

УДК 551.7+553.04 (571.6)

ГЛУБИННАЯ СТРУКТУРА МАЛМЫЖСКОГО, ПОНИ-МУЛИНСКОГО И АНАДЖАКАНСКОГО РУДНЫХ УЗЛОВ СРЕДНЕАМУРСКОГО ОСАДОЧНОГО БАСЕЙНА СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ СИХОТЭ-АЛИНЬСКОГО ОРОГЕННОГО ПОЯСА

А.Н. Диденко^{1,2}, М.Ю. Носырев², Г.З. Гильманова²

¹Геологический институт РАН, 109017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия

²Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН,
680063, Хабаровск, ул. Ким-Ю-Чена, 65, Россия

Рассчитаны магнитная и плотностная глубинные модели для Малмыжского, Пони-Мулинского и Анаджаканского рудных узлов с медно-порфировой минерализацией, расположенных в северной части Среднеамурского осадочного бассейна. На основе анализа данных по аномальному магнитному полю (магнитная модель) выделена кольцевая структура магматогенного генезиса, определяющая пространственную локализацию минерализации в Малмыжском и Пони-Мулинском рудных узлах. Показано, что подобные структуры в аномальном магнитном поле фиксируются для многих медно-порфировых месторождений. Площадь выделенной структуры может рассматриваться как потенциальный рудный район, перспективный на выявление Au-Cu-порфировой минерализации. В пределах кольцевой структуры дополнительно могут быть намечены перспективные площади с интрузиями гранитоидов и диоритов, развитых по ее периферии и находящихся под чехлом осадков Среднеамурского бассейна. Рассчитаны геофизические модели для отдельных рудных узлов с Au-Cu-порфировой минерализацией, определены глубинные признаки, которые могут быть использованы при региональном металлогеническом прогнозе и выделении потенциальных рудных районов. Структура рассчитанной в настоящей работе глубинной геофизической модели Малмыжского рудного узла сходна с петрологическими моделями крупных Cu-порфировых месторождений, разработанными Джереми Ричардсом и Ричардом Силлитом.

Cu-порфировое месторождение Малмыж, магнитная и плотностная 3Д глубинные модели, Среднеамурский осадочный бассейн, Сихотэ-Алинь

FURTHER INSIGHTS INTO DEEP STRUCTURE OF MALMYZH, PONY-MULI, AND ANADZHAKAN ORE CLUSTERS IN THE MIDDLE AMUR SEDIMENTARY BASIN (Northern Sikhote-Alin orogenic belt)

A.N. Didenko, M.Yu. Nosyrev, G.Z. Gil'manova

Magnetic and density depth models were calculated for the Malmyzh, Pony-Muli, and Anadzhakan porphyry-copper ore clusters emplaced in the northern part of the Middle Amur sedimentary basin. Based on analysis of anomalous magnetic field (magnetic model) data, a magmatogenic ring structure determining spatial patterns in localization of porphyry-copper mineralization in the Malmyzh and Pony-Muli ore clusters was established. It is shown that similar structures in the anomalous magnetic field are reported for many porphyry copper deposits. The area of the identified geologic structure can be considered as a high-potential region for detection of gold-copper-porphyry ore mineralization. Within the ring structure, perspective areas containing granitoid and diorite intrusions developed along its periphery and seated beneath the Middle Amur basin sedimentary cover can also be identified. Geophysical depth models are calculated for individual ore clusters with Au-Cu porphyry mineralization, to determine subsurface lithology and structures that may be useful for assessing regional ore potential and deducing areas for metallogenic exploration. The geophysical data-based deep subsurface model for the Malmyzh ore cluster is found to be consistent with the integrated petrological models developed by J.P. Richards and R.H. Sillitoe for giant Cu-porphyry deposits.

