обр. 3-9А – два зерна: одно с раннеюрским возрастом 190 млн лет, а другое – со среднекарбоновым возрастом 325 млн лет.

Скорее всего, такой разброс значений радиологического возраста ксеногенных цирконов свидетельствует о более широком возрастном спектре пород областей сноса обломочного материала при формировании терригенных и вулканогенных пород нижнего мела, веществом которых и был контаминирован гранитоидный расплав при внедрении в данный (Гионовский) фрагмент земной коры Журавлевско-Амурского террейна.

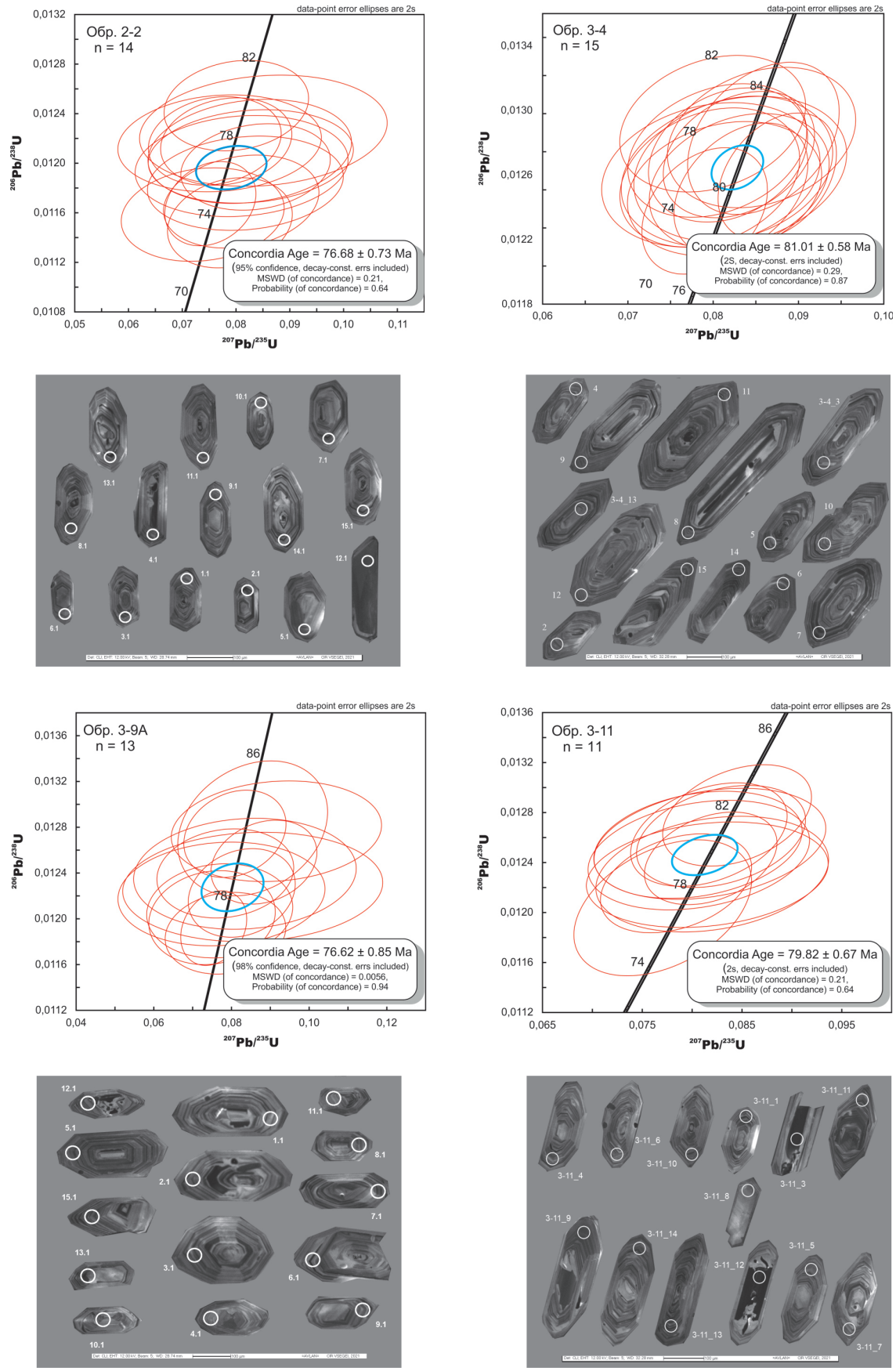


Рис. 12. Результаты U-Pb датирования интрузивных пород рудного поля Гион на примере Обр. 2-2, 3-4, 3-9A и 3-11

Для каждого из изученных образцов:
Вверху – диаграммы с конкордиями ($^{206}Pb/^{238}U$ – $^{207}Pb/^{235}U$) для цирконов из гранодиорит-порфиров и кварцевых диорит-порфиров, характеризующих возраст их магматической кристаллизации.
Внизу – катодолюминисцентные изображения изученных зерен цирконов с местоположением кратеров пробоотбора (25 мкм)

Результаты изучения закономерностей распределения элементов-примесей в цирконах из магматических пород рудных полей Малмыж и Гион. Изучение индикативных геохимических характеристик циркона, отражающих состав и металлогенические особенности среды минералообразования, требует наличия гомогенной популяции зерен этого минерала, кристаллизовавшегося из гранитоидного расплава. Для исследования в таких случаях непригодны многофазные кристаллы гибридного происхождения, а также кристаллы, содержащие значительное количество минеральных включений, древние ядра, метаморфические оболочки и т. п.

Применение вторично-ионного масс-спектрометра (SIMS) в сочетании с предварительной катодолюминесцентной (CL) и оптической документацией позволяет исключить из рассмотрения нерелевантные фазы циркона и проводить в одном микрообъеме кристалла как U-Pb изотопное определение возраста, так и определение концентраций редкоземельных и других элементов-примесей. В результате появляется однозначная привязка определенного геологического события (процесса) к его геохимическому наполнению.

В данной работе для изучения закономерностей распределения элементов-примесей в цирконах из магматических пород рудных полей Малмыж и Гион было использовано шесть образцов (ИМ-288, ИМ-2017Del, 2-2, 3-4, 3-9A и 3-11), петрографическое описание которых и геологическая привязка были рассмотрены выше.

Методика проведения локального элементного анализа в цирконе. Анализ проводился на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-IIe в ЦИИ ВСЕГЕИ. Измерялись относительные содержания редкоземельных элементов (РЗЭ), а также иттрий, титан и гафний по методике количественного химического анализа (МКХА), предложенного П. В. Хоскиным [32]. Интенсивность первичного пучка молекулярных отрицательно заряженных ионов кислорода O^{2-} составляла 3-4 нА, диаметр аналитического кратера 25–30 мкм.

Опорным пиком служил изотоп ^{91}Zr, а нормализация содержаний элементов в измеряемом образце производилась относительно стандарта SRM NIST-611. Вторичные положительно заряженные ионы направлялись с помощью ускоряющего напряжения 10кВ в масс-спектрометр и регистрировались электронным умножителем в одноколлекторном режиме.

Энергетическое фильтрование применялось для уменьшения излишне высокой интенсивности пика циркония, при этом также подавляя изотопные наложения (ионов гидридов, окислов и других комплексов), что в совокупности с масс-разрешением 4000–5000 (1 % высоты пика) позволяло уверенно отделять каждый измеряемый полезный пик от паразитного наложения. Во время анализа регистрировалось три масс-спектра нижеперечисленных изотопов: ^{89}Y, ^{91}Zr, ^{139}La, ^{140}Ce, ^{141}Pr, ^{143}Nd, ^{146}Nd, ^{147}Sm, ^{149}Sm, ^{151}Eu, ^{153}Eu, ^{155}Gd, ^{157}Gd, ^{159}Tb, ^{161}Dy, ^{163}Dy, ^{165}Ho, ^{166}Er, ^{167}Er, ^{169}Tm, ^{171}Yb, ^{172}Yb, ^{175}Lu, ^{178}Hf, ^{180}Hf.

Закономерности распределения элементов-примесей в цирконах. В табл. 5–6 приведены содержания редкоземельных элементов, а также содержания иттрия, титана, гафния, свинца, урана и тория в изученных зернах цирконов на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-IIe. При построении спектров распределения редкоземельных элементов состав циркона нормировался на состав хондрита CI [55–56].

Рудное поле Малмыж. Как показано на рис. 13, спектры распределения редкоземельных элементов (REE) в цирконах из образцов ИМ-288 и ИМ-2017Del практически идентичны друг другу, как по форме, так и по уровням содержания индивидуальных редких земель.

Суммарное содержание REE в цирконах в обр. ИМ-288 варьирует от 234 до 1105 г/т (при среднем значении 508 г/т), а в обр. ИМ-2017Del – от 217 до 1158 г/т (при среднем значении 468 г/т) (табл. 6). Характер распределения редких земель отчетливо дифференцирован с увеличением содержаний элементов от легких к тяжелым REE (Lu_N/La_N отношение в среднем по двум образцам составляет **40052**). Eu-аномалия – отрицательная, выражена достаточно слабо (Eu/Eu* в среднем – **0,60**). Ce-аномалия, наоборот, положительная, проявлена весьма отчетливо и интенсивно (Ce/Ce* в среднем составляет **61,4** в обр. ИМ-288 и **72,5** – в обр. ИМ-2017Del).

Содержания остальных элементов-примесей (Y, Hf, Pb, U, Th) в цирконах также мало чем отличаются друг от друга в изученных образцах гранитоидов. Так, средние содержания иттрия в обр. ИМ-288 и ИМ-2017Del варьируют от **718** до **732 г/т**, гафния – от **4524** до **4928 г/т**, свинца – от **1,2** до **1,6 г/т**. Концентрации U и Th весьма низкие. Средние значения содержаний урана – **89–112 г/т**, а тория – **58–76 г/т** при Th/U отношении **0,59–0,62**.

Потенциальное рудное поле Гион. Изученные зерна цирконов из кварцевых диорит-порфиров и гранодиорит-порфиров (обр. 2-2, 3-4, 3-9A и 3-11) незначительно отличаются по своим геохимическим характеристикам от цирконов из вышерассмотренных гранитоидов Малмыжского рудного поля (табл. 5–6). Прежде всего, эти различия касаются легких редких земель, а также иттрия, гафния, свинца, урана и тория, концентрации которых в 2–3 раза и более превышают средние значения этих элементов в цирконах из малмыжских гранитоидов. Тогда как по содержаниям средних и тяжелых редких земель цирконы из гранитоидов этих двух рудных полей практически не отличаются друг от друга.

Суммарное содержание REE в цирконах из обр. 2-2, 3-4, 3-9A и 3-11 варьирует от **243** до **1059 г/т** при среднем значении – **502 г/т** и высокой дисперсии распределения. Так же, как и в случае с малмыжскими образцами, характер поведения редких земель отчетливо дифференцирован

Таблица 5

Содержания типоморфных элементов-примесей (в г/т) и значения Th/U отношения в изученных зернах акцессорных цирконов из гранитоидов рудного поля Гион, полученные по результатам исследования на вторично-ионном микрозонде SHRIMP-IIe

Образец, зерно	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Y	Hf	Ti	Pb	U	Th	Th/U
2–2_11.1	0,005	23,98	0,04	0,57	1,12	0,53	5,98	2,25	29,97	11,75	60	15	164	37	480	7163	3,08	5,2	501	378	0,78
2–2_12.1	0,018	3,93	0,05	0,88	3,04	2,45	25,15	9,94	115,16	37,32	131	21	150	24	1606	5490	19,90	5,5	522	100	0,20
2–2_13.1	0,006	27,86	0,04	0,72	1,48	0,64	7,67	2,73	35,48	14,10	70	17	189	42	577	7136	3,20	8,4	795	890	1,16
2–2_14.1	0,007	40,84	0,07	1,18	2,27	1,00	11,13	3,72	47,49	18,53	88	21	220	48	750	6999	4,63	5,3	535	273	0,53
2–2_15.1	0,019	21,45	0,03	0,46	1,00	0,44	4,77	1,96	24,34	9,82	49	12	132	29	409	7166	3,34	7,4	733	674	0,95
3–4_1.1	0,012	15,73	0,04	0,50	1,23	0,73	6,67	3,04	38,43	16,71	82	22	233	55	643	7792	2,73	10,0	927	533	0,59
3–4_2.1	0,026	22,23	0,03	0,52	1,16	0,47	5,68	2,28	29,71	13,12	67	17	186	44	597	7128	2,90	10,0	927	533	0,59
3–4_3.1	0,046	21,81	0,05	0,77	1,09	0,37	4,65	1,82	18,89	8,11	39	10	109	26	361	7098	3,06	7,7	697	427	0,63
3–4_4.1	0,101	16,87	0,06	0,77	1,71	0,27	9,23	3,95	50,92	20,33	90	20	182	36	892	5877	5,01	6,3	573	379	0,68
3–4_5.1	0,230	25,92	0,09	0,89	1,26	0,51	6,43	2,32	27,36	10,47	50	12	126	26	462	6697	2,63	6,7	618	312	0,52
3–9A_5.1	0,030	18,14	0,11	1,32	2,53	0,82	13,49	5,54	68,16	28,31	139	33	339	71	1080	7446	4,69	9,5	858	588	0,71
3–9A_5.1	0,011	36,14	0,08	1,14	2,29	0,98	11,54	4,23	50,80	19,16	93	22	221	47	738	7022	5,48	3,4	321	256	0,82
3–9A_5.1	0,005	21,59	0,04	0,52	1,24	0,48	6,74	2,86	37,76	16,44	89	21	244	56	699	7561	3,09	7,1	692	603	0,89
3–9A_5.1	0,010	31,20	0,06	0,82	1,79	0,71	10,57	4,21	56,43	23,70	117	29	309	69	984	7184	4,24	12,2	1191	1489	1,29
3–9A_5.1	0,015	30,14	0,03	0,72	1,55	0,71	8,89	3,58	49,88	21,00	103	26	273	61	823	7313	3,55	6,1	587	349	0,61
3–11_4.1	0,028	38,34	0,05	0,83	1,92	0,88	11,84	4,81	58,89	25,22	119	29	288	65	1015	8304	4,33	8,6	777	506	0,67
3–11_5.1	0,087	20,34	0,05	0,58	1,29	0,62	8,14	3,49	44,72	19,34	93	23	240	53	754	9167	3,36	5,9	549	214	0,40
3–11_6.1	0,033	35,01	0,06	1,05	2,36	0,97	12,65	5,37	63,87	25,74	117	28	283	60	948	8571	4,12	5,9	549	214	0,40
3–11_7.1	0,061	10,39	0,04	0,55	0,91	0,44	4,61	2,19	26,71	12,23	60	16	165	39	432	10452	5,17	5,4	500	192	0,40
3–11_9.1	0,040	30,89	0,11	2,03	4,31	2,73	26,27	10,95	131,39	50,19	220	47	441	92	1895	6014	16,29	5,7	541	285	0,54

Примечание. Номер анализа соответствует номеру и положению соответствующего кратера уран-свинцового изотопного анализа циркона.

Таблица 6

Некоторые статистические параметры распределения содержаний редкоземельных и редких элементов-примесей (в г/т) в цирконах из интрузивных пород рудных полей Малмыж (участок Северный) и Гион

Элементы, индикативные показатели	Малмыж			Гион				
	Обр. ИМ-2017Del	Обр. ИМ-288	Среднее по рудному полю	Обр. 2-2	Обр. 3-4	Обр. 3-9А	Обр. 3-11	Среднее по рудному полю
	$\underline{X_{арф}\ (Me)}$ min–max	$\underline{X_{арф}\ (Me)}$ min–max		$\underline{X_{арф}\ (Me)}$ min–max	$\underline{X_{арф}\ (Me)}$ min–max	$\underline{X_{арф}\ (Me)}$ min–max	$\underline{X_{арф}\ (Me)}$ min–max	
La	0,02 (0,02) 0,01–0,05	0,02 (0,01) 0,003–0,06	0,02 (0,01) 0,003–0,06	0,01 (0,007) 0,005–0,019	0,08 (0,05) 0,012–0,23	0,01 (0,01) 0,005–0,03	0,05 (0,04) 0,028–0,087	0,04 (0,02) 0,005–0,23
Ce	6,48 (5,33) 3,75–17,98	6,47 (5,54) 3,75–17,32	6,47 (5,44) 3,75–17,98	23,61 (23,98) 3,93–40,84	20,51 (21,81) 15,73–25,92	27,44 (30,14) 18,14–36,14	26,99 (30,89) 10,39–38,34	24,64 (23,11) 3,93–40,8
Pr	0,06 (0,04) 0,01–0,39	0,04 (0,04) 0,01–0,11	0,05 (0,04) 0,01–0,39	0,05 (0,04) 0,03–0,07	0,06 (0,05) 0,04–0,09	0,06 (0,06) 0,03–0,11	0,06 (0,05) 0,04–0,11	0,06 (0,05) 0,03–0,11
Nd	0,99 (0,60) 0,23–6,18	0,77 (0,65) 0,24–1,73	0,88 (0,62) 0,23–6,18	0,76 (0,72) 0,46–1,18	0,69 (0,77) 0,49–0,89	0,90 (0,83) 0,52–1,32	1,01 (0,83) 0,55–2,03	0,84 (0,77) 0,46–2,03
Sm	1,85 (1,29) 0,60–9,50	1,60 (1,39) 0,50–2,90	1,72 (1,37) 0,50–9,50	1,78 (1,48) 1,01–3,04	1,29 (1,23) 1,09–1,71	1,88 (1,79) 1,24–2,53	2,16 (1,92) 0,92–4,31	1,78 (1,52) 0,92–4,31
Eu	0,60 (0,59) 0,22–1,29	0,63 (0,58) 0,25–1,03	0,62 (0,58) 0,22–1,29	1,01 (0,65) 0,44–2,45	0,47 (0,47) 0,27–0,73	0,74 (0,71) 0,48–0,98	1,13 (0,88) 0,44–2,73	0,84 (0,68) 0,27–2,73
Gd	8,04 (6,19) 2,71–36,77	7,23 (6,29) 2,69–13,66	7,63 (6,24) 2,69–36,77	10,94 (7,67) 4,77–25,15	6,53 (6,43) 4,65–9,23	10,25 (10,57) 6,74–13,49	12,71 (11,84) 4,62–26,27	10,11 (8,51) 4,62–26,27
Tb	3,19 (2,55) 1,14–13,00	2,95 (2,50) 1,25–6,36	3,07 (2,52) 1,14–13,00	4,12 (2,73) 1,96 -9,94	2,68 (2,32) 1,82 -3,95	4,09 (4,21) 2,86 -5,54	5,36 (4,81) 2,19 -10,95	4,06 (3,54) 1,82–10,95
Dy	41,61 (31,29) 15,99–152,10	40,35 (36,28) 17,05–91,81	40,98 (32,55) 15,99–152,10	50,49 (35,50) 24,34–115,2	33,06 (29,71) 18,89–50,92	52,60 (50,80) 37,80–68,20	65,11 (58,90) 26,70–131,4	50,32 (46,11) 18,89–131,4
Ho	17,02 (12,47) 6,95–55,68	17,11 (16,65) 7,43–39,82	17,06 (14,23) 6,95–55,68	18,30 (14,10) 9,82–37,30	13,75 (13,12) 8,11–20,33	21,72 (21,00) 16,44–28,32	26,55 (25,20) 12,23–50,19	20,08 (18,85) 8,11–50,19
Er	83,20 (61,21) 36,48–240,80	87,61 (82,44) 38,14–201,30	85,41 (75,76) 36,48–240,80	79,64 (70,4) 49,4–130,6	65,63 (66,8) 39,28–90,30	108,2 (103,0) 88,66–139,2	121,90 (117,5) 60,11–219,6	93,84 (89,46) 39,28–219,6
Tm	21,20 (16,21) 9,71–51,70	23,34 (21,32) 10,46–52,03	22,26 (20,60) 9,71–52,03	17,25 (17,3) 11,88–21,15	16,15 (16,91) 10,02–21,80	26,1 (25,6) 21,2–32,9	28,5 (27,9) 15,59–47,12	22,0 (21,2) 10,02–47,12

Окончание табл. 6

Элементы, индикативные показатели	Малмыж			Гион				
	Обр. ИМ-2017Del	Обр. ИМ-288	Среднее по рудному полю	Обр. 2-2	Обр. 3-4	Обр. 3-9А	Обр. 3-11	Среднее по рудному полю
	$\underline{X_{арф}\,(Me)}$ min–max	$\underline{X_{арф}\,(Me)}$ min–max		$\underline{X_{арф}\,(Me)}$ min–max	$\underline{X_{арф}\,(Me)}$ min–max	$\underline{X_{арф}\,(Me)}$ min–max	$\underline{X_{арф}\,(Me)}$ min–max	
Yb	234,7 (186,8) 113,4–490,0	264,9 (241,3) 125,1–566,5	249,8 (226,6) 113,4–566,5	171,0 (163,6) 131,7–220,0	167,1 (181,6) 109,3–232,7	277,3 (273,3) 221,0–339,2	283,3 (282,7) 165,2–441,5	224,7 (220,5) 109,3–441,5
Lu	48,90 (40,58) 25,70–101,30	54,87 (50,19) 27,69–112,60	51,88 (44,35) 25,70–112,60	36,07 (36,6) 24,37–48,31	37,39 (35,65) 26,28–54,92	60,9 (60,8) 47,1–71,5	61,71 (59,75) 38,81–92,42	49,02 (47,70) 24,37–92,42
∑REE	467,86 (364,90) 217,10–1158,00	507,88 (462,40) 234,50–1105,00	487,87 (446,22) 217,10–1158,0	415,0 (409,8) 286,3–524,0	365,4 (388,2) 242,7–474,7	592,1 (579,3) 497,4–721,3	636,6 (635,0) 337,8–1059	502,3 (500,6) 242,7–1059
∑LREE	7,55 (5,98) 4,00–24,60	7,30 (6,24) 2,29–4,00	7,41 (6,12) 2,29–24,60	24,43 (24,60) 4,88–42,10	21,34 (22,67) 16,27–27,13	28,42 (30,91) 19,59–37,37	28,11 (33,07) 11,05–39,25	25,58 (23,70) 4,88–42,10
∑MREE	69,53 (63,12) 29,18–154,6	72,31 (54,63) 27,69–268,4	70,92 (56,99) 27,69–268,4	86,65 (62,10) 42,33–193,1	57,78 (52,41) 34,93–86,42	91,28 (89,00) 65,52–118,8	113,0 (103,6) 47,09–225,8	87,18 (80,87) 34,93–225,8
∑HREE	429,5 (387,0) 201,4–932,4	388,0 (304,3) 185,3–865,4	408,7 (375,0) 185,3–932,4	303,9 (319,1) 222,0–377,6	286,2 (312,9) 185,1–391,7	472,5 (462,7) 382,9–582,8	495,5 (487,8) 279,7–800,6	389,5 (380,2) 185,1–800,6
Y	718 (546) 283–2212	732 (714) 306–1632	725 (615) 283–2212	764 (577) 408,8–1606	591 (597,0) 361–892	865 (823) 699,4–1080	1009 (948) 432,4–1895	807 (744) 361–1895
Hf	4928 (4910) 4130–5822	4524 (4523) 4136–4986	4726 (4632) 4130–5822	6791 (7136) 5490–7166	6918 (7098) 5877–7792	7305 (7313) 7022–7561	8502 (8571) 6014–10452	7379 (7165) 5490–10452
Ti	5,8 (5,7) 4,1–16,6	5,0 (5,3) 5,0–7,2	5,6 (5,4) 4,1–16,6	6,83 (3,34) 3,08–19,9	3,27 (2,90) 2,63–5,01	4,21 (4,24) 3,09–5,48	6,65 (4,33) 3,36–16,3	5,24 (3,83) 3,08–19,9
Pb	1,6 (1,0) 0,7–8,4	1,2 (1,2) 0,6–2,4	1,4 (1,0) 0,6–8,4	6,3 (5,5) 5,2–8,4	8,1 (7,7) 6,3–10,0	7,7 (7,1) 3,4–12,2	6,3 (5,9) 5,4–8,6	7,1 (6,5) 3,4–12,2
U	112 (75) 52–482	89 (85) 45–182	100 (75) 45–482	617 (535) 501–795	748 (697) 573–927	730 (692) 321–1191	583 (549) 500–777	670 (602) 321–1191
Th	76 (47) 24–433	58 (50) 18–118	67 (48) 18–433	463 (378) 99,9–889,5	437 (427) 312–533	657 (588) 255,9–1489	282 (214) 192–506	460 (378) 99,9–1489
Ce/Ce*	61,4 (58,2) 29,2–124,4	72,5 (60,8) 21,6–191,0	67,0 (58,3) 21,6–191,0	301,3 (402,2) 31,1–438,7	113,7 (108,3) 43,4–181,2	278,8 (316,1) 78,8–373,5	137,3 (112,7) 49,3–250,5	207,6 (189,5) 31,1–438,7

Eu/Eu*	0,6 (0,6) 0,2–0,7	0,6 (0,6) 0,5–0,7	0,57 (0,58) 0,2–0,7	0,64 (0,66) 0,54–0,68	0,62 (0,63) 0,55- 0,65	0,57 (0,58) 0,49- 0,64	0,49 (0,50) 0,21- 0,70	0,58 (0,58) 0,21–0,70
Lu_N/La_N	33558 (25483) 7313–63788	46546 (38108) 7576–210468	39367 (36263) 7313–210468	47658 (63192) 13198–74770	14086 (5605) 1102–43999	54701 (40755) 23159–101651	14742 (17531) 5895–22089	32797 (22072) 1102–101651
Sm_N/La_N	171,7 (156,3) 24,1–361,6	207,8 (123,5) 53,3–634,2	189,8 (141,4) 24,1–634,2	324,5 (371,0) 82,42–484,5	60,9 (37,7) 8,63–160,8	255,2 (294,8) 133,6–364,6	86,81 (106,6) 23,26–167,9	181,8 (146,8) 8,63–484,5
Lu_N/Gd_N	64,4 (64,0) 18,6–96,7	67,6 (68,1) 35,6–102,8	66,0 (66,6) 18,6–102,8	38,0 (45,3) 8,0–50,6	48,9 (47,1) 31,9–68,1	51,4 (53,6) 33,7–69,0	47,3 (45,1) 29,1–69,4	46,4 (46,2) 8,0–69,4
Pr_N/Gd_N	0,015 (0,013) 0,006–0,027	0,013 (0,012) 0,007–0,022	0,014 (0,012) 0,006–0,027	0,013 (0,014) 0,005–0,016	0,019 (0,015) 0,012–0,031	0,013 (0,013) 0,008–0,017	0,012 (0,010) 0,009–0,021	0,014 (0,013) 0,005–0,031
Yb_N/Sm_N	153,6 (146,1) 47,0–265,8	167,5 (171,1) 80,2–247,1	160,6 (155,5) 47,0–265,8	100,5 (116,6) 44,95–133,5	119,3 (96,6) 90,92–172,1	141,4 (157,6) 87,85–179,1	134,6 (136,6) 93,24–169,7	124,0 (120,7) 44,95–179,1
La_N/Gd_N	0,003 (0,002) 0,001–0,012	0,003 (0,002) 0,001–0,006	0,003 (0,002) 0,001–0,012	0,001 (0,001) 0,001–0,003	0,011 (0,008) 0,002–0,031	0,001 (0,001) 0,0001–0,002	0,005 (0,002) 0,001–0,011	0,005 (0,002) 0,0001–0,031
Yb/Gd	36,19 (35,77) 13,33–56,34	38,91 (41,48) 22,42–57,78	37,55 (38,52) 13,33–57,78	21,08 (24,69) 5,97–27,63	26,08 (23,53) 19,61–34,90	28,10 (29,27) 19,15–36,15	25,74 (24,30) 16,81–35,81	25,25 (24,92) 5,97–36,15
Nd/Yb	0,003 (0,002) 0,001–0,013	0,003 (0,002) 0,001–0,006	0,003 (0,003) 0,001–0,013	0,004 (0,004) 0,004–0,006	0,005 (0,004) 0,002–0,007	0,003 (0,003) 0,002–0,005	0,003 (0,003) 0,002–0,005	0,004 (0,004) 0,002–0,007
Yb/Hf	0,05 (0,04) 0,02–0,11	0,06 (0,05) 0,03–0,11	0,05 (0,05) 0,02–0,11	0,03 (0,03) 0,02–0,03	0,02 (0,03) 0,02–0,03	0,04 (0,04) 0,03–0,05	0,04 (0,03) 0,02–0,07	0,03 (0,03) 0,02–0,07
U/Yb	0,44 (0,38) 0,31–0,98	0,37 (0,32) 0,09–0,82	0,40 (0,37) 0,09–0,98	3,75 (3,47) 2,43–5,57	4,68 (4,89) 3,16–6,38	2,56 (2,53) 1,45–3,85	2,24 (2,29) 1,23–3,03	3,31 (3,05) 1,23–6,38
Th/U	0,59 (0,61) 0,39–0,90	0,62 (0,66) 0,33–0,80	0,60 (0,63) 0,33–0,90	0,70 (0,75) 0,19–1,12	0,59 (0,58) 0,51–0,66	0,84 (0,80) 0,59–1,25	0,47 (0,39) 0,38–0,65	0,65 (0,60) 0,19–1,25
LREE-I	82,59 (74,39) 40,64 -188,50	85,99 (83,68) 52,39–159,60	84,29 (78,29) 40,64 -188,50	91,90 (76,66) 61,03–168,4	76,31 (82,99) 41,85–108,5	90,04 (99,88) 66,91–103,6	94,71 (95,08) 77,49–111,3	88,24 (85,49) 41,85–168,4

Примечание. В таблице для каждого образца: в числителе – значение среднего арифметического содержания, в скобках – медиана, в знаменателе – разброс частных значений в выборке (минимум–максимум).
Малмыж: Обр. ИМ-2017Del – равномерно-зернистый диорит, обр. ИМ-288 – порфировидный кварцевый диорит.
Гион: Обр. 2-2 – биотит-роговообманковый кварцевый диорит-порфир, Обр. 3-4 – биотитовый гранодиорит-порфир, Обр. 3-9А – биотит-роговообманковый кварцевый диорит-порфир и Обр. 3-11 – биотит-роговообманковый гранодиорит-порфир.

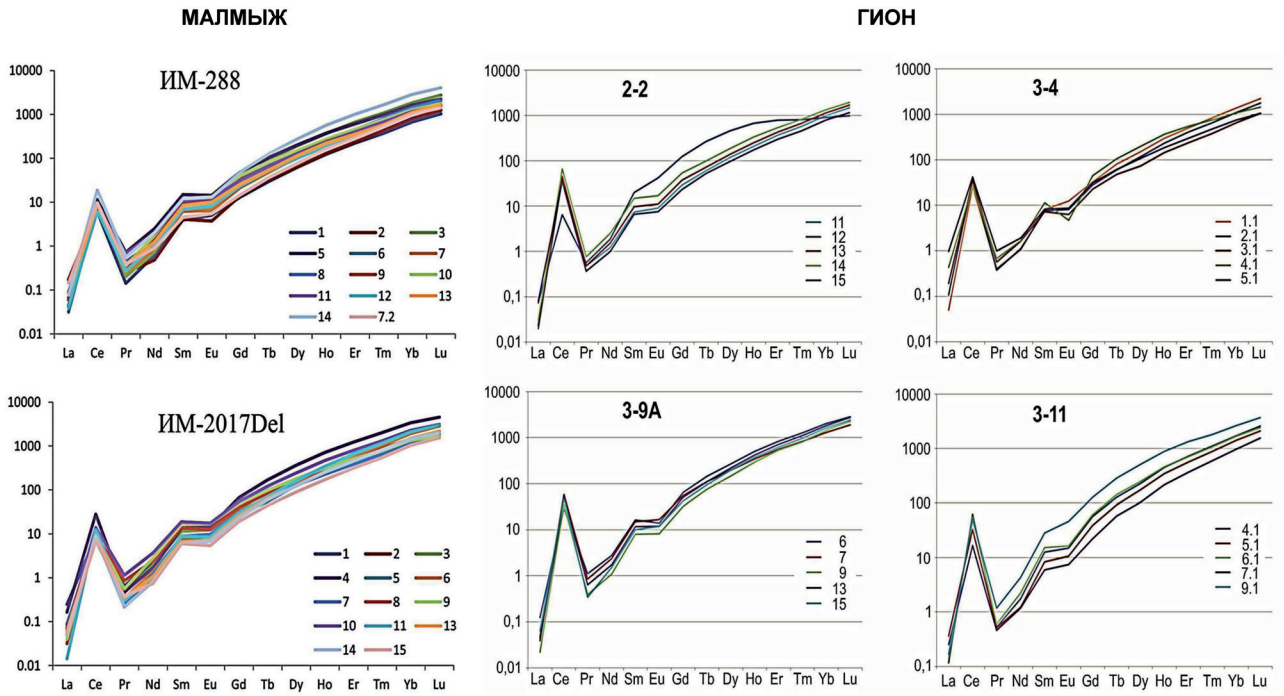


Рис. 13. Редкоземельные спектры цирконов (в нормированных единицах к содержаниям в хондритах) из магматических пород рудных полей Малмыж и Гион

с увеличением содержаний элементов от легких к тяжелым REE (Lu_N/La_N отношение колеблется в широких пределах, в среднем составляя **32 797**). Eu-аномалия – отрицательная, выражена чуть сильнее, чем в малмыжских цирконах (Eu/Eu* в среднем – **0,58**). Ce-аномалия положительная, проявлена более отчетливо, чем в случае с малмыжскими гранитоидами (Ce/Ce* в среднем составляет **207,6**).

В цирконах из гионовских гранитоидов обнаружены высокие концентрации U и Th. Средние значения содержаний урана – **670 г/т**, а тория – **460 г/т** при Th/U – **0,65**. Концентрации остальных элементов-примесей (Y, Hf и Pb) по сравнению с малмыжскими гранитоидами также повышенные. Средние значения содержаний иттрия составляют **807 г/т**, гафния – **7379 г/т**, а свинца – **7,1 г/т**.

Обсуждение результатов исследования.

1. На рис. 14 приведены материалы, иллюстрирующие положение состава изученных образцов магматических пород рудных полей Гион и Малмыж на петрохимической диаграмме TAS ($Na_2O + K_2O – SiO_2$), а также на 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:

– петрогеохимически изученные образцы малмыжских и гионовских магматических пород практически мало чем отличаются друг от друга. Все они принадлежат к известково-щелочной серии гранитоидов, характеризуясь нормальной щелочностью ($Na_2O + K_2O$ = 3–6 %) при резком преобладании натрия над калием (K_2O/Na_2O = 0,2–0,3) у малмыжских образцов и менее резком преобладании натрия над калием (K_2O/Na_2O = 0,5–0,9) – у таковых, отобранных в пределах рудного поля Гион (рис. 14, *А*). То есть гионовские гранитоиды оказались более калиевыми чем малмыжские, что не могло не сказаться на их геохимической специализации. Так, более калиевые гранитоиды из рудного поля Гион значительно обогащены по сравнению с малмыжскими образцами магматических пород барием, рубидием, стронцием, цирконием, торием, ураном и суммой редкоземельных элементов, особенно их легкой лантоноидной составляющей;

– 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. 14, *Б*). В этом отношении гранитоиды из рудных полей Гион и Малмыж практически не отличаются как друг от друга, так и от магматических пород большинства порфировых месторождений Мира;

– на вариационной диаграмме Sr/Y – Y фигуративные точки состава данных образцов расположи-

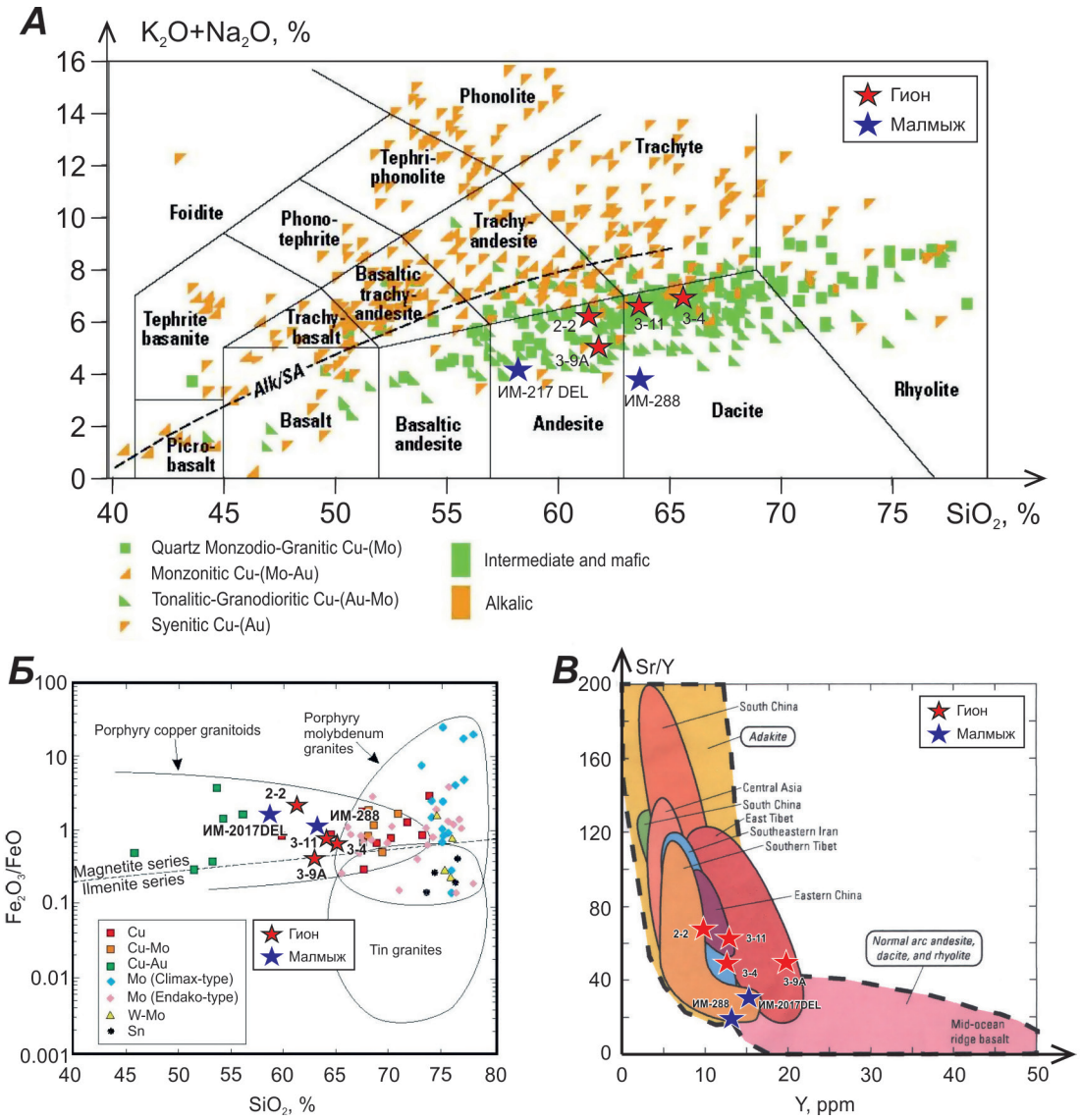


Рис. 14. Положение состава изученных образцов магматических пород рудных полей Гион и Малмыж

А – на петрохимической диаграмме TAS ($Na_2O + K_2O – SiO_2$), на которой для сравнения вынесены фигуративные точки составов рудовмещающих интрузивных пород большинства ведущих Au-Cu-, Au-Cu-Mo- и Cu-Mo-порфировых месторождений мира (по D. A. John et al. [35], Fig. 3 с дополнениями авторов).

Б – на вариационной диаграмме $Fe_2O_3/FeO – SiO_2$, предложенной В. Д. Синклером (W. D. Sinclair [52], Fig. 12) и на которую 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.

В – на диаграмме Sr/Y – Y, предложенной Д. А. Джоном с соавторами (D. A. John et al. [35], Fig. 4), на которую для сравнения вынесены поля усредненных составов рудовмещающих интрузивных пород некоторых Cu- и Au-Cu-порфировых месторождений Азиатского региона (Китай, Центральная Азия, Иран, Индонезия)

лись в области *«адакитовых»* магматических пород порфировых месторождений Китая, Центральной Азии и Ирана, а внутри нее малмыжские гранитоиды «попали» в поле Южного Тибета, а гионовские образцы – в поле Восточного Тибета, Юго-Восточного Ирана и Северо-Восточно Китая (рис. 14, *В*).

По этому показателю из всего многообразия порфировых месторождений Мира изученные магматические породы Журавлевско-Амурского террейна сопоставимы, в первую очередь, со синсдвиговыми интрузивными породами территории китайского Тибета, где в последние годы была открыта серия золото-медно-молибден-порфировых месторождений, связанных с проявлениями адакитового гранитоидного магматизма [33; 34; 46; 47; 57].

2. Результаты проведенных изотопно-геохронологических исследований магматических пород рудных полей Малмыж и Гион указывают на близкий – **позднемеловой** радиологический возраст их кристаллизации: **сеноманский** (97–99 млн лет) для малмыжских образцов и **кампанский** (76–82 млн лет) для образцов, отобранных в пределах рудного поля Гион.

Это свидетельствует о том, что магматические породы данных рудных полей были сформиро-

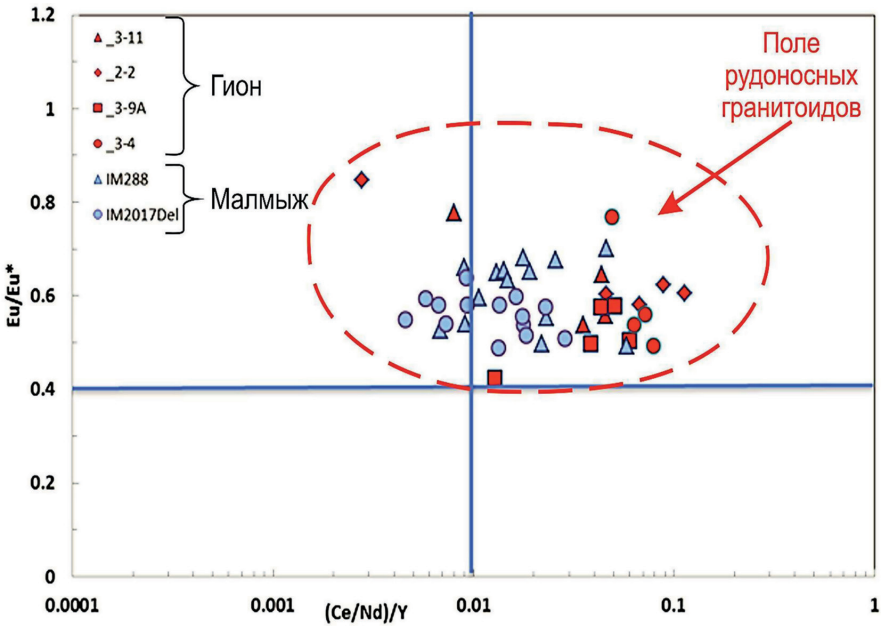


Рис. 15. Положение геохимического состава изученных зерен цирконов из образцов магматических пород рудных полей Малмыж и Гион на вариационной диаграмме Eu/Eu* – (Ce/Nd)/Y

ваны в рамках одного, достаточно короткого по времени (не более 20 млн лет), этапа проявления син- и постколлизионной интрузивной магматической деятельности, реализованной в пределах Журавлевско-Амурского террейна раннемелового турбидитового осадочного бассейна.

3. Оценка потенциальной рудоносности магматических пород рудных полей Малмыж и Гион по геохимическим характеристикам акцессорных цирконов осуществлялась на основе использования вариационных диаграмм: **Eu/Eu* – Dy/Nd** и **Eu/Eu* – (Ce/Nd)/Y**, предложенных Ю. Лу с соавторами [38; Fig. 5 и 6] на основе обобщения большого фактического материала по золото-медно-порфировым и золото-медно-молибден-порфировым месторождениям Центрально-Азиатского альпийского орогенного пояса в сравнении их с заведомо безрудными магматическими образованиями различных регионов Мира. На приведенных в этой работе вариационных диаграммах отчетливо выделяются, практически не перекрывающиеся друг с другом, поля, одни из которых отвечают цирконам из рудоносных магматических пород порфировых месторождений, а другие – заведомо безрудным магматическим комплексам.

На рис. 15 представлена вариационная диаграмма **Eu/Eu* – (Ce/Nd)/Y**, заимствованная из работы Ю. Лу и соавторов [38], на которой специальными значками нанесены фигуративные точки геохимических составов изученных зерен циркона из магматических пород рудных полей Малмыж и Гион. Анализ диаграммы показывает, что цирконы как из малмыжских (обр. ИМ-288 и ИМ-2017Del), так и гионовских (обр. 2-2, 3-4, 3-9А и 3-11)

Таблица 7

Значения индикативных геохимических параметров циркона (Porphyry Indicator Zircons – PIZs, after Pizarro et al. [45]) для изученных образцов магматических пород рудных полей Гион и Малмыж (участок Северный)

№ п/п	Индикативные геохимические параметры циркона (PIZs) для продуктивных порфировых интрузивов		Гион					Малмыж		
			Обр. 2-2	Обр. 3-4	Обр. 3-9А	Обр. 3-11	Среднее	Обр. ИМ-288	Обр. ИМ-2017Del	Среднее
1	Ce/Nd	>1	40,7	29,3	37,8	33,4	35,3	10,0	10,1	10,0
2	Eu/Eu*	>0,4	0,61	0,54	0,51	0,59	0,56	0,60	0,60	0,60
3	(Ce/Nd)/Y	>0,01	0,078	0,063	0,043	0,043	0,057	0,019	0,016	0,018
4	Dy/Yb	<0,3	0,19	0,17	0,18	0,20	0,19	0,16	0,16	0,16
5	(10000x Eu/Eu*)/Y	>1	11,6	11,7	7,1	5,7	9,0	11,1	9,1	10,0
6	Th/U	от 0,1 до 1,0	0,87	0,59	0,82	0,40	0,67	0,59	0,62	0,61
7	T° C (Ti-in-zircon-thermometer)	от 637 до 738	651	643	671	672	659	660	700	680

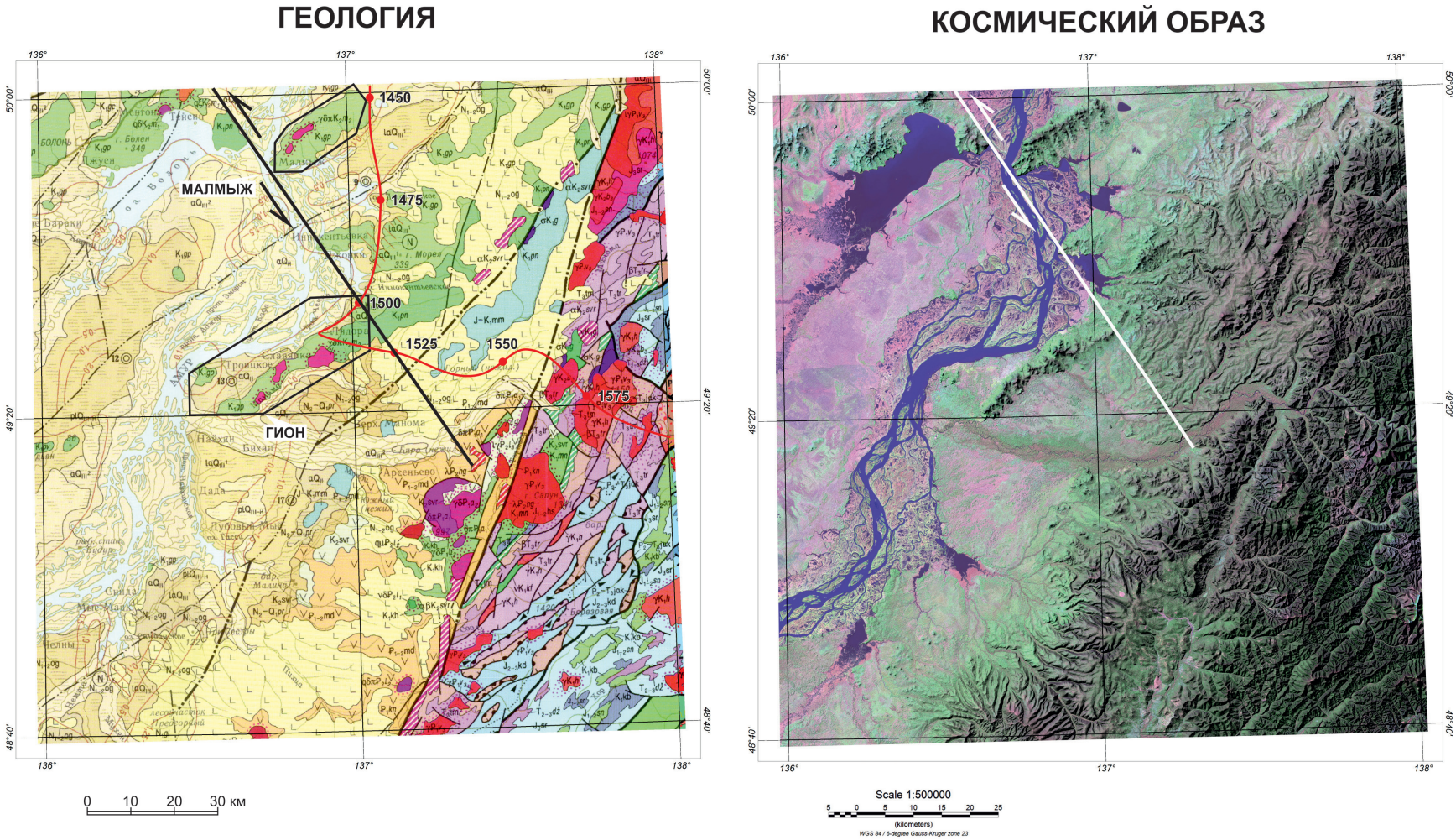


Рис. 16. Положение рудных полей Малмыж и Гион в региональных геологических структурах и на космическом снимке территории Нижнего Приамурья

(фрагмент листа M-53 – Хабаровск, на котором линиями белого и черного цветов показано направление предполагаемого сдвигового движения, разделившего некогда единый в позднемеловое время гранитоидный интрузивный пояс (протяженностью 65 км) на два фрагмента: Малмыжский и Гионский)

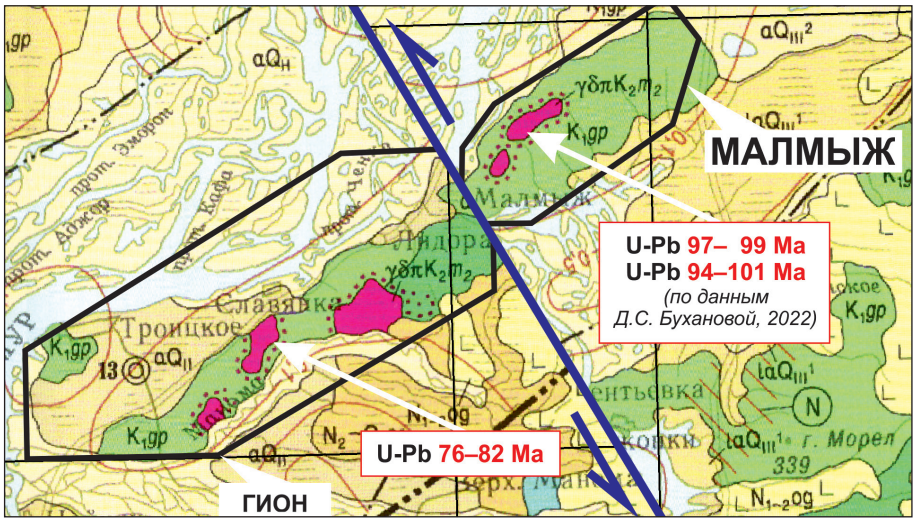


Рис. 17. Реконструкция предполагаемого геологического строения Гион-Малмыжского гранитоидного интрузивного пояса на момент его формирования в позднемеловое время

гранитоидов попадают в область рудоносных порфировых систем.

Это подтверждается и материалами табл. 7, в которой приводятся значения всех *семи* основных индикативных геохимических параметров циркона (PIZs – Porphyry Indicator Zircons), предложенных Х. Пизарро и соавторами [45] на основе обобщения большого статистического материала по основным порфировым месторождениям Мира и рассчитанных для изученных образцов магматических пород рудных полей Гион и Малмыж.

То есть на основе анализа вышеприведенных геохимических данных можно прийти к однозначному выводу: несмотря на то, что в пределах потенциального рудного поля Гион до настоящего времени промышленная золото-медно-порфировая рудная минерализация была неизвестна, тем не менее, гранитоиды, участвующие в его геологическом строении, по геохимическим характеристикам акцессорных цирконов практически ничем не отличаются от гранитоидов как соседнего с ним Малмыжского рудного поля, так и большинства золото-медно-порфировых месторождений Мира.

Таким образом, изучение особенностей распределения элементов-примесей (REE+Y, Hf, Ti, U, Th, Pb) в акцессорных цирконах из магматических пород рудных полей Малмыж и Гион, проведенное авторами статьи на основе использования геохимических моделей, предложенных Ю. Лу с соавторами [38] и Х. Пизарро и соавторами [45], действительно может помочь при разбраковке порфировых магматических комплексов на потенциально рудоносные и безрудные.

4. Однако по результатам работ Троицкой партии, проводившей на этой территории в 1975–1978 гг. ГСР масштаба 1 : 200 000, в целом было сделано негативное заключение о перспективах открытия в пределах рудного поля Гион промышленного золото-медно-порфирового оруденения (С. П. Кузьменко и др., 1979ф).

Сравнительный анализ всей совокупности приведенных в данной статье новых геолого-геофизических, космогеологических, петрогеохимических, минералого-петрографических, изотопно-геохронологических и изотопно-геохимических материалов однозначно указывает на то, что между этими двумя рудными полями – Малмыж и Гион скорее всего больше сходства нежели различий.

Более того, на основе тщательного анализа положения рудных полей Малмыж и Гион в региональных геологических структурах и на космическом снимке территории Нижнего Приамурья с определенной долей условности можно предположить, что в позднемеловое время эти две территории находились рядом, представляя собой единый гранитоидный интрузивный пояс, вытянутый в северо-восточном направлении более чем на 65 км (рис. 16, 17). Однако в результате неотектонических движений в плейстоценовое время этот единый гранитоидный интрузивный пояс был разделен левосторонним сдвигом на два фрагмента: Малмыжский и Гионский, с первым из которых связано крупнейшее в России золото-медно-порфировое месторождение, а перспективы второго на предмет прогнозирования промышленной рудной минерализации порфирового типа остаются пока до конца не реализованными.

По мнению авторов статьи, для окончательного решения этого вопроса в пределах потенциального рудного поля Гион необходимо провести оценку геологической изученности и подготовить Программу геологоразведочных работ масштаба 1 : 50 000 (1 : 25 000) с общими поисками, включающих комплекс современных геофизических, литогеохимических и дистанционных методов, а также петрографо-геохимическое изучение и картирование полей гидротермально измененных пород, нацеленное на выделение в его пределах более локальных перспективных участков размером не более 10–15 км^2 под проведение ГРР поисково-оценочной стадии. В результате реали-

зации подобной Программы на территории потенциального рудного поля Гион можно будет ожидать открытие 1–2 крупных порфировых месторождений по запасам, близким к месторождениям Малмыж и Песчанка.

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

Благодарности. Авторы выражают благодарность директору Центра дистанционных методов природоресурсных исследований ВСЕГЕИ *А. А. Кирсанову*, директору центра геолого-геофизических основ ВСЕГЕИ *А. И. Атакову* и зав. отделом глубинных геофизических исследований ВСЕГЕИ *И. Ю. Винокурову* за предоставленные космогеологические и геофизические материалы по листу М-53 – Хабаровск и опорному геолого-геофизическому профилю 8-ДВ, а также 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буханова Д. С. Первые данные о возрасте Малмыжского золото-медно-порфирового месторождения, Хабаровский край // Материалы конференции «Новое в познании процессов рудообразования». – М. : ИГЕМ РАН, 2018. – С. 81–82.

2. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. В 2 кн. / Ред. А. И. Ханчук. – Владивосток : Дальнаука, 2006. – 981 с.

3. Глебовицкий В. А. Геохимия цирконов анатектической и диатектической стадий формирования мигматитов Северо-Западного Приладожья / В. А. Глебовицкий, Л. М. Саморукова, И. С. Седова, А. М. Федосеенко // Докл. РАН. – 2008. – Т. 420, № 6. – С. 813–817.

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

5. Краснобаев А. А. Циркон как индикатор геологических процессов. – М. : Наука, 1986. – 134 с.

6. Кривцов А. И. Медно-порфировые месторождения. Серия: Модели месторождений благородных и цветных металлов / А. И. Кривцов, В. С. Звездов, И. Ф. Мигачев, О. В. Минина. – М. : Изд-во ЦНИГРИ, 2001. – 232 с.

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. Мигачев И. Ф., Гирфанов М. М., Шишаков В. Б. Медно-порфировое месторождение Песчанка // Руды и металлы. – 1995. – № 3 – С. 48–58.

9. Носырев М. Ю., Диденко А. Н., Гильманова Г. З. Геофизическая модель Малмыжского рудного узла по данным магнитного и гравитационного аномальных полей (Сихотэ-Алинь) // Докл. РАН. – 2022. – Т. 506, № 2. – С. 227–235. – DOI: 10,31857/S2686739722800015.

10. 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. Киселев, В. В. Шатов, Ю. П. Змиевский, А. В. Молчанов, А. В. Терехов, С. А. Сергеев // Региональная геология и металлогения. – 2020. – № 83. – С. 41–56.

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

12. Петров О. В. Карта закономерностей размещения золото-медно-порфировых месторождений России масштаба 1 : 2 500 000 (на основе обобщения результатов работ по составлению комплектов государственных геологических карт масштаба 1 : 1 000 000 третьего поколения) / О. В. Петров, А. В. Молчанов, А. В. Терехов, В. В. Шатов, В. Н. Белова, С. В. Кашин, В. В. Семенова, А. Е. Соболев, Н. С. Соловьев, В. А. Шамахов // Региональная геология и металлогения. – 2020. – № 84. – С. 5–24.

13. 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. Киселев, В. И. Шпикерман, Ю. П. Змиевский // Региональная геология и металлогения. – 2019. – № 80. – С. 50–74.

14. Петров О. В. Распределение элементов-примесей (REE+Y, Hf, U, Th, Pb) в цирконе как индикатор рудоносности магматических пород Au-Cu-порфировых проявлений Малмыжского и Понийского рудных полей (Нижнее Приамурье, Дальний Восток) / О. В. Петров, Е. А. Киселев, А. И. Ханчук, В. В. Иванов, В. В. Шатов, А. А. Аленичева, А. В. Молчанов, А. В. Терехов, Н. В. Родионов, Б. В. Беляцкий, С. А. Сергеев // Региональная геология и металлогения. – 2020. – № 84. – С. 55–70.

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

16. Скублов С. Г. Распределение редкоземельных и редких элементов в цирконах из миаскитовых лампроитов Панозерского комплекса Центральной Карелии / С. Г. Скублов, С. Б. Лобач-Жученко, Н. С. Гусева, И. М. Гембицкая, Е. В. Толмачева // Геохимия. – 2009. – № 9. – С. 958–971.

17. Федотова А. А., Бибикова Е. В., Симакин С. Г. Геохимия циркона (данные ионного микрозонда) как индикатор генезиса минерала при геохронологических исследованиях // Геохимия. – 2008. – № 9. – С. 980–997.

18. 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.

19. Ханчук А. И. Палегеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока России // Рудные месторождения континентальных окраин. – Владивосток : Дальнаука, 2000. – С. 5–34.

20. Ханчук А. И. Природа континентальной коры Сихотэ-Алиня (по данным изотопного состава Nd в породах Южного Приморья) / А. И. Ханчук, Н. Н. Крук,

В. В. Голозубов, В. П. Ковач, П. А. Серов, В. В. Холоднов, В. И. Гвоздев, С. А. Касаткин // Докл. РАН. – 2013. – Т. 451, № 4. – С. 441–445. – DOI: 10,7868/S0869565213220179.

21. 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.

22. 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.

23. Читалин А. Ф. Порфирово-эпитермальные системы Баимской рудной зоны, Западная Чукотка / А. Ф. Читалин, Ю. Н. Николаев, И. А. Бакшеев, В. Ю. Прокофьев, Е. В. Фомичев, В. В. Усенко, Е. В. Нагорная, Л. И. Марущенко, Ю. Н. Сидорина, Г. Т. Джеджея // Смирновский сборник – 2016. Ч. I. Проблемы минерагении, экономической геологии и прогноза месторождений. – М. : МАКС Пресс, 2016. – С. 82–114.

24. Шатова Н. В. Геохронология щелочных магматических пород и метасоматитов Рябинового массива (Южная Якутия) на основе изотопно-геохимического (U-Pb, REE) исследования циркона / Н. В. Шатова, С. Г. Скублов, А. Е. Мельник, В. В. Шатов, А. В. Молчанов, А. В. Терехов, С. А. Сергеев // Региональная геология и металлогения. – 2017. – № 69. – С. 33–48.

25. 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.

26. Ballard J. R., Palin M. J., Campbell I. H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce (IV)/Ce (III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2002. – Vol. 144, no. 3. – Pp. 347–364.

27. Bao X.-Sh. Geochemical discrimination between fertile and barren Eocene potassic porphyries in the Jinshajiang Cu-Au-Mo metallogenic belt, SW China: Implications for petrogenesis and metallogeny / X.-Sh. Bao, L.-Q. Yang, X. Gau, D. Groves, W.-Y. Hea, M.-M. Lia // Ore Geology Reviews. – 2020. – Vol. 116. – Pp. 1–16.

28. Burnham A. D., Berry A. J. An experimental study of trace element partitioning between zircon and melt as a function of oxygen fugacity // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2012. – Vol. 95. – Pp. 196–212.

29. Dilles J. H. Zircon compositional evidence for sulfur-degassing from ore-forming arc magmas / J. H. Dilles, A. J. R. Kent, J. L. Wooden, R. M. Tosdal, A. Koleszar, R. G. Lee, L. P. Farmer // Economic Geology. – 2015. – Vol. 110. – Pp. 241–251.

30. Fu B. Ti-in-zircon thermometry: Applications and limitations / B. Fu, F. Z. Page, A. J. Cavosie, C. C. Clechenko, J. Fournelle, N. T. Kita, J. S. Lackey, S. A. Wilde, J. W. Valley // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2008. – Vol. 156. – Pp. 197–215.

31. Grebennikov A. V., Khanchuk A. I. Pacific-type transform and convergent margins:igneous rocks, geochemical contrasts and discriminant diagrams // International Geology Review. – 2020. – Vol. 63, no. 5. – Pp. 601–629. – DOI: 10,1080/00206814,2020,1848646.

32. Hoskin P. W. O. Minor and trace element analysis of natural zircon (ZrSiO4) by SIMS and laser ablation ICP-MS: A consideration and comparison of two broadly competitive techniques // Journal of Trace and Microprobe Techniques. – 1998. – Vol. 16, no. 3. – Pp. 301–326.

33. 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.

34. 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 // Sci. China. – 2004. – Vol. 47. – Pp. 221–231.

35. 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.

36. Loader M. A., Wilkinson J. J., Armstrong R. N. The effect of titanite crystallisation on Eu and Ce anomalies in zircon and its implications for the assessment of porphyry Cu deposit fertility // Earth and Planetary Science Letters. – 2017. – Vol. 472. – Pp. 107–119.

37. Lowell J. D., Guilbert J. M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits // Economic Geology. – 1970. – Vol. 65, no. 4. – Pp. 373–408.

38. Lu Y.-J. Zircon compositions as a pathfinder for porphyry Cu ± Mo ± Au Deposits / Y.-J. Lu, R. R. Loucks, M. Fiorentini, T. C. Mc Cuaig, N. J. Evans, Z.-M. Yang, Z.-Q. Hou, Ch. L. Kirkland, L. A. Parra-Avila, A. Kobussen // Society Economic Geology Special Publication. – 2016. – No. 19. – Pp. 329–347.

39. Muller D., Groves D. I. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization // Springer, the 4th Edition. – 2016. – 311 p.

40. Nasdala L. Zircon M257 – a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon / L. Nasdala, W. Hofmeister, N. Norberg, J. M. Mattinson, F. Corfu, W. Dörr, S. L. Kamo, A. K. Kennedy, A. Kronz, P. W. Reiners, D. Frei, J. Kosler, Y. Wan, J. Götze, T. Häger, A. Kröner, J. W. Valley // Geostandards and Geoanalytical Research. – 2008. – Vol. 32 (3). – Pp. 247–265.

41. Paolillo L., Chiaradia M., Ulianov A. Zircon Petrochronology of the Kışladağ Porphyry Au Deposit (Turkey) // Economic Geology. – 2022. – Vol. 117, no. 2. – Pp. 401–422. – DOI:10,5382/econgeo.4864.

42. Park J.-W. Chalcophile element fertility and the formation of porphyry Cu ± Au deposits / J.-W. Park, I. H. Campbell, S. P. K. Malaviarachchi, H. Cocker, H. Hao, S. M. Kay // Mineralium Deposita. – 2019. – Vol. 54. – Pp. 657–670.

43. Parra-Avila L. A. The long-lived fertility signature of Cu-Au porphyry systems: insights from apatite and zircon at Tampakan, Philippines / L. A. Parra-Avila, J. Hammerli, A. I. S. Kemp, B. Rohrlach, R. Loucks, Y. Lu, I. S. Williams, L. Martin, M. P. Roberts, M. L. Fiorentini // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2022. – Vol. 177, no.18. – Pp. 1–22. – DOI: 10,1007/s00410–021–01878–2.

44. Petrov O. V. Porphyry indicator zircons and geochronology of magmatic rocks from the Malmyzh and Pony Cu-Au porphyry ore fields (Russian Far East) / O. V. Petrov, A. I. Khanchuk, V. V. Ivanov, V. V. Shatov, R. Seltmann, A. V. Dolgopolova, A. A. Alenicheva, A. V. Molchanov, A. V. Terekhov, V. I. Leontev, B. V. Belyatsky, N. V. Rodionov, S. A. Sergeev // Ore Geology Reviews. – 2021. – Vol. 139. – Pp. 1–22.

45. Pizarro H. Porphyry indicator zircons (PIZs): Application to exploration of porphyry copper deposits / H. Pizarro, E. Campos, F. Bouzari, S. Rousse, T. Bissig, M. Gregoire, R. Riquelme // Ore Geology Reviews. – 2020. – Vol. 126. – DOI: org/10,1016/j.oregeorev.2020,103771.

46. Qu P. Apatite and zircon geochemistry for discriminating ore-forming intrusions in the Luming giant porphyry Mo deposit, Northeastern China / P. Qu, H.-C. Niu, Q. Weng, N.-B. Li, Y. Zhao, H.-J. Zhang // Ore Geology Reviews. – 2022. – Vol. 143. – Pp. 1–17. – DOI: org/10,1016/j.oregeorev.2022,104771.

47. Richards J. P., Kerrich R. Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis // Economic Geology. – 2007. – Vol. 102. – Pp. 537−576.

48. Schuth S. Early Proterozoic U-Pb Zircon Ages from Basement Gneiss at the Solovetsky Archipelago, White Sea, Russia / S. Schuth, V. I. Gornyy, J. Berndt, S. S. Shevchenko, S. A. Sergeev, A. F. Karpuzov, and T. Mansfeldt // International Journal of Geosciences. – 2012. – Vol. 3, no. 2. – Pp. 289–296.

49. Shen P. Oxidation condition and metal fertility of granitic magmas: Zircon trace-element data from porphyry Cu deposits in the Central Asian Orogenic Belt / P. Shen, K. Hattori, H. Pan, S. Jackson, E. Seitmuratova // Economic Geology. – 2015. – Vol. 110. – Pp. 1861–1878.

50. Shu Q. Zircon trace elements and magma fertility: Insights from porphyry (-skarn) Mo deposits in NE China / Q. Shu, Zh. Chang, Y. Lai, X. Hu, H. Wu, Y. Zhang, P. Wang, D. Zhai, Ch. Zhang // Mineralium Deposita. – 2019. – Vol. 54. – Pp. 645–656.

51. Sillitoe R. H. Porphyry copper systems // Economic Geology. – 2010. – Vol. 105, no. 1. – Pp. 3–41.

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

53. 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.

54. Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2006. – Vol. 151. – Pp. 413–433.

55. Wiedenbeck M. Further characterization of the 91 500 zircon crystal / M. Wiedenbeck, J. M. Hanchar, W. H. Peck, P. Sylvester, J. Valley, M. Whitehouse, A. Kronz, Y. Morishita, L. Nasdala et al. // Geostandards Newsletter. – 2004. – Vol. 28. – Pp. 9–39.

56. 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, W. I. Ridley // Rev. Econ. Geol. – 1998. – Vol. 7. – Pp. 1–35.

57. 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.

REFERENCES

1. Bukhanova D. S. Pervye dannye o vozraste Malmyzhskogo zoloto-medno-porfirovogo mestorozhdeniya, Khabarovskiy kray. *Materialy konferentsii «Novoe v poznanii protsessov rudoobrazovaniya»*. Moscow, 2018, pp. 81–82.

2. Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii. In 2 books. Ed. A. I. Khanchuk. Vladivostok, Dal'nauka, 2006, 981 p.

3. Glebovitskiy V. A. Samorukova L. M., Sedova I. S. et al. Geokhimiya tsirkonov anatekticheskoy i diatektcheskoy stadiy formirovaniya migmatitov Severo-Zapadnogo Priladozh'ya. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk*, 2008, vol. 420, no. 6, pp. 813–817.

4. Ivanov V. V., Kononov V. V., Ignat'ev E. K. Mineralogo-geokhimicheskie osobennosti rudnoy mineralizatsii v metasomatitakh zoloto-mednogo rudnogo polya Malmyzh (Nizhnee Priamur'e). *Materialy Vserossiyskoy konferentsii: VIII Kosyginskie chteniya «Tektonika, glubinnoe stroenie i minerageniya Vostoka Azii»*. Khabarovsk, 2013, pp. 258–261.

5. Krasnobaev A. A. Tsirkon kak indikator geologicheskikh protsessov. Moscow, Nauka, 1986, 134 p.

6. Krivtsov A. I., Zvezdov V. S., Migachev I. F. et al. Medno-porfirovye mestorozhdeniya. Seriya: Modeli mestorozhdeniy blagorodnykh i tsvetnykh metallov. Moscow, Izdatel'stvo TsNIGRI, 2001, 232 p.

7. Malyshev Yu. F., Goroshko M. V., Rodionov S. M. et al. Glubinnoe stroenie i perspektivy poiskov krupnykh i sverkhkrupnykh mestorozhdeniy na Dal'nem Vostoke. *Krupnye i sverkhkrupnye mestorozhdeniya: zakonomernosti razmeshcheniya i usloviya obrazovaniya*. Moscow, 2005, pp. 423–430.

8. Migachev I. F., Girfanov M. M., Shishakov V. B. Medno-porfirovoe mestorozhdenie Peschanka. *Rudy i metally*, 1995, no. 3, pp. 48–58.

9. Nosyrev M. Yu., Didenko A. N., Gil'manova G. Z. Geofizicheskaya model' Malmyzhskogo rudnogo uzla po dannym magnitnogo i gravitatsionnogo anomal'nykh poley (Sikhote-Alin'). *Doklady Rossiyskoy akademii nauk*, 2022, vol. 506, no. 2, pp. 227–235, DOI: 10,31857/S2686739722800015.

10. Petrov O. V., Khanchuk A. I., Ivanov V. V. et al. U-Pb SIMS geokhronologiya rudonosnykh magmaticheskikh porod zoloto-medno-porfirovykh proyavleniy Malmyzhskogo i Poniyskogo rudnykh poley (Nizhnee Priamur'e). *Regional Geology and Metallogeny*, 2020, no. 83, pp. 41–56.

11. Petrov O. V., Kiselev E. A., Morozov A. F. et al. Gosudarstvennoe geologicheskoe kartografirovanie – effektivnyy put' k otkrytiyu mestorozhdeniy-liderov. *Regional Geology and Metallogeny*, 2015, no. 64, pp. 5–10.

12. Petrov O. V., Molchanov A. V., Terekhov A. V. et al. Karta zakonomernostey razmeshcheniya zoloto-medno-porfirovykh mestorozhdeniy Rossii mashtaba 1 : 2 500 000 (na osnove obobshcheniya rezul'tatov rabot po sostavleniyu komplektov gosudarstvennykh geologicheskikh kart mashtaba 1 : 1 000 000 tret'ego pokoleniya). *Regional Geology and Metallogeny*, 2020, no. 84, pp. 5–24.

13. Petrov O. V., Kiselev E. A., Shpikerman V. I. et al. Prognoz razmeshcheniya mestorozhdeniy zoloto-medno-porfirovogo tipa v vulkano-plutonicheskikh poyasakh vostochnykh rayonov Rossii po rezul'tatam rabot sostavleniya listov Gosgeolkarty-1000/3. *Regional Geology and Metallogeny*, 2019, no. 80, pp. 50–74.

14. Petrov O. V., Kiselev E. A., Khanchuk A. I. et al. Raspredelenie elementov-primesey (REE+Y, Hf, U, Th, Pb) v tsirkone kak indikator rudonosnosti magmaticheskikh porod Au-Cu-porfirovykh proyavleniy Malmyzhskogo i Poniyskogo rudnykh poley (Nizhnee Priamur'e, Dal'niy Vostok). *Regional Geology and Metallogeny*, 2020, no. 84, pp. 55–70.

15. Ryazanova E. I. Noveyshee otkrytie Dal'nego Vostoka Rossii – zoloto-medno-porfirovoe mestorozhdenie Malmyzh. *Geologiya v razvivayushchemsya mire*, 2015, pp. 52–55.

16. Skublov S. G., Lobach-Zhuchenko S. B., Guseva N. S. et al. Raspredelenie redkozemel'nykh i redkikh elementov v tsirkonakh iz miaskitovykh lamproitov Panozerskogo kompleksa Tsentral'noy Karelii. *Geochemistry*, 2009, no. 9, pp. 958–971.

17. Fedotova A. A., Bibikova E. V., Simakin S. G. Geokhimiya tsirkona (dannye ionnogo mikrozonda) kak indikator genezisa minerala pri geokhronologicheskikh issledovaniyakh. *Geochemistry*, 2008, no. 9, pp. 980–997.

18. Khanchuk A. I., Ivanov V. V., Ignat'ev E. K. et al. Al'b-senomanskiy magmatizm i mednyy rudogenez Sikhote-Alinya. *Doklady Rossiyskoy akademii nauk*, 2019, vol. 488, no. 3, pp. 69–73.

19. Khanchuk A. I. Palegeodinamicheskiy analiz formirovaniya rudnykh mestorozhdeniy Dal'nego Vostoka Rossii. *Rudnye mestorozhdeniya kontinental'nykh okrain*. Vladivostok, Dal'nauka, 2000, pp. 5–34.

20. Khanchuk A. I., Kruk N. N., Golozubov V. V. et al. Priroda kontinental'noy kory Sikhote-Alinya (po dannym izotopnogo sostava Nd v porodakh Yuzhnogo Primor'ya).

Doklady Rossiyskoy akademii nauk, 2013, vol. 451, no. 4, pp. 441–445, DOI: 10,7868/S0869565213220179.

21. Khanchuk A. I., Grebennikov A. V., Ivanov V. V. Al'b-senomanskiy okrainno-kontinental'nyy orogennyy poyas i magmaticheskaya provintsiya Tikhookeanskoy Azii. *Tikhookeanskaya geologiya*, 2019, vol. 38, no. 3, pp. 4–37.

22. Chitalin A. F., Efimov A. A., Voskresenskiy K. I. et al. Malmyzh – novaya krupnaya zoloto-medno-porfirovaya sistema mirovogo klassa na Sikhote-Aline. *Mineral'nye resursy Rossii. Ekonomika i upravlenie*, 2013, no. 3, pp. 65–69.

23. Chitalin A. F., Nikolaev Yu. N., Baksheev I. A. et al. Porfirovo-epitermal'nye sistemy Baimskoy rudnoy zony, Zapadnaya Chukotka. *Smirnovskiy sbornik – 2016. Chap. I. Problemy mineragenii, ekonomicheskoy geologii i prognoza mestorozhdeniy*. Moscow, MAKS Press, 2016, pp. 82–114.

24. Shatova N. V., Skublov S. G., Mel'nik A. E. et al. Geokhronologiya shchelochnykh magmaticheskikh porod i metasomatitov Ryabinovogo massiva (Yuzhnaya Yakutiya) na osnove izotopno-geokhimicheskogo (U-Pb, REE) issledovaniya tsirkona. *Regional Geology and Metallogeny*, 2017, no. 69, pp. 33–48.

25. Shashorin B. N., Makarov F. I., Rudnev V. V. et al. Geologo-geofizicheskaya model' Malmyzhskoy rudno-magmaticheskoy sistemy i vozmozhnosti ee ispol'zovaniya v prognozirovanii (Sikhote-Alin'). *Razvedka i okhrana nedr*, 2018, no. 2, pp. 9–16.

26. Ballard J. R., Palin M. J., Campbell I. H. Relative oxidation states of magmas inferred from Ce (IV)/Ce (III) in zircon: Application to porphyry copper deposits of northern Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2002, vol. 144, no. 3, pp. 347–364.

27. Bao X.-Sh., Yang L.-Q., Gau X. et al. Geochemical discrimination between fertile and barren Eocene potassic porphyries in the Jinshajiang Cu-Au-Mo metallogenic belt, SW China: Implications for petrogenesis and metallogeny. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 116, pp. 1–16.

28. Burnham A. D., Berry A. J. An experimental study of trace element partitioning between zircon and melt as a function of oxygen fugacity. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2012, vol. 95, pp. 196–212.

29. Dilles J. H., Kent A. J. R., Wooden J. L. et al. Zircon compositional evidence for sulfur-degassing from ore-forming arc magmas. *Economic Geology*, 2015, vol. 110, pp. 241–251.

30. Fu B., Page F. Z., Cavosie A. J. et al. Ti-in-zircon thermometry: Applications and limitations. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2008, vol. 156, pp. 197–215.

31. Grebennikov A. V., Khanchuk A. I. Pacific-type transform and convergent margins:igneous rocks, geochemical contrasts and discriminant diagrams. *International Geology Review*, 2020, vol. 63, no. 5, pp. 601–629, DOI: 10,1080/00206814,2020,1848646.

32. Hoskin P. W. O. Minor and trace element analysis of natural zircon (ZrSiO4) by SIMS and laser ablation ICP-MS: A consideration and comparison of two broadly competitive techniques. *Journal of Trace and Microprobe Techniques*, 1998, vol. 16, no. 3, pp. 301–326.

33. Hou Z.-Q., Ma H.-W., Zaw K. et al. The Himalayan Yulong porphyry copper belt: produced by large-scale strike-slip faulting at Eastern Tibet. *Economic Geology*, 2003, vol. 98, pp. 125–145.

34. Hou Z-Q., Qu X.-M., Wang S.-X. et al. Re-Os age for molybdenites from the Gangdese porphyry copper belt in the Tibetan plateau: implication to mineralization duration and geodynamic setting. *Sci. China*, 2004, vol. 47, pp. 221–231.

35. John D. A., Ayuso R. A., Barton M. D. et al. Porphyry copper deposit model. *Scientific Investigations Report 2010–5070-B, U. S. Geological Survey: Reston, Virginia*, 2010, 169 p.

36. Loader M. A., Wilkinson J. J., Armstrong R. N. The effect of titanite crystallisation on Eu and Ce anomalies in zircon and its implications for the assessment of porphyry Cu deposit fertility. *Earth and Planetary Science Letters*, 2017, vol. 472, pp. 107–119.

37. Lowell J. D., Guilbert J. M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Economic Geology*, 1970, vol. 65, no. 4, pp. 373–408.

38. Lu Y.-J., Loucks R. R., Fiorentini M. et al. Zircon compositions as a pathfinder for porphyry Cu ± Mo ± Au Deposits. *Society Economic Geology Special Publication*, 2016, no. 19, pp. 329–347.

39. Muller D., Groves D. I. Potassic igneous rocks and associated gold-copper mineralization. *Springer, the 4th Edition*, 2016, 311 p.

40. Nasdala L., Hofmeister W., Norberg N. et al. Zircon M257 – a homogeneous natural reference material for the ion microprobe U-Pb analysis of zircon. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2008, vol. 32 (3), pp. 247–265.

41. Paolillo L., Chiaradia M., Ulianov A. Zircon Petrochronology of the Kışladağ Porphyry Au Deposit (Turkey). *Economic Geology*, 2022, vol. 117, no. 2, pp. 401–422, DOI:10,5382/econgeo.4864.

42. Park J.-W., Campbell I. H., Malaviarachchi S. P. K. et al. Chalcophile element fertility and the formation of porphyry Cu ± Au deposits. *Mineralium Deposita*, 2019, vol. 54, pp. 657–670.

43. Parra-Avila L. A., Hammerli J., Kemp A. I. S. et al. The long-lived fertility signature of Cu-Au porphyry systems: insights from apatite and zircon at Tampakan, Philippines. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2022, vol. 177, no.18, pp. 1–22, DOI: 10,1007/s00410–021–01878–2.

44. Petrov O. V., Khanchuk A. I., Ivanov V. V. et al. Porphyry indicator zircons and geochronology of magmatic rocks from the Malmyzh and Pony Cu-Au porphyry ore fields (Russian Far East). *Ore Geology Reviews*, 2021, vol. 139, pp. 1–22.

45. Pizarro H., Campos E., Bouzari F. et al. Porphyry indicator zircons (PIZs): Application to exploration of porphyry copper deposits. *Ore Geology Reviews*, 2020, vol. 126, DOI: org/10,1016/j.oregeorev.2020,103771.

46. Qu P., Niu H.-C., Weng Q. et al. Apatite and zircon geochemistry for discriminating ore-forming intrusions in the Luming giant porphyry Mo deposit, Northeastern China. *Ore Geology Reviews*, 2022, vol. 143, pp. 1–17, DOI: org/10,1016/j.oregeorev.2022,104771.

47. Richards J. P., Kerrich R. Adakite-like rocks: Their diverse origins and questionable role in metallogenesis. *Economic Geology*, 2007, vol. 102, pp. 537−576.

48. Schuth S., Gornyy V. I., Berndt J. et al. Early Proterozoic U-Pb Zircon Ages from Basement Gneiss at the Solovetsky Archipelago, White Sea, Russia. *International Journal of Geosciences*, 2012, vol. 3, no. 2, pp. 289–296.

49. Shen P., Hattori K., Pan H. et al. Oxidation condition and metal fertility of granitic magmas: Zircon trace-element data from porphyry Cu deposits in the Central Asian Orogenic Belt. *Economic Geology*, 2015, vol. 110, pp. 1861–1878.

50. Shu Q., Chang Zh., Lai Y. et al. Zircon trace elements and magma fertility: Insights from porphyry (-skarn) Mo deposits in NE China. *Mineralium Deposita*, 2019, vol. 54, pp. 645–656.

51. Sillitoe R. H. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 2010, vol. 105, no. 1, pp. 3–41.

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

53. Soloviev S. G., Kryazhev S. G., Dvurechinskaya S. S. et al. The superlarge Malmyzh porphyry Cu-Au deposit, Sikhote-Alin, eastern Russia: Igneous geochemistry, hydrothermal alteration, mineralization, and

fluid inclusion characteristics. *Ore Geology Reviews*, 2019, vol. 113, pp. 1–27.

54. Watson E. B., Wark D. A., Thomas J. B. Crystallization thermometers for zircon and rutile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2006, vol. 151, pp. 413–433.

55. Wiedenbeck M., Hanchar J. M., Peck W. H. et al. Further characterization of the 91 500 zircon crystal. *Geostandards Newsletter*, 2004, vol. 28, pp. 9–39.

56. 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, W. I. Ridley. *Rev. Econ. Geol*, 1998, vol. 7, pp. 1–35.

57. Zheng Y., Duo J., Cheng S. et al. Progress in porphyry copper exploration from the Gangdise belt, Tibet, China. *Frontiers Earth Science China*, 2007, vol. 1, pp. 226–232.

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

Шатов Виталий Витальевич – канд. геол.-минерал. наук, директор, Центр прогнозно-металлогенических исследований, ВСЕГЕИ[1]. <vitaly_shatov@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>

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

Шпикерман Владимир Иосифович – доктор геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ[1]. <vladimir_shpikerman@vsegei.ru>

Петров Евгений Олегович – канд. геол.-минерал. наук, директор, Центр морской геологии, литогеодинамики и минерагении осадочных бассейнов, ВСЕГЕИ[1]. <evgeniy_petrov@vsegei.ru>

Снежко Виктор Викторович – канд. геол.-минерал. наук, директор, Центр информационных технологий по региональной геологии и металлогении, ВСЕГЕИ[1]. <viktor_snezhko@vsegei.ru>

Шманяк Антон Васильевич – вед. геолог, Центр морской геологии, литогеодинамики и минерагении осадочных бассейнов, ВСЕГЕИ[1]. <anton_shmanyak@vsegei.ru>

Молчанов Анатолий Васильевич – доктор геол.-минерал. наук, зав. отделом, ВСЕГЕИ[1]. <anatoly_molchanov@vsegei.ru>

Халенев Владимир Олегович – канд. геол.-минерал. наук, директор, Центр научно-методического и организационного обеспечения государственного геологического картографирования, ВСЕГЕИ[1]. <vladimir_khalenev@vsegei.ru>

Шатова Надежда Витальевна – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ[1]. <narlin.ros@mail.ru>

Родионов Николай Викторович – канд. физ.-мат. наук, зав. сектором, Центр изотопных исследований, ВСЕГЕИ[1]. <nickolay_rodionov@vsegei.ru>

Беляцкий Борис Владимирович – вед. инженер, Центр изотопных исследований, ВСЕГЕИ[1]. <bbelyatsky@mail.ru>

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

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

Shatov Vitaliy Vitalievich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Director, Centre of Prognostic-Metallogenic Research, VSEGEI[1]. <vitaly_shatov@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>

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

Shpikerman Vladimir Iosifovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Scientist, VSEGEI[1]. <vladimir_shpikerman@vsegei.ru>

Petrov Evgeniy Olegovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Director, Centre of marine geology, lithogeodynamics and metallogeny of sedimentary basins, VSEGEI[1]. <evgeniy_petrov@vsegei.ru>

Snezhko Viktor Viktorovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Director, Centre of informational technologies on regional geology and metallogeny, VSEGEI[1], <viktor_snezhko@vsegei.ru>

Shmanyak Anton Vasilyevich – Leading Geologist, Centre of marine geology, lithogeodynamics and metallogeny of sedimentary basins, VSEGEI[1]. <anton_shmanyak@vsegei.ru>

Molchanov Anatoly Vasilyevich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Department, VSEGEI[1]. <anatoly_molchanov@vsegei.ru>

Khalenev Vladimir Olegovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Director, Centre of scientific-methodological and organizational support of State geological mapping, VSEGEI[1]. <vladimir_khalenev@vsegei.ru>

Shatova Nadezhda Vitalievna – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, VSEGEI[1]. <narlin.ros@mail.ru>

Rodionov Nikolay Viktorovich – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of Sector, Centre of Isotopic Research, VSEGEI[1]. <nickolay_rodionov@vsegei.ru>

*Belyatskiy Boris Vladimirovic*h – Leading Engineer, Centre of Isotopic Research, VSEGEI[1]. <bbelyatsky@mail.ru>

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

[1] Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.
A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia, 199106.

[2] Дальневосточный геологический институт ДВО РАН (ДВГИ ДВО РАН). Пр. 100-летия Владивостока, 159, Владивосток, Россия, 690022.
Far East Geological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences (FEGI FEB RAS). 159 Prospect 100-Letya Vladivostoka, Vladivostok, Russia, 690022.