

УДК 550.4.02

ЭВОЛЮЦИЯ КАРИЙСКОЙ РУДНО-МАГМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ, РОССИЯ): ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

© 2021 г. С. В. Ефремов^{a, *}, А. М. Спиридовон^a, Н. А. Горячев^{a, b}, А. Е. Будяк^a

^aИнститут геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, ул. Фаворского, 1а, Иркутск, 664033 Россия

^bСеверо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН,
ул. Портовая, 16, Магадан, 685000 Россия

*e-mail: esv@igc.irk.ru

Поступила в редакцию 25.06.2019 г.

После доработки 10.11.2020 г.

Принята к публикации 16.11.2020 г.

Предложенная вашему вниманию статья посвящена апробации нового методического подхода к расшифровке эволюции рудно-магматических систем (РМС). Подход основан на изучении геохимических полей, связанных с различными этапами эволюции магматического очага, сопровождающегося рудной минерализацией. В качестве материала для исследований использовались результаты геохимических съемок по потокам рассеяния в пределах Карийского рудного узла (Восточное Забайкалье). Выполненный анализ особенностей состава и последовательности выделения геохимических полей позволил более детально взглянуть на эволюцию Карийской РМС. Было установлено, что мы имеем дело с сильно эродированной редкометалльной РМС, сформированной в два этапа рудообразования. Первый этап рудообразования связан с эволюцией верхней магматической камеры (апикальной части Кара-Чачинского массива). Главным полезным компонентом этой РМС был Mo. Второй этап развития РМС связан с эволюцией нижней магматической камеры. Эта минерализация также была редкометалльной, ее профилирующими элементами были W и Mo, однако главным полезным компонентом является Au. Было установлено, что Au мобильно на двух этапах эволюции поздней РМС и накапливается при наложении одной стадии минерализации на другую. В качестве источника Au могут рассматриваться гранитоиды Кара-Чачинского массива. Не менее вероятной является гипотеза о поступлении его вместе с В с нижних уровней магматической системы, либо в составе трансмагматических флюидов из-за ее пределов.

Ключевые слова: золото, рудно-магматические системы, новые методы обработки геохимической информации, Карийский рудный узел, Восточное Забайкалье

DOI: 10.31857/S0016777021030047

ВВЕДЕНИЕ

Изучение рудно-магматических систем (РМС) имеет большое значение для совершенствования методик поисков и оценки рудных объектов, образование которых связано с эволюцией магматических очагов. Начиная с работ (Spurr, 1907; Эмmons, 1933; Смирнов, 1937) и по сей день, эта тема остается актуальной.

На данный момент времени существует многообразие подходов к исследованию РМС. В основном они базируются на дискретном изучении магматических горных пород, околорудных метасоматитов и руд, с определением особенностей их минерального состава, возраста, геохимической и изотопной характеристик.

В предложенной вашему вниманию статье использован подход, основанный на изучении гео-

химических полей, связанных с различными этапами эволюции магматического очага, сопровождающегося рудной минерализацией.

Состав и последовательность формирования геохимических полей, связанных с различными стадиями минералообразования, позволяют более полно проследить эволюцию рудно-магматической системы. Подобный подход дает нам ряд преимуществ – от пространственной локализации геохимических полей продуктивной стадии минерализации до экономической оценки рудного объекта на ранних стадиях его изучения.

Использованные в этой работе геохимические съемки по потокам рассеяния проводились в пределах Карийского рудного узла (Восточное Забайкалье), часть месторождений и рудопроявлений которого связывается со становлением Кара-Чачинского гранитоидного массива амуджикано-

средненского комплекса (Спиридов и др., 2006). Выполненные ранее исследования дали возможность рассматривать эти объекты в составе единой РМС, называемой далее Кариейской.

Согласно опубликованной информации, РМС имела сложную историю развития, что привело к значительным вариациям взглядов в отношении этого геологического объекта, вплоть до полигенности и полихронности рудной минерализации (более подробно (Спиридов и др., 2006 и ссылки в этой работе)). Главной целью настоящих исследований является отработка методики выделения этапов эндогенной активности по геохимическим полям, связанным с различными этапами эволюции рудно-магматических систем.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ПРИ ВЫДЕЛЕНИИ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ОРЕОЛОВ РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

Методические подходы, использованные в этой работе, подразделены на две части. Первая рассматривает возможность выделения ассоциаций элементов, характеризующих тот или иной этап эволюции РМС. Вторая посвящена методикам расчета ассоциаций химических элементов и построению геохимических карт.

Теоретические предпосылки выделения элементных ассоциаций, характеризующих этапы становления рудно-магматической системы

В основе выделения ассоциаций химических элементов, характеризующих тот или иной геологический процесс, лежит понятие геологического тела. Под геологическим телом обычно понимается пространственная область, имеющая геологические границы и выдержаный минеральный состав.

Минералы, как и любые химические соединения, состоят из химических элементов. Поэтому определенная ассоциация минералов будет выражена в определенной ассоциации химических элементов. Иными словами, существует тождественная связь: ассоциация элементов – ассоциация минералов – геологическое тело, т.е. картируя ассоциацию химических элементов, мы картируем геологическое тело.

С этих позиций геохимический ореол также является геологическим телом, и его положение в пространстве определяется распространением ассоциации минералов, образование которых связано с формированием рудного объекта.

Модели формирования эндогенных геохимических полей не выделяют отдельно этап формирования рудного тела (Соловов, 1985). Первичный ореол и рудное тело формируются в результате единой порции растворов¹, а отделение первого от второго выполняется по экономическим показателям.

Следуя этим представлениям, для каждой стадии рудного процесса существует свой геохимический ореол, сопряженный со своим рудным телом.

Эволюция рудно-магматической системы выражена в последовательной смене этапов, каждый из которых представлен собственной ассоциацией минералов и, соответственно, ассоциацией элементов. Таким образом, картируя ассоциации химических элементов, мы фиксируем области распространения минералов ассоциации того или иного этапа эволюции РМС. Иными словами, изучая геохимические поля рудного объекта, связанного с магматическим очагом, мы отслеживаем эволюцию рудно-магматической системы.

Для сопоставления ассоциации химических элементов с тем или иным геологическим процессом (генетическое соотнесение) может быть использована последовательность минералообразования в гидротермальной системе, связанной с оставающим магматическим (гранитоидным) очагом, изложенная в работе Б.Л. Флерова (Флеров, 1976). Этим автором было выделено пять стадий минерализации (наборов минеральных парагенезисов) в рамках пневматолитового и гидротермального этапов эволюции системы, сопровождающихся собственной ассоциацией типоморфных минералов, которые можно рассматривать как минералогические/геохимические реперы.

Пневматолитовый этап: щелочной метасоматоз, преимущественно выраженный в новообразовании щелочного полевого шпата (типоморфные элементы этой стадии: K, Na, Rb, Cs, Pb, Be)²; грейзенизация, выраженная в образовании слюд, топаза, турмалина, берилла, кассiterита, вольфрамита (типоморфные элементы этой стадии: Li, Rb, B, F, Be). Гидротермальный этап: высокотемпературный, выражен в новообразовании кассiterита, вольфрамита, молибденита, иногда, в подчиненном количестве, турмалина и топаза (типоморфные элементы этой стадии: Sn, W, Mo); среднетемпературный, выражен в новообразовании сульфидов меди, железа, свинца, цинка (типоморфные элементы этой стадии: Cu, Fe, Zn, Pb, Ag); низкотемпературный, выражен в образовании сульфосолей, селенидов, теллуридов (типоморфные элементы этой стадии: Bi, Se, Te, Pb, Ag).

Учитывая то, что система является рудно-магматической, схема Б.Л. Флерова была дополнена представлениями о геохимических полях магматического этапа. Согласно использованной идеологии, гранитоидный массив/магматический очаг также является геологическим телом с выдержанной минералогией и типичной для нее элементной ассоциацией. Ассоциация эта не остается постоянной и зависит от геохимического типа гра-

¹ Это позволяет говорить о том, что ассоциация минералов и ассоциация элементов едины в первичном ореоле и рудном теле.

² Здесь и далее по разделу химические элементы, характеризующие стадии минерализации, добавлены авторами статьи, опираясь на химический состав минералов.

нитоидной магмы (Таусон, 1977), в связи с чем выделение геохимических полей магматического этапа требует предварительной геохимической типизации магматических пород района работ.

Используя рассмотренный выше методический подход, мы вполне можем выделить геохимические поля различных этапов эволюции рудно-магматической системы, начиная от магматического и заканчивая низкотемпературным гидротермальным.

Некоторого пояснения требует возможность применения этой модели при интерпретации данных по потокам рассеяния. Известно, что потоки рассеяния образуются за счет размыва вторичных ореолов рассеяния, в свою очередь формирующихся за счет разрушения рудного тела и его первичного ореола. Как отмечалось ранее, ассоциация химических элементов отражает ассоциацию минералов, и, как следствие этого, “стабильность” ассоциации химических элементов во вторичных ореолах и потоках рассеяния будет определяться устойчивостью минералов в зоне гипергенеза. Учитывая скорость денудации (расчлененность рельефа) и климатические условия на период формирования аллювия в пределах Кариjsкого рудного узла, можно говорить о слабом развитии процессов химического выветривания и высокой устойчивости рудных минералов в делювиальных и аллювиальных отложениях. Это позволяет говорить о том, что зональный первичный ореол будет иметь зональный вторичный ореол, а зональный вторичный ореол будет сопровождаться зональным потоком рассеяния.

Иными словами, зоны, фиксирующие распространение минеральных ассоциаций для первичного ореола, будут выражены как во вторичных ореолах, так и в потоках рассеяния. Авторы осознают, что это довольно смелая формализация процессов ореолообразования, поэтому была изучена последовательность выделения минеральных ассоциаций, характеризующая рудный процесс в пределах Пильненского месторождения (Карийский рудный узел), определен химический состав минералов и руд. Выявлен набор химических элементов, свойственный каждой стадии минерализации, и создана основа для разделения комплексного геохимического ореола на зоны, соответствующие этапам эндогенной активности в РМС (более подробно результаты изложены в работе (Ефремов и др., 2018,¹)). Сравнение элементных ассоциаций, характеризующих рудный процесс, и ассоциаций, рассчитанных по литогеохимической съемке по потокам рассеяния, показало их полную идентичность, что позволяет говорить о возможности применения подобной формализации и рассматривать полученные результаты как корректные.

Также следует обратить внимание на возможность контроля проницаемыми зонами геохимических аномалий, выделенных по потокам рассеяния. Учитывая ограниченную протяженность потока рассеяния, можно говорить о незначительном

(в региональном плане) смещении его аномальной зоны от рудного тела/рудной зоны, контролируемых проницаемыми геологическими структурами, т.е. о пространственном контроле этих аномалий проницаемыми зонами.

Это наглядно иллюстрируется приуроченностью геохимических аномалий к границам кольцевой структуры/магматического очага, выделенной с помощью геолого-структурного метода (фиг. 2б).

Выделение ассоциаций химических элементов и построение геохимических карт

Выделение ассоциаций химических элементов начинается с подготовки численных данных. Процедура более подробно описана в работе (Ефремов, 2015) и подразумевает:

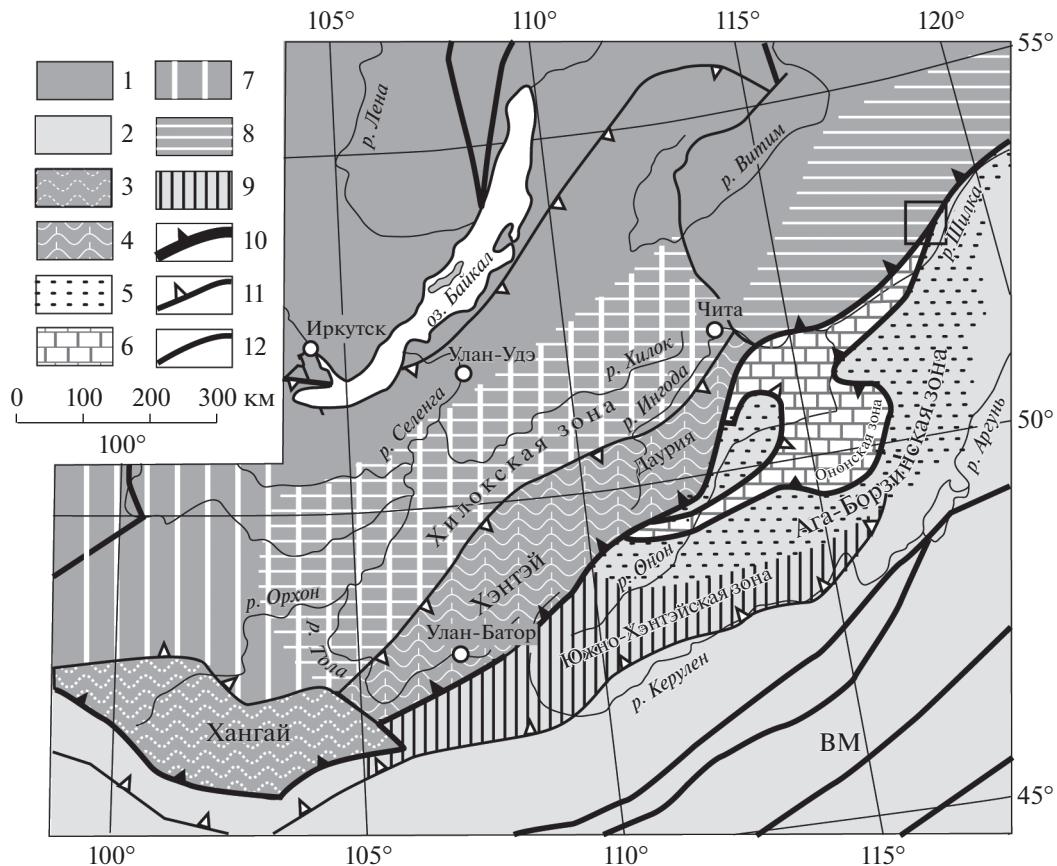
- 1) проверку качества аналитической информации;
- 2) проверку закона распределения для каждого химического элемента;
- 3) расчет статистических параметров выборки с учетом закона распределения для каждого элемента;
- 4) приведение значений концентраций химических элементов к единым единицам измерения (стандартизация выборки $Z = (C_i - \bar{X})/S$, где C_i – концентрация элемента, \bar{X} – среднее значение, S – стандартное отклонение).

Расчет ассоциаций элементов проводился с помощью R-факторного анализа, по корреляционной матрице с фиксацией количества факторов по количеству химических элементов в выборке и ограничением вклада в суммарную дисперсию в 1%. Учитывая многократное наложение стадий рудоотложения друг на друга в пределах Кариjsкой РМС, а также то, что мы имеем дело с сортированным веществом потоков рассеяния, для снижения доли ложных зависимостей был выполнен пересчет координат (вращение координатных осей, процедура Varimax)³.

Для “визуализации” ассоциаций химических элементов использовалась таблица величин факторных нагрузок. В пределах выделенного фактора химические элементы ранжировались по величине факторных нагрузок. В таком виде фактор, теоретически, может рассматриваться как ассоциация химических элементов, поведение которых контролируется единственным геологическим процессом. Примеры выделенных подобным образом ассоциаций приведены в табл. 2.

Численные значения для каждого фактора рассчитывались в каждой пробе, и по этим данным строилась карта ассоциаций. Сеть опробования пересчитывалась на регулярную, значения в узлах сети оценивались с помощью весовой функции $1/d^2$, где d – расстояние от узла сети до точки

³ Для статистических расчетов использовалась программа Statistica v.8, компании StatSoft.



Фиг. 1. Схема геодинамического районирования забайкальской части Монголо-Охотского складчатого пояса и его обрамления (Zorin et al., 1999):

1 – Сибирский континент в поздней перми–ранней юре; 2 – Монголо-Китайский континент в поздней перми–ранней юре; 3 – девон-карбоновый аккреционно-субдукционный клин у активной континентальной окраины андийского типа; 4 – то же, но с наложенной пермско-раннеюрской фронтальной частью активной окраины андийского типа; 5 – позднепермская–раннеюрская пассивная континентальная окраина (шельф, континентальный склон и его подножие); 6 – Оионский островодужный террейн с девонско-карбоновыми аккреционно-субдукционными клиньями и позднетриасовым задуговым бассейном. Зоны влияния Монголо-Охотского пояса (активные окраины андийского типа): 7 – девон–средний карбон, 8 – поздний карбон–ранняя пермь, 9 – поздний карбон–ранняя юра, 10 – Монголо-Охотская сутура; 11 – надвиги; 12 – сбросы.

опробования. Карты строились с помощью программного комплекса Surfer v.11 компании Golden Soft.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Геологическое строение района работ и стадийность минералообразования

Карийский рудный узел находится в пределах Пришилкинской подвижной зоны Монголо-Охотского сутурного шва (фиг. 1), образовавшегося в результате коллизии Сибирского и Монголо-Китайского континентов, после закрытия Монголо-Охотского океана (Зоненшайн и др., 1990, Zorin, 1999).

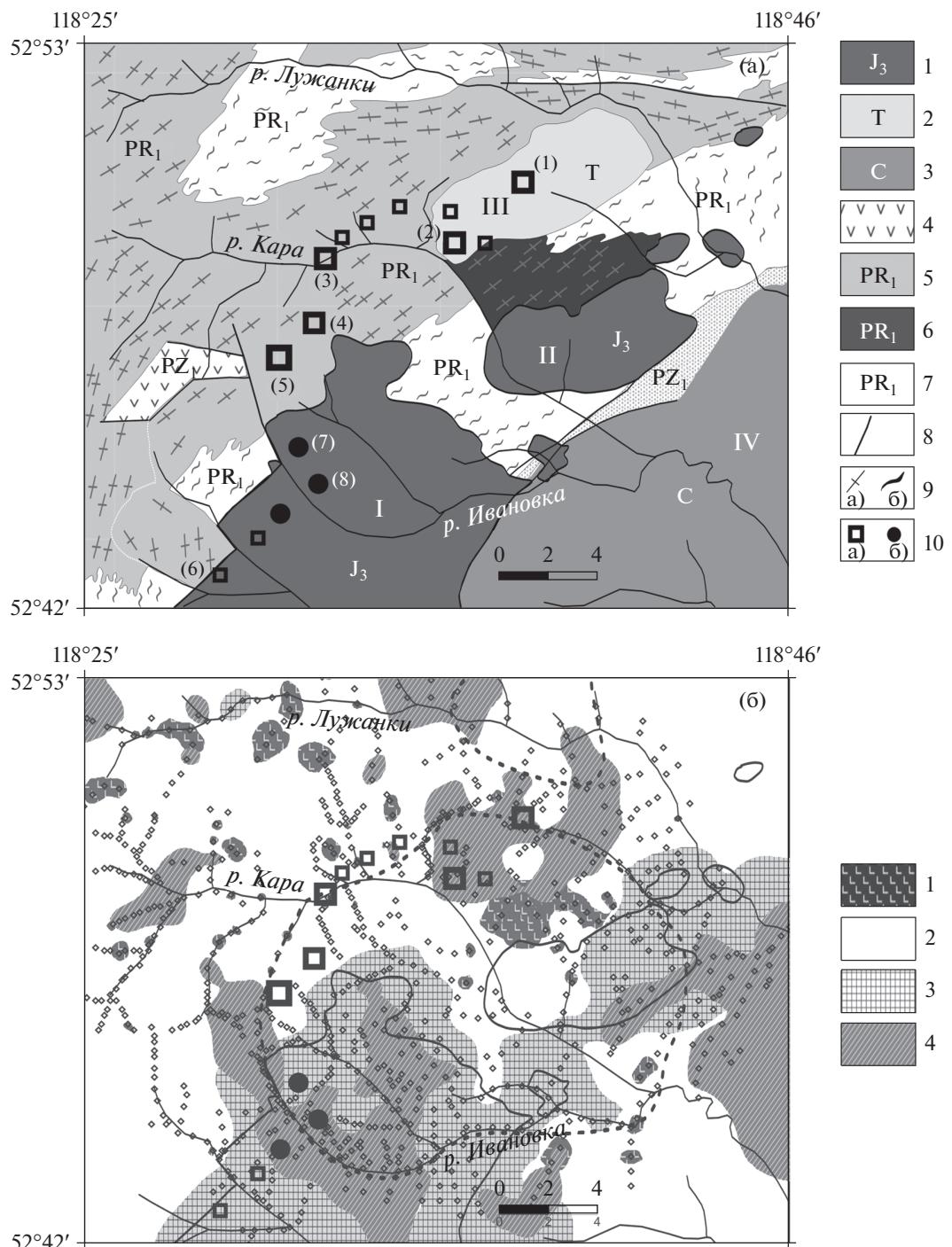
В пределах участка работ обнажены породы раннего протерозоя, представленные габбро, тоналитами, гранодиоритами с гнейсовидной тек-

турой. Породы “рамы” прорваны среднепалеозойскими и верхнеюрскими (амуджикано-средненский комплекс) гранитоидами (фиг. 2а)⁴.

Месторождения и рудопроявления золота “облекают” с севера, северо-запада Кара-Чачинский массив, сложенный гранитоидами амуджикано-средненского комплекса, рассматриваемый в качестве ядра Карийской РМС. Связь золотой минерализации с гранитоидами амуджикано-средненского комплекса объясняется синхронным внедрением даек грорудитов⁵ и отложением рудной минерализации продуктивной стадии (Спиридов и др., 2006).

⁴ Таксономическое разделение магматических пород дано согласно легенде единственной кондиционной геологической карты М 1 : 200000.

⁵ Кварц-кпш-эгириновые породы (местное название).



Фиг. 2. Схематическая геологическая карта района работ (а) и комплексная геохимическая карта, отражающая распространение магматических пород на площади работ (б).

(а) 1 – позднеюрские гранитоиды амуджикано-сретенского комплекса; 2 – триасовые гранитоиды (Пильнинский массив); 3 – каменноугольные гранитоиды; 4 – раннепалеозойские вулканиты; 5–6 – раннепротерозойские интрузивные магматические породы: 5 – граниты, тоналиты, гранодиориты, 6 – габбро; 7 – раннепалеозойские метаморфические толщи; 8 – разрывные нарушения; 9 – текстурные особенности пород: а) гнейсовидность; б) прослойки мигматитов; 10 – месторождения и рудопроявления: а) золота: (1) – Дагиня, (2) – Пильненское, (3) – Амурские дайки, (4) – Новинка, (5) – Сульфидный, (6) – Богочинское; б) молибдена: (7) – Барановское, (8) – Ивановское. Гранитоидные массивы: I – Кара-Чачинский; II – Верхнекарийский; III – Пильнинский; IV – Карийский.

(б) 1–2 – раннепротерозойские магматические породы (строка 1, табл. 2): 1 – граниты, гранодиориты, тоналиты; 2 – габбро; 3 – геохимическое поле гранитоидов амуджикано-сретенского комплекса (строка 2, табл. 2); 4 – геохимическое поле, связанное с распространением калишпатовых гранитов (строка 3, табл. 2). Точками даны места отбора проб. Толстая пунктирная линия проведена по речной сети, совпадает с границами кольцевой структуры выделенной другими авторами (более подробно см. Спиридовон и др., 2006).

Данные о последовательности отложения рудных ассоциаций в пределах Карицкой РМС необходимы нам для генетического соотнесения геохимических ореолов, поэтому рассмотрим их более подробно. Описания рудных формаций, последовательных минеральных ассоциаций даны на основании работы (Ефремов и др., 2018₁).

Для рудного узла характерно широкое разнообразие типов руд, объединенных в две рудные формации: вольфрамит-молибденит-кварцевую и золото-редкометалльную.

Вольфрамит-молибденит-кварцевая рудная формация в пределах Карицкой РМС распространена незначительно. Минеральные образования, относимые к этой формации, развиты в апикальных частях Кара-Чачинского массива и его ближнего экзоконтакта. В ее пределах выделяются три минеральных ассоциации: кварц-магнетитовая, вольфрамит-молибденит-кварцевая и карбонатная-сiderитовая.

Вольфрамит-молибденит-кварцевая минеральная ассоциация является продуктивной и отнесена к высокотемпературной стадии эволюции гидротермальной системы, связанной с Кара-Чачинским массивом. Типоморфными элементами этой стадии минерализации являются Mo, W.

Учитывая то, что вскрыта апикальная часть магматической камеры, уровень эрозионного среза редкометалльного объекта может быть оценен как подрудный, а сам объект как бесперспективный. Золотоносность этого этапа эволюции Карицкой РМС крайне низка.

Золото-редкометалльная рудная формация наиболее широко распространена в Карицкой РМС. В пределах формации выделяются кварц-пирит-турмалиновая, кварц-молибденит-шеелитовая с золотом, пирит-халькопирит-сульфоарсенидная, золото-висмутотеллуридная минеральные ассоциации, сопоставленные с разными этапами развития РМС.

Минеральные ассоциации этой формации наложены на предыдущие и предваряются высокотемпературным метасоматозом. Важной характеристикой этого этапа рудообразования является привнос бора (кристаллизация турмалина) и появление в системе золота, наряду с редкометалльной (вольфрам-молибденовой) минерализацией. В большинстве случаев подобное наложение минеральных ассоциаций и частичная смена геохимической специализации связывается со вскрытием более глубокого магматического очага, в пределах одного и того же плутона, при возобновлении тектонических движений. Эволюция подобных систем более подробно рассмотрена в работах (Флеров, 1976; Таусон, 1977).

В пределах кварц-пирит-турмалиновой выделяется две минеральные ассоциации: кварц-пиритовая и кварц-турмалиновая. Они были сопоставлены с зонами площадной сульфидизации, турмалинизации и отнесены к пневматолитовому этапу эволюции РМС. Для пирита этой стадии характерны повышенные концентрации Co (до 2.46 мас. %)

и Ni (до 0.2 мас. %), третьим элементом, характеризующим эту стадию, может быть В.

Кварц-молибденит-шеелитовая ассоциация названа по основным рудным минералам, однако в ее состав также входят турмалин, висмутин и золото. Она сопоставлена с высокотемпературным гидротермальным этапом эволюции РМС. Основные химические элементы, свойственные этой стадии минерализации: W, Mo, Bi, Au, В.

Главными минералами пирит-халькопирит-сульфоарсенидной минерализации являются халькопирит, ватанабеит/арсенопирит. Менее распространены галенит, энаргит и айкинит. Сопоставлена со среднетемпературным гидротермальным этапом эволюции РМС. В качестве основных химических элементов ассоциации могут быть выделены: Cu, As, Pb, Ag.

Золото-висмутотеллуридная минеральная ассоциация завершает развитие РМС. Для нее характерна кристаллизация блеклых руд, теллуридов висмута, золота и серебра, самородного золота. Отнесена к низкотемпературной гидротермальной стадии развития РМС. Типичные химические элементы: Bi, Te, Au.

В пределах рудного узла широко развито наложение одной стадии минерализации на другую, что приводит к “разрастанию” минеральных ассоциаций, однако главные химические элементы, характеризующие тот или иной эпизод рудного процесса, выделяются уверенно.

Геохимическая типизация гранитоидов амуджикано-средненского комплекса

Гранитоиды амуджикано-средненского комплекса изучались в пределах Кара-Чачинского массива. Массив имеет трехфазовое строение. Гранитоиды первой фазы представлены амфиболовыми монцодиоритами, гранитоиды второй фазы представлены порфировидными биотит-амфиболовыми гранодиоритами, гранитоиды третьей фазы представлены гигантопорфировыми биотит-амфиболовыми гранитами (Спиридов, 2006).

Дайковая серия пород, связанная с комплексом, сложена грорудитами и гибридными порфиритами. Они считаются наиболее поздними продуктами эволюции магматической системы (Спиридов и др., 2006).

Гранитоиды первой фазы, гибридные порфириты. По своей геохимической характеристике они наиболее близки к производным первичных мантийных магм. Породы обладают довольно выдержаным содержанием SiO_2 , колеблющимся от 57 до 59 мас. %. Им свойственна высокая магнезиальность ($\text{Mg}^{\#} = 65\text{--}69$), суммарная щелочность ($\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} = 7.4\text{--}7.6$ мас. %, преобладание натрия над калием ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 1.1\text{--}1.2$), невысокие концентрации Ti, Al, слабо повышенные – Р.

Среди рассеянных элементов отмечаются аномальные концентрации Cr (470–660 г/т), Ni (140–

160 г/т), повышенные концентрации Rb (118–165 г/т), Cs (4.5–14 г/т), В (11–27 г/т), U (3.5–5 г/т), Th (6.5–11 г/т), Pb (11–55 г/т), умеренные концентрации Ba и Sr (393–550 и 341–345 г/т), повышенные концентрации LREE, пониженные HREE и Y.

По минеральному составу они полностью соответствуют примитивным санукитоидам – “мантийным” гранитоидам архейских кратонов, аналогам низкокремнистых адакитов (LSA), контаминированным веществом континентальной коры (Martin et al., 2005). Источником санукитоидов считаются перидотиты верхней мантии, метасоматически преобразованные адакитовыми расплавами (Rapp et al., 2010).

Гранитоиды второй и третьей фаз комплекса наследуют все геохимические особенности более основных пород, рассмотренных в предыдущем разделе. Им также свойственна повышенная магнезиальность ($Mg\# = 0.65–0.55$), аномальные концентрации Cr и Ni, преобладание Na над K, при более высокой суммарной щелочности, повышенные концентрации Rb, Li, Cs, Ba, Sr, LREE, низкие концентрации HREE и Y. Отличаются они более высокими концентрациями кремния и салических компонентов. Колебания содержаний SiO_2 в гранитоидах второй фазы 67.81–70.49 мас. %, третьей фазы 71.36–73.14 мас. %.

Гранитоиды комплекса являются геохимически специализированными на Au, что вполнеично для санукитоидов. Наибольшее обогащение свойственно гранитоидам первой фазы, гибридным порфирам (примитивным санукитоидам). Средняя концентрация металла в этих породах достигает 14 ppb, что в три с половиной раза превышает кларк для основных пород (Войткевич, 1990). Менее высокие концентрации свойственны гранитоидам второй (12 ppb) и третьей (10 ppb) фаз.

Главной особенностью гранитоидов всего комплекса в целом является их аномальная магнезиальность и аномальные концентрации Cr, Ni, наряду с повышенными концентрациями В, Rb, Li, Cs, Ba, Sr, U, Th, LREE. Эта особенность позволяет выделить геохимические поля, связанные с гранитоидами комплекса, пространственно зафиксировав положение интрузивных тел и связанных с ним дайковых поясов.

Анализ строения геохимического поля Карийской рудно-магматической системы

Для построения геохимических карт были использованы 853 литохимические пробы, отобранные из временных и постоянных водотоков площади работ. Схема опробования приведена на фиг. 2б. Пробы проанализированы на 25 химических элементов⁶. Использованный нами набор элементов недостаточен для полного разделения геохимических полей, вполне очевидно не хватает данных по K, Na, Al, Ca, Rb, Cs, Ba, Sr, накапливающихся в минералах “энергоемких” стадий

эволюции РМС. Набор элементов и статистические параметры выборки приведены в табл. 1.

Анализ данных таблицы показывает хорошую сходимость с представлениями о типе рудной минерализации. Отмечаются аномальные концентрации Mo, W (в молибдените, вольфрамите и шеелите), В (в составе турмалина), Pb, Zn, Cu, As, Bi (в сульфидах и сульфосолях) и Au, присутствующего в самородном виде. По сути, РМС имеет редкометальную специфику, однако основным полезным компонентом является Au.

Для построения комплексной геохимической карты были выбраны 10 ассоциаций, последовательно описывающих эволюцию РМС (табл. 2). Первые три ассоциации соответствуют геохимическим полям магматического этапа, относящимся к различным гранитоидным комплексам. Учитывая то, что изверженными породами покрыто более 90% площади работ, эти три ассоциации позволяют определить пространственное положение геологических тел, соответствующих различным гранитоидным комплексам, и сравнить полученный результат с геологической картой. Хорошее совпадение геохимической и геологической карт будет свидетельствовать о корректности использованных методов расчета и теоретических выкладок.

Первая ассоциация элементов описывает вариации составов пород в пределах массивов раннепротерозойских магматических горных пород. Составы меняются от габбро до плагиогранитов, однако основной объем массивов сложен тоналитами и гранодиоритами.

Согласно геохимическим характеристикам (Ефремов и др., 2018₂), при нашем наборе элементов, габбро от гранитоидов комплекса наиболее четко может быть отделено по содержаниям Ti (разница 1.5–2 раза) и величине отношений LREE/HREE (разница 1 порядок), что, в принципе, и выражено в элементной ассоциации, где на первом месте стоит Ti, а Y имеет близкий весовой коэффициент с La.

Учитывая, что породы этого комплекса слагают большую часть площади работ, используем эту ассоциацию в качестве “базового” слоя на геохимической карте (фиг. 2б).

В данном случае проверить соответствие геохимических полей реальным геологическим телам довольно сложно, так как габбро слагает пла-

⁶ В задачи реализуемого проекта не входили количественная оценка составов горных пород и количественная оценка геохимических аномалий, поэтому для характеристики проб был использован приближенно-количественный спектральный анализ. Учитывая, что для расчета элементных ассоциаций на базе корреляционной матрицы нам нужны относительные концентрации химических элементов, этот вид анализа, обладая хорошей воспроизводимостью, позволяет получить корректные результаты, и его использование вполне оправдано. Это довольно отчетливо следует из сравнения элементных ассоциаций, характеризующих стадии рудообразования (см. ниже в данной статье), и элементных ассоциаций, рассчитанных по приближенно-количественным данным (табл. 2).

Таблица 1. Статистические параметры выборки

Элемент	Количество проб	Предел обнаружения, ppm	Минимум	Максимум	Среднее	Стандартное отклонение
Au	853	0.002	0.002	6	0.005	0.27
Pb	853	1	1	200	20	17
Sn	853	1	1	8	2.4	1.5
Zn	853	10	15	800	68	45.5
Ag	853	0.1	0.1	4	0.4	0.18
As	853	10	10	800	13	29
B	853	3	4	1000	26	121
Cu	853	1	8	600	28	44
Mo	853	1	1	60	5	9
W	853	10	1	80	2.5	5
Be	853	1	1.5	6	3	0.8
Li	853	10	10	80	27	13
Bi	853	1	1	40	1	5
Ni	853	1	2	80	21	11
Co	853	1	1	50	10	7
V	853	1	20	200	64	12
Mn	853	300	300	4000	674	373
Cr	853	1	2	100	26	17
Ti	853	50	50	9000	3900	1447
Ga	853	1	1	40	15	8
Ge	853	1	1	5	1	1.6
Sc	853	10	10	40	10	10
Y	853	10	10	60	10	12
La	853	30	50	400	65	59
P	853	40	40	1000	125	98

Примечание. Концентрации элементов даны в граммах на тонну. Анализы выполнены в Центре коллективного пользования “Изотопно-геохимических исследований”, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, аккредитация (Аттестат № RA.RU.21ГП12 от 15.11.2015г.). Au — атомно-адсорбционный, остальные элементы — приближенно-количественный эмиссионно-спектральный метод.

стовые тела в тоналитах, обнажаясь в небольших эрозионных окнах, а крупные выходы их довольно редки. Тем не менее, отмечается хорошее совпадение контуров геохимического поля и массива габбро в центральной части площади, на левом берегу р. Кара.

Вторая ассоциация элементов может быть со-поставлена с гранитоидами амуджикано-среднен- ского комплекса. Об этом свидетельствуют Cr, Ni, B, возглавляющие ассоциацию элементов, повышенные концентрации которых свойственны гранитоидам.

Геохимическое поле этой ассоциации было “подрезано” по нулевому значению и наложено на базовый слой⁷. Вполне очевидно, что это геохимическое поле пространственно приурочено к гранитоидам Кара-Чачинского массива и Верхнекарийского штока гранитоидов этого комплекса (фиг. 2б). Учитывая, что геохимическое поле, фиксирующее обе интрузии, является единым, можно говорить о двух куполах крупной, единой интрузии, находящихся на разном уровне эрозионного среза.

⁷ Все последующие слои карты “подрезаны” по нулевому значению.

Третья ассоциация элементов довольно своеобразна и состоит из Pb, Ga. В отсутствие данных по Ba, Sr, K, Na, Al можно предположить, что ореолы этой ассоциации отражают положение в пространстве калишпатовых гранитоидов (Pb замещает K, а Ga — Al в кристаллической решетке минерала). Они развиты в пределах Пильненского, Кариевского и Кара-Чачинского (зоны, насыщенные включениями гигантских кристаллов калиевого полевого шпата) массивов.

Полученная нами карта ассоциаций магматического этапа в пределах Кариевского узла (фиг. 2б) вполне сопоставима с геологической картой (фиг. 2а), что свидетельствует о приемлемом качестве аналитических данных, использованных теоретических выкладок и методов обработки численной информации.

Все последующие ассоциации элементов могут быть сопоставлены с рудными процессами, связанными с эволюцией Кариевской РМС.

Следующая ассоциация химических элементов является редкометалльной, главную роль в которой играют Mo и W, она может быть сопоставлена с вольфрамит-молибденитовой минерализацией вольфрамит-молибденит-кварцевой рудной формации. Геохимические поля этой ас-

Таблица 2. Элементные ассоциации комплексного геохимического ореола

Магматический этап											
1	Гранитоиды PR ₁	Ti	Sc	Y	V	La	Li	Ni	Ga		
		0.93	0.19	0.16	0.15	0.13	0.13	0.12	0.10		
2	Амуджикано-Сретенский комплекс	Cr	B	Ni	Sn	Pb	V	Ge	W	Bi	Cu
		0.91	0.26	0.22	0.22	0.19	0.18	0.15	0.15	0.12	0.12
3	Калишпатовые граниты (разные комплексы)	Pb	Ga								
		0.11	0.11								
Вольфрамит-молибденит-кварцевая формация											
4	Вольфрамит-молибденит-кварцевая (гидротермальный высокотемпературный этап)	Mo	W	Cu	Bi	Ag	Sn	Pb	Ni		
		0.87	0.34	0.29	0.23	0.15	0.13	0.13	0.12		
Золото-редкометалльная формация											
5	Кварц-пиритовая ассоциация (пневматолитовый этап)	Co	Ni	Li	Mn	V	Mo				
		0.95	0.17	0.13	0.13	0.12	0.12				
6	Кварц-молибденит-шеелитовая (гидротермальный высокотемпературный этап)	W	Bi	Mo	Cu	Au	Ge	Sn	B	Cr	Pb
		0.81	0.27	0.25	0.17	0.15	0.13	0.12	0.11	0.11	0.11
7	Пирит-халькопирит-сульфоарсенидная (гидротермальный, среднетемпературный)	Ag	Cu	Pb	Mo	Bi	Zn	Sn	Ge	W	Ni
		0.91	0.29	0.19	0.17	0.16	0.14	0.13	0.11	0.10	0.10
8	Пирит-халькопирит-сульфоарсенидная (гидротермальный среднетемпературный этап)	As	B	Ge	Bi	Pb					
		0.97	0.15	0.14	0.11	0.11					
9	Золото-висмутотеллуридная (гидротермальный низкотемпературный этап)	Bi	W	Cu	B	Au	Mo	Ge			
		0.78	0.24	0.20	0.18	0.16	0.15	0.13			
10	Золотая комплексная	Au	Bi	W	Cu	B	Mo	Ag	As	Pb	
		0.94	0.31	0.24	0.19	0.18	0.12	0.11	0.11	0.10	

Примечание. Цифры характеризуют величины факторных нагрузок.

социации относятся к высокотемпературному этапу эволюции гидротермальной системы, приурочены к апикальной части Кара-Чачинского массива и фиксируют не вскрытые купольные выступы в его экзоконтакте (фиг. 3а). На этой карте по речной сети был проведен контур, включающий аномалию, рассматриваемый нами в качестве границ не вскрытого магматического тела и подводящих каналов от нижнего магматического очага (см. далее по тексту статьи). Этот контур совпадает с границей кольцевой структуры, выделенной другими исследователями (Спиридовон и др., 2006 и ссылки в этой работе).

Следующие геохимические поля связаны с отложением минеральных ассоциаций золото-редкометалльной рудной формации. Характерными элементами, возглавляющими первую ассоциацию рудной формации, являются Co, Ni. Высокие концентрации этих элементов свойственны пириту кварц-пирит-турмалиновой стадии минерализации (Ефремов и др., 2018₁) и отражают пространственное положение зон сульфидиза-

ции (геохимические поля этой стадии на карте не приведены).

Следующая элементная ассоциация является редкометалльной. Главными элементами ассоциации являются W, Mo, Bi, Au, что позволяет ее сопоставить с распространением минералов кварц-молибденит-шеелитовой ассоциации, фиксирующей высокотемпературный этап гидротермальной системы (табл. 2, ассоциация 6).

Геохимические поля этой стадии имеют линейную форму, “трассируя” проницаемые зоны в пределах Кара-Чачинского массива и предполагаемых границ магматического тела (фиг. 3б). Подобное положение геохимических полей этой стадии эволюции РМС, наряду с наложением на геохимические поля других стадий минерализации, свидетельствует о поступлении более горячих гидротермальных растворов по проницаемым зонам. В этом случае “срыв” контактов массива свидетельствует о возобновлении тектонических движений и вскрытии более глубокого магматического очага.

Характерной особенностью этих полей является появление В и Au в составе элементных ассоциаций. Это свидетельствует о том, что Au по-движно на данном этапе развития гидротермальной системы, а В “фиксирует” подток вещества с более глубоких уровней магматической системы либо из-за ее пределов.

Учитывая то, что Au не входит в элементные ассоциации, связанные с эволюцией ранней гидротермальной системы, возникает вопрос об источнике этого металла. Золото может быть выщелочено горячими флюидами и растворами из раскристаллизованных гранитоидов Кара-Чачинского массива, которым свойственны повышенные концентрации этого элемента. Однако его тесная ассоциация с В делает гипотезу о “подтоке” более реалистичной.

Этот этап эволюции РМС является продуктивным в отношении Au, а его геохимические поля могут быть использованы для поисков новых золоторудных объектов в пределах Карибского рудного узла.

Следующие две ассоциации элементов могут быть сопоставлены с пирит-халькопирит-сульфоарсенидной минеральной ассоциацией (табл. 2, ассоциация 7). Главными химическими элементами первой ассоциации являются Cu, Pb, Ag, она, скорее всего, связана с пространственным распространением халькопирита, для которого включения галенита и айкинита являются обычными (Ефремов и др., 2018₁). Геохимическое поле ассоциации пространственно тяготеет к проницаемым зонам на границе предполагаемого магматического очага, на некотором удалении от геохимических полей более высокотемпературных стадий (фиг. 3в).

Главным элементом второй ассоциации является As (табл. 2, ассоциация 8). В пределах Карибского рудного узла он входит в состав арсенопирита, ватанабеита и энаргита, следовательно поля этой ассоциации будут фиксировать распространение этих минералов (фиг. 3г).

Геохимическое поле ассоциации имеет близкую к эллипсовидной форму, фиксируя проницаемые зоны на предполагаемой границе магматического очага. Отмечается неплохое совпадение с геохимическими полями предыдущей элементной ассоциации.

Интересной особенностью является то, что при изучении минерального состава руд и стадийности рудного процесса сульфиды и сульфоарсениды Cu кристаллизовались последовательно один за другим, без заметного перерыва и тектонической перестройки в системе (Ефремов и др., 2018₁). Они были объединены в единую минеральную ассоциацию. Однако учитывая их выделение в качестве самостоятельных элементных ассоциаций и неполное наложение геохимических полей, необходимо провести дополнительное изучение взаимоотношений минералов в ее пределах.

Следующая ассоциация по набору химических элементов может быть сопоставлена с золото-висмутотеллуридной минеральной ассоциацией, свойственной низкотемпературному этапу эволюции гидротермальной системы (табл. 2, ассоциация 9). Она отражает появление сульфосолей и теллуридов Bi, теллуридов Au и самородного Au.

Ассоциация образует “узкие” геохимические поля, контролируемые проницаемыми зонами по контуру предполагаемого магматического очага, “охватывающие” Кара-Чачинский гранитоидный массив. Они подчеркивают существование долгоживущих проницаемых зон, в пределах которых откладывалась рудная минерализация (фиг. 3д).

Эта ассоциация минералов является продуктивной в отношении Au и, следовательно, ее геохимические поля могут быть использованы для поисков золоторудных объектов.

В десятой ассоциации главным элементом является Au (табл. 2). Она не может быть поставлена в соответствие с каким-либо этапом эволюции РМС, так как является комплексной. Входящие в ее состав элементы концентрируются в минералах, кристаллизующихся при различных термодинамических условиях (различных этапах эволюции РМС).

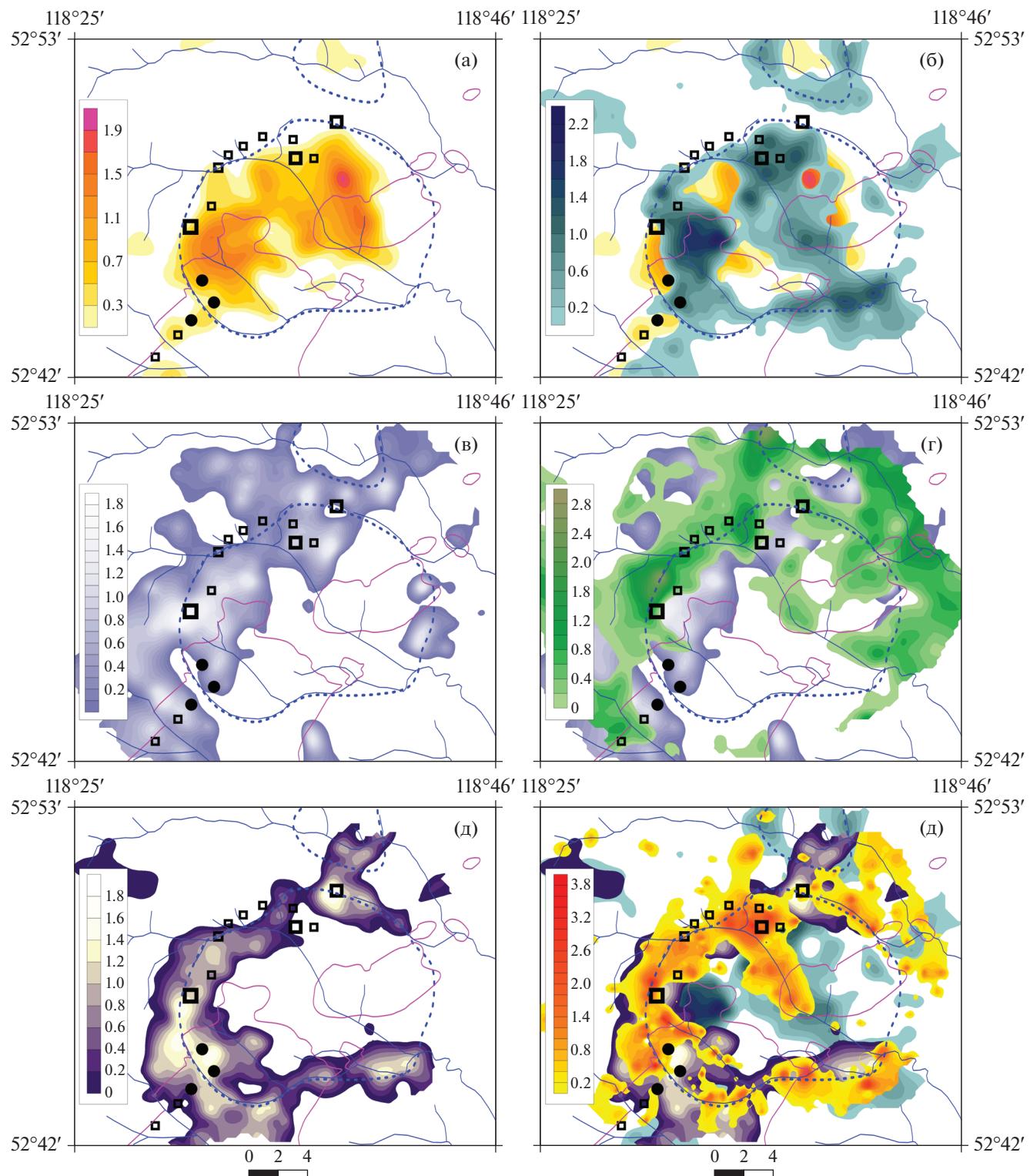
Это становится вполне очевидным при анализе наложения геохимических полей этой ассоциации на более ранние. В большинстве случаев они коррелируют с геохимическими полями низкотемпературного гидротермального этапа, однако в ряде случаев накладываются на поля высокотемпературного гидротермального и пневматолитового этапов (фиг. 3е).

Обращает на себя внимание форма геохимических ореолов этой элементной ассоциации. Она образует эллипс, ориентированный по главной оси в северо-восточном направлении, разделенный посередине “перемычкой”. Геохимические поля этой ассоциации фиксируют положение границ магматического очага/гранитоидной интрузии, являющейся источником рудного вещества в РМС.

По сути, эта конфигурация геохимических ореолов однозначно свидетельствует о генетическом контроле золотой минерализации гранитоидным массивом амуджикано-сретенского комплекса и позволяет высказать предположение о морфологии кровли этой интрузии.

Интузия имеет два купола, находящихся на разном уровне эрозионного среза. Восточный купол менее эродирован, об этом свидетельствует слабое развитие полей высокотемпературного гидротермального этапа. Западный купол более эродирован, в его пределах преимущественно развиты поля высокотемпературного гидротермального этапа эволюции РМС, свидетельствующие о близости магматического очага.

Уровень эрозионного среза западного и восточного блоков может быть использован при выделении перспективных участков при поиске новых рудных объектов в пределах РМС. С этих позиций



Фиг. 3. Зоны комплексного геохимического ореола.

а – ореолы вольфрамит-молибденит-кварцевой ассоциации (ассоциация 4, табл. 2); б – ореолы кварц-молибденит-шеелитовой с золотом ассоциации (ассоциация 6, табл. 2); в – ореолы халькопирит-сульфоарсенидной минеральной ассоциации (ассоциация 7, табл. 2); г – ореолы халькопирит-сульфоарсенидной минеральной ассоциации (ассоциация 8, табл. 2); д – ореолы золото-висмутотеллуридной минеральной ассоциации (ассоциация 9, табл. 2); е – комплексный ореол золота (ассоциация 10, табл. 2). В левой части каждого рисунка дана шкала, характеризующая величину значения фактора (теоретически отражает интенсивность накопления элементов ассоциации).

наиболее интересной является проницаемая зона на восточной границе структуры, вдоль правого борта р. Лужанки.

Полученные материалы показывают, что выделенные геохимические поля хорошо сопоставляются со стадиями минерализации в пределах Карийского рудного узла и довольно корректно описывают эволюцию РМС. Последовательность выделения и пространственное положение полей позволяют получить важную дополнительную информацию о проницаемых зонах, местах наложений полей продуктивных стадий минерализации, уровне эрозионного среза и многое другое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ особенностей состава и последовательности выделения геохимических полей позволил более детально взглянуть на эволюцию Карийской РМС.

В целом мы имеем дело с сильно эродированной редкометалльной РМС, сформированной в два этапа рудообразования. Первый этап связан с эволюцией верхней магматической камеры (апикальной части Кара-Чачинского массива). Главным полезным компонентом этой гидротермальной системы был Mo. Оруденение практически полностью уничтожено эрозией.

Второй этап рудообразования связан с эволюцией нижней магматической камеры, вскрытие которой произошло при возобновлении тектонических движений. Связанный с нижней магматической камерой рудный объект также является редкометалльным, его профилирующие элементы W и Mo, однако главным полезным компонентом является Au. Этот объект менее эродирован, чем предыдущий.

Золото мобильно на двух стадиях эволюции гидротермальной системы, связанной со вторым магматическим очагом и, скорее всего, накапливается при наложении одной минеральной ассоциации на другую.

Конфигурация полей Au-комплексной ассоциации однозначно свидетельствует о связи Au-минерализации с гранитоидами Кара-Чачинского массива, однако отсутствие Au в элементных ассоциациях геохимических полей, связанных с верхним магматическим очагом, ставит вопрос об источнике этого элемента.

Учитывая повышенные концентрации Au в гранитоидах Кара-Чачинского массива, можно предположить, что оно было выщелочено из них отдавшимися от второго магматического очага флюидами и гидротермальными растворами. Другой вероятной гипотезой может быть поступление трансмагматических флюидов, обогащенных золотом и бором.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование проведено в рамках выполнения государственного задания по Проекту IX.129.1.3. (№ 0350-2016-0029) при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области, проект № 17-45-388083 р_а, РФФИ проект № 17-05-00399 а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дэвис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии. М.: Недра, 1990. Т. 2. 427с.
- Войткевич Г.В., Кокин А.В., Мирошников А.Е., Прохоров В.Г. Справочник по геохимии. М.: Недра, 1990. 479 с.
- Ефремов С.В. Выделение ореолов рудных стадий по результатам геохимических съемок // Известия сибирского отделения секции наук о земле Российской академии естественных наук. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2015. № 2 (51). С. 19–25.
- Ефремов С.В., Спиридонов А.М., Горячев Н.А., Будяк А.Е. Использование мелкомасштабной геохимической съемки для расшифровки эволюции рудно-магматических систем // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). 2018₁. Вып. 16. С. 103–104.
- Ефремов С.В., Спиридонов А.М., Горячев Н.А. Слэбовый расплав как потенциальный источник профилирующих элементов месторождений золота и тяжелых металлов // ДАН. 2018₂. Т. 479. № 5. С. 551–555.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. Кн. 1. М.: Недра, 1990. 326 с.
- Смирнов С.С. К вопросу о зональности рудных месторождений // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1937. № 6. С. 1071–1083.
- Соловов А.П. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. М.: Недра, 1985. 294 с.
- Спиридонов А.М., Зорина Л.Д., Китаев Н.А. Золотоносные рудно-магматические системы Забайкалья. Новосибирск, Издательство “Гео”, 2006. 291 с.
- Таусон Л.В. Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов. М.: Наука, 1977. 280 с.
- Флеров Б.Л. Оловорудные месторождения Яно-Колымской складчатой области. Новосибирск: Наука, 1976. 247 с.
- Эмmons В.Х. Отношение металлоносных жильных систем к массивам изверженных пород. Ленинград: Геолразведиздат, 1933. 48 с.
- Martin H., Smithies R.H., Rapp R., Moyen J.-F., Champion D. An overview of adakite, tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution // Lithos. 2005. V. 79. P. 1–24.
- Rapp R.P., Norman M.D., Laporte D., Yaxley G.M., Martin H., Foley S.F. Continent formation in the Archean and chemical evolution of the cratonic lithosphere: melt–rock reaction experiments at 3–4 GPa and petrogenesis of Archean Mg-diorites (sanukitoids) // J. of Petrology. 2010. V. 51. P. 1237–1266.
- Spurr J.E. A theory of ore deposition // Econ. Geol. 1907. V. 2. P. 781–795.
- Zorin Yu. A. Geodynamics of the western part of the Mongolia-Okhotsk collisional belt // Tectonophysics. 1999. V. 306. P. 33–56.