Malmyzh porphyry-Cu deposit, magnetic and density 3D depth models, Middle Amur sedimentary basin, Sikhote-Alin

ВВЕДЕНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ АКТУАЛЬНОСТИ ИССЛЕДОВАНИЙ

По данным Международного энергетического агентства, медь является наиболее широко используемым металлом в технологиях возобновляемых источников энергии. Это обусловлено ее самой высокой электропроводностью среди благородных металлов, которая на 60 % выше, чем у алюминия (2-е место среди благородных металлов). По прогнозам крупнейшего мирового инвестиционного банка

© Диденко А.Н., Носырев М.Ю., Гильманова Г.З., 2023

✉e-mail: alexei_didenko@mail.ru

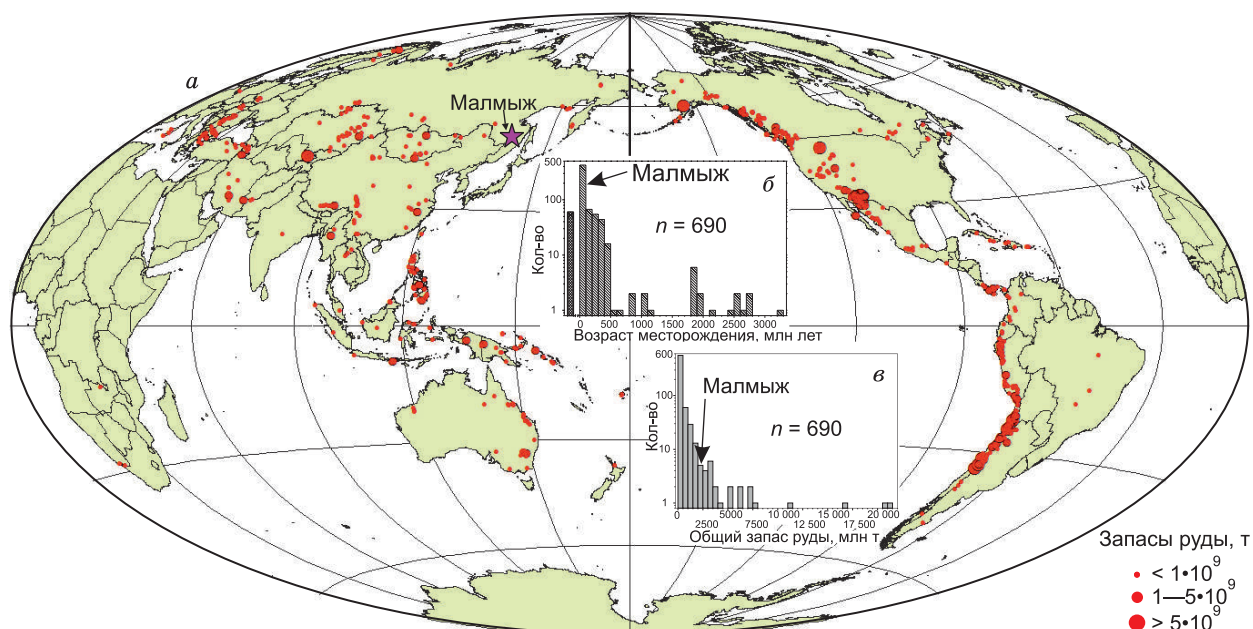


Рис. 1. Распределение медно-порфировых месторождений в пространстве и времени.

a — распределение на всей поверхности Земли. Проекция Мольвейде, центральный меридиан 180°. *б* — распределение месторождений по возрасту. Левый крайний столбец с возрастом < 0 млн лет указывает количество месторождений с неустановленным или проблематичным возрастом. *в* — распределение месторождений по запасам руды.

Использована мировая база медно-порфировых месторождений [Singer et al., 2008]. <https://mrdata.usgs.gov/porcu/>

Голдман Сакс, к 2030 г. спрос на медь вырастет на 600 % [Goldman Sachs, 2021]. Как и в случае с золотом, открывается все меньше крупных месторождений меди, а время между открытием и добычей с годами удлиняется по мере роста затрат. Здесь достаточно вспомнить Удоканское месторождение, открытое в 1949 г. и только в прошлом году давшее первый миллион тонн руды. Из 224 месторождений меди, открытых в период 1990—2019 гг., только 16 были обнаружены в последние 10 лет. Эксперты не исключают, что тонна меди через несколько лет может стоить от 50 до 100 тыс. долларов США [Goldman Sachs, 2021].

В мировой структуре добычи меди преобладают медно-порфировые месторождения, которые обеспечивают до 70 % мировой ее добычи. Структура российской минерально-сырьевой базы меди отличается от мировой. В 2020 г. на долю сульфидно-никелевых месторождений приходилось 38 %, медно-колчеданных и медно-порфировых примерно по 25 %, скарновых 12 % [Государственный доклад..., 2021]. Причем медно-порфировые месторождения в структуре добычи меди в России появились только в 2010 г. Если в российской структуре балансовых запасов меди первая позиция принадлежит сульфидно-медно-никелевому типу руд, то в прогнозных ресурсах — медно-порфировому типу (43 и 24 % по категориям P1 и P2). Вторая позиция по ресурсам принадлежит медно-колчеданному типу руд (31 и 43 % по категориям P1 и P2). Ресурсы сульфидно-медно-никелевых руд составляют 15 % по категории P1 и 18 % — P2 [Государственный доклад..., 2021].

Все это предопределяет повышенное, вполне обоснованное, на наш взгляд, внимание к проблемам поиска и прогноза крупных медно-порфировых месторождений, генезис которых связан с палео- и современными зонами субдукции. К этому типу относятся и самые крупные в мире месторождения-гиганты с запасами руды более 10 млрд т (Чукикамата, Эскондида, Эль-Теньенте, Рио-Бланко), формирование которых связано с Андийским надсубдукционным вулканическим поясом.

В мире насчитывается примерно 690 медно-порфировых месторождений [Singer et al., 2008], положение которых показано на рис. 1, *a*. Диапазон возраста этих месторождений весьма широк, от практически современного (Андийский пояс) до палеоархейского (3234 млн лет — Сорпин Гар, Австралия); возраст большей их части (525 из 690) — это мезокайнозой (см. рис. 1, *б*). На рисунках 1, *a*, *в* показано, что в этих зонах могли формироваться и мелкие месторождения с запасами руды менее 1 млн т (40 % от общего количества), и 4 упомянутых выше чилийских гиганта. В 2020 г. на долю Чили и Перу (исключительно медно-порфировые месторождения) приходилось 39 % мирового рудничного производства меди, тогда как на долю России — 5 % [Государственный доклад..., 2021].

Многие годы территория Сихотэ-Алиньского орогенного пояса, сформированного в конце мезозоя в обстановке активной континентальной окраины на границе Тихий океан—Евразия, считалась (?) малоперспективной на выявление крупных медно-порфировых месторождений. Только в 90-х годах прошлого столетия на основе обобщения геологических, геохимических и геофизических данных по Хабаровскому краю в работах М.И. Девянина с соавторами (1991 г.), В.А. Ловягина (1991 г.) и Р.П. Голвиной с соавторами (1999 г.) (цитируется по [Читалин и др., 2013]) был выделен ряд площадей, перспективных на выявление медно-порфирового оруденения, в число которых входила и Малмыжская. С этого времени она стала считаться перспективной на выявление крупного золотомедно-порфирового месторождения. Такое месторождение было открыто в 2005—2007 гг. сотрудниками горно-добывающей компании Phelps Dodge Corporation (США) [Читалин и др., 2013]. После проведения плановых разведочных изысканий произошло несколько переоценок балансовых запасов месторождения, и на конец 2021 г. они выросли для руды до 2.4 млрд т, меди до 8.3 млн т, золота до 347 т и серебра до 1676 т [Роснедра, 2021], что позволяет отнести Малмыжское месторождение по запасам меди и золота в разряд крупных [Рундквист и др., 2004]. Согласно модели общего рудного тоннажа Cu-порфировых месторождений [Singer et al., 2008], Малмыжское входит в 5 % крупнейших всего мира (см. рис. 1, показано звездочкой). Здесь необходимо отметить, что рядом с Малмыжским месторождением находятся весьма перспективные Пони-Мулинский и Анаджаканский рудные узлы.

Естественно, что после открытия такого месторождения интерес к изучению как самого месторождения, так и геологических структур, формирующих тектонический каркас мезозойского Северного Сихотэ-Алиня и прилегающих к нему Среднеамурского и Нижнеамурского кайнозойских осадочных бассейнов, существенно вырос. В период 2013—2021 гг., по данным «elibrary.ru», было опубликовано более 60 работ, посвященных проблемам геологического строения, геолого-структурной позиции в мезозойском Сихотэ-Алиньском орогенном поясе, генезиса и разработки Малмыжского рудного узла. Фактологической основой большинства этих работ являются геолого-структурные, минералогические, геохимические и геохронологические данные [Читалин и др., 2013; Буханова, Плечов, 2017; Десяткин и др., 2019; Звездов, 2019; Минина и др., 2019; Петров и др., 2019, 2020; Ханчук и др., 2019а, б; Soloviev et al., 2019; Буханова, 2020; Petrov et al., 2021; и др.]. И только в одной из них [Шашорин и др., 2018] на основе анализа гравитационного и аномального магнитного полей составлена глубинная трехмерная геофизическая модель территории, включающая в себя Малмыжскую золотомедно-порфировую рудно-магматическую систему.

Очевидно, работ, посвященных глубинному строению региона с крупным Au-Cu-порфировым месторождением, каким является Малмыжское, явно недостаточно. Отметим также два факта, свидетельствующих об актуальности глубинных геофизических построений для данной территории. Во-первых, в работе Б.Н. Шашорина с соавторами [2018] рассматриваемые глубины ограничиваются всего лишь 7.5 и 15 километрами для магнитной и плотностной моделей соответственно, а зарождение таких месторождений, как это следует из многочисленных работ [Richards, 2003, 2021; John et al., 2010; Sillitoe, 2010; и др.], происходит гораздо глубже. Во-вторых, анализируемая территория занимает северную окраину Среднеамурского кайнозойского осадочного бассейна (рис. 2, а), значительная площадь которого покрыта мощным чехлом неоген-четвертичных осадков (см. рис. 2, б). Указанные выше обстоятельства однозначно свидетельствуют об актуальности и необходимости исследований, связанных с установлением (моделированием) глубинного строения Малмыжского рудного узла и прилегающей территории с весьма перспективными Пони-Мулинским и Анаджаканским рудными узлами на основе магнитного и гравитационного аномальных полей.

Необходимо отметить также, что авторами настоящей работы для Сихотэ-Алиньского орогенного пояса и прилегающих территорий ранее была рассчитана глубина Мохо, кровли и подошвы магнитоактивного слоя, 3Д плотностная модель земной коры и литосферной мантии [Диденко и др., 2017; Диденко, Носырев, 2020; Didenko et al., 2021]. Настоящая работа является продолжением на крупномасштабном уровне ранее проведенных исследований.

КРАТКИЙ ОЧЕРК О ГЕОЛОГИЧЕСКОМ СТРОЕНИИ ИССЛЕДУЕМОЙ ПЛОЩАДИ

Значительную часть восточной окраины Евразийского континента (см. рис. 2, а) составляют покровно-складчатые системы Сихотэ-Алинь-Северосахалинского орогенного пояса [Парфенов, 1984; Геодинамика..., 2006]. Пояс разделен рифтовой структурой Татарского пролива миоценового возраста [Геодинамика..., 2006] на Сихотэ-Алиньскую (СА, см. рис. 2, а) и Хоккайдо-Сахалинскую ветви (в настоящей работе не рассматривается), ранее составляющие единое целое. Сихотэ-Алиньский орогенный пояс протягивается полосой северо-восточного простирания на расстояние около 1500 км при ширине до 600 км от Японского на юге и Охотского на севере краевых морей. На востоке Сихотэ-Алиньский орогенный пояс сменяется Сихотэ-Алиньским вулканоплутоническим поясом и ограничен котловиной Японского моря. На западе Сихотэ-Алиньский орогенный пояс по торцовому сочленению граничит с Монголо-

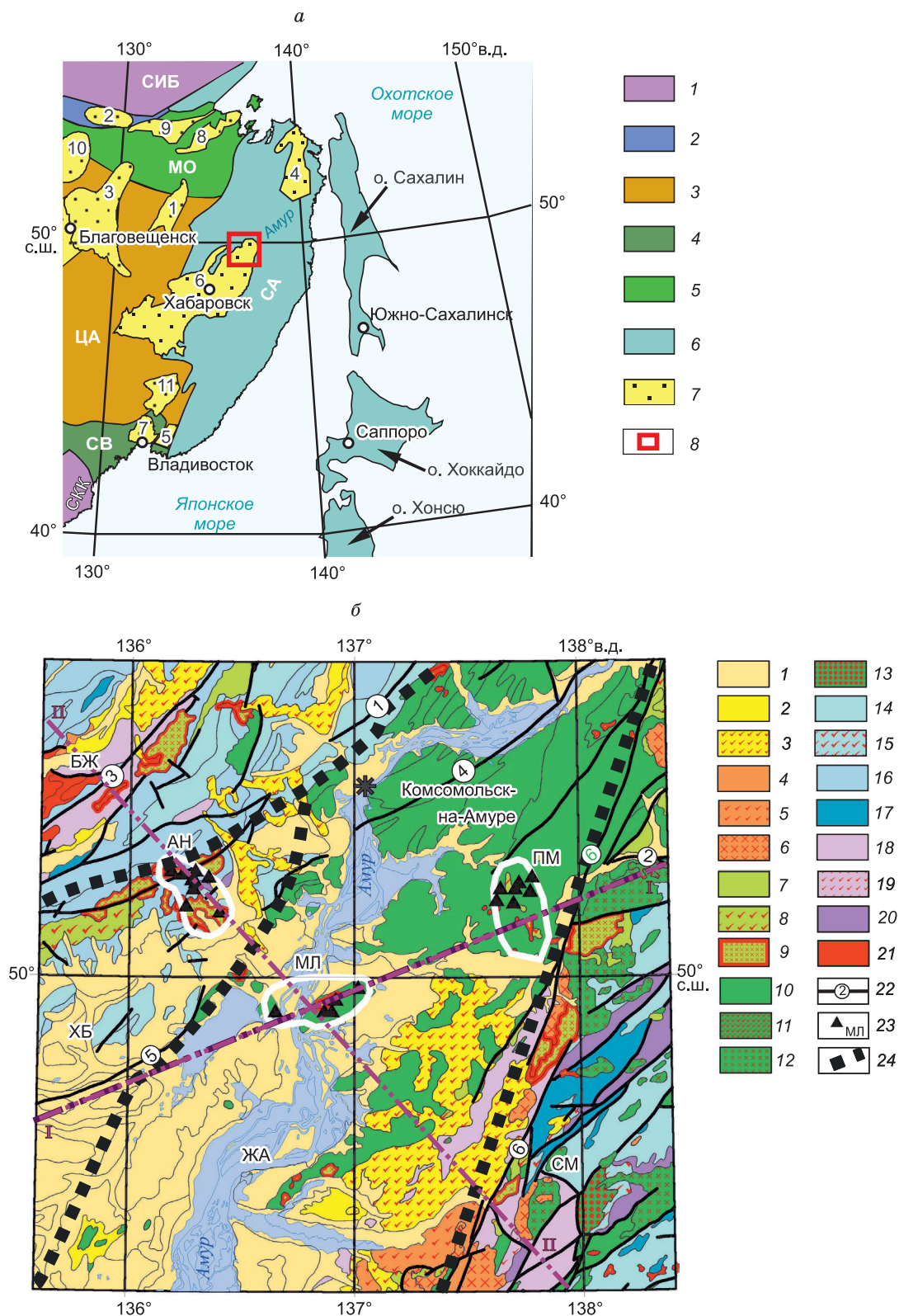


Рис. 2. Фрагмент тектонической схемы востока Евразии, по [Tectonic map..., 2008; Ren et al., 2013] с изменением и дополнением (а) и фрагмент Государственной геологической карты [Государственная..., 2009а] района исследований с упрощением и дополнением (б).

а: 1 — докембрийская кора Северо-Китайского (СКК) и Сибирского (СИБ) кратонов; 2—6 — орогенные пояса согласно возрасту основной фазы складчатости: 2 — каледонские, 3 — варисийские, 4 — раннекеммерийские, 5 — позднекеммерийские, 6 — тихоокеанские; 7 — мезозойско-кайнозойские осадочные бассейны; 8 — площадь исследований. Орогенные пояса: МО — Монго-

ло-Охотский, СА — Сихотэ-Алиньский орогенный пояс, СВ — Солонкер-Вундермя, ЦА — Центрально-Азиатский. Осадочные бассейны: 1 — Верхнебуреинский, 2 — Верхнезейский, 3 — Зей-Буреинский, 4 — Нижнеамурский, 5 — Партизанско-Суходольский, 6 — Среднеамурский, 7 — Суйфунский, 8 — Торомский, 9 — Удский, 10 — Ушумунский, 11 — Ханкайский. Проекция конформная коническая Ламберта, центральный меридиан 135°.

б: 1 — стратифицированные отложения квартера; 2 — стратифицированные отложения неогена; 3 — неогеновые базальты; 4 — стратифицированные отложения палеогена; 5 — палеогеновые интрузии основного и среднего составов; 6 — палеогеновые гранитоиды; 7 — стратифицированные отложения верхнего мела; 8 — позднемеловые интрузии основного и среднего составов; 9 — позднемеловые гранитоиды; 10 — стратифицированные отложения нижнего мела (gr — горнопротокская свита); 11 — раннемеловые интрузии основного и среднего составов; 12 — раннемеловые гранитоиды; 13 — анюйский метаморфический комплекс; 14 — стратифицированные отложения верхней юры; 15 — позднерурские интрузивные комплексы основного и среднего составов; 16 — стратифицированные отложения средней юры; 17 — стратифицированные отложения нижней юры; 18 — стратифицированные отложения верхнего триаса; 19 — позднетриасовые интрузивные комплексы основного состава; 20 — стратифицированные отложения среднего триаса; 21 — стратифицированные отложения перми нерасчлененные; 22 — основные разломы, в том числе: 1 — Бокторский, 2 — Гурский, 3 — Курский, 4 — Приамурский, 5 — Харпийский, 6 — Центральный Сихотэ-Алиньский; 23 — месторождения и рудопроявления с границами рудных узлов (показаны белой линией): АН — Анаджаканский, МЛ — Малмыжский, ПМ — Пони-Мулинский; 24 — границы тектоностратиграфических террейнов, по [Геодинамика..., 2006; Khanchuk et al., 2016]: БЖ — Баджалский, ЖА — Журавлевско-Амурский, СМ — Самаркинский, ХБ — Хабаровский. Римскими цифрами обозначено положение на карте глубинных профилей I—I (рис. 3, 4, 5) и II—II (рис. 6). Проекция Гаусса—Крюгера, центральный меридиан 137°.

Охотским (МО), Центрально-Азиатским (ЦА) и Солонкер-Вундурмя/Гиринским (СВ) орогенными поясами (см. рис. 2, а).

Согласно общепринятой на сегодня тектонической модели строения Сихотэ-Алиня [Геодинамика..., 2006; Голозубов, 2006; Khanchuk et al., 2016; и др.], в его пределах выделяются 9 террейнов, которые состоят из фрагментов аккреционных призм, турбидитовых бассейнов и островной дуги. Формирование этого коллажа террейнов шло с юры до конца раннего мела в несколько этапов и в двух палеогеодинамических обстановках: 1) два этапа субдукции палеоокеанической плиты Изагаги под Евразийский палеоконтинент в юре и во второй половине (?) раннего мела; 2) два этапа трансформной континентальной окраины между юрской и раннемеловой эпохами субдукции и сразу после последней, когда плита Изагаги «скользила» вдоль Евразии на север, увлекая за собой фрагменты сформировавшихся к тому времени аккреционных призм, турбидитовых бассейнов и островной дуги. По имеющимся палеомагнитным данным для апт-альбских пород из фрагментов раннемеловых аккреционной призмы и островной дуги, их миграция на север могла составлять более 2000 км [Диденко и др., 2017; Архипов и др., 2019]. Формирование континентальной литосферы орогенного пояса произошло в конце позднеяньшанской (тихоокеанской) эпохи орогенеза 140—80 млн л. н.

С востока Сихотэ-Алиньский орогенный пояс обрамляет одноименный вулканоплутонический пояс, выполненный магматическими породами четырех временных серий: 1) сеноман — базальты и андезиты; 2) турон—сантон — риолиты и дациты; 3) маастрихт—даний — вулканиты кислого и среднего составов; 4) палеоген — бимодальный контрастный вулканизм [Сахно, 2002; Геодинамика..., 2006].

В пределах рассматриваемой территории широкое распространение имеют осадочные бассейны (см. рис. 2, а). По времени их заложения они делятся на мезозойские (Верхнебуреинский, Верхнезейский, Партизанско-Суходольский, Суйфунский, Торомский, Удский, Ушумунский) и кайнозойские (Зейско-Буреинский, Среднеамурский, Нижнеамурский, Ханкайский). Первые приурочены к Солонкер-Вундурмя на юге и Монголо-Охотскому на севере орогенным поясам, вторые имеют, как правило, сквозной характер и секут тектонические границы между палеозойским Центрально-Азиатским орогенным поясом, с одной стороны, и мезозойскими орогенными поясами, — с другой. Однозначно определить природу большинства из упомянутых выше мезозойских осадочных бассейнов не представляется возможным, так как в течение времени их существования происходила смена не только тектонических режимов, но также и геодинамических условий. Для кайнозойских осадочных бассейнов предлагаются различные, но более однозначные модели их образования. Для интересующего нас Среднеамурского кайнозойского осадочного бассейна установлено, что его образование было аналогичным формированию провинции Бассейнов и Хребтов Запада США (Натальин, Черныш, 1992 г.), и что морфология, внутреннее строение и вулканогенно-осадочное заполнение кайнозойских грабенов свидетельствуют о единой сдвигораздвиговой природе их формирования [Среднеамурский..., 2009].

Малмыжский и Пони-Мулинский рудные узлы (см. рис. 2, б), входящие в Нижнеамурскую минерогеническую зону [Государственная..., 2009а,б], расположены на севере Среднеамурского бассейна и находятся в пределах Горинской зоны Журавлевско-Амурского террейна, выполненного в основном турбидитами раннемелового приконтинентального синсдвигового бассейна [Геодинамика..., 2006]. Месторождения и рудопроявления золотомедно-порфирового, золотокварцевого типов здесь связаны с гранитоидами сеноманского возраста [Петров и др., 2020; Petrov et al., 2021; и др.].

Малмыжский золотомедно-порфировый рудный узел (МЛУ на рис. 2, б; участки Свобода-Юг, Равнина, Долина, Центральный и другие) представляет собой протяженную зону северо-восточного простираения интрузивных тел диорит-порфиров и гранодиорит-порфиров трех генераций, относимых к мячанскому комплексу [Государственная..., 2009б]. U-Pb возраст цирконов из интрузивных пород Малмыжского рудного поля составляет 100.0—95.2 млн лет [Ханчук и др., 2019б]. Аналогичный возраст был получен и в двух других работах — 96.1 ± 1.8 , 97.3 ± 0.8 , 99.3 ± 1.6 млн лет для цирконов из кварцево-диоритового штока [Буханова, 2020], 97.2 ± 1.1 и 99.4 ± 1.3 млн лет для роговообманковых диоритов [Петров и др., 2020]. Характер рудной минерализации вкрапленный, прожилково-вкрапленный и реже гнездово-вкрапленный, формирование месторождения проходило примерно до 94 млн лет [Буханова, 2020]. Основную рудную массу выполняют пирит и халькопирит, реже встречаются галенит, сфалерит и борнит.

Интрузивные тела здесь прорывают осадочные породы горнопротокской свиты¹ (см. рис. 2, б), которая с угловым несогласием налегает на отложения нижнемеловых пионерской и пиванской свит, юрскую хабаровскую толщу [Государственная..., 2009а,б]. Горнопротокская свита имеет изменчивый литологический состав как по латерали, так и по вертикали; в ней выделяется базальный горизонт мощностью от 10 до 350 м конгломератов и гравелитов, переходящих в песчаники и алевролиты. Последние формируют невыдержанные по мощности (0.5—20.0 м) пакеты слоев, чередующихся между собой. Возраст свиты определен как апт—альб по находкам *Inoceramus anglicus* Wood в алевролитах береговых обнажений оз. Болонь [Государственная..., 2009б].

Рудовмещающие породы перекрыты рыхлыми отложениями квартала аллювиального и озерно-аллювиального генезиса, общая мощность которых может достигать более 100—150 м. К этому же узлу относится и рудопроявление Болонь (см. рис. 2, б), где кварцевые диориты прорывают песчаники и алевролиты пионерской и горнопротокской свит [Государственная..., 2009а,б]. Здесь в одной из двух разведанных зон жильно-прожилкового окварцевания — Серебряной — содержание золота составляет от 5.0 до 102.2 при среднем 18.6 г/т.

Пони-Мулинский золотомедно-порфировый рудный узел (ПМУ, см. рис. 2, б; участки Пони 1—5, Горы Пельха, Левобережное) представляет собой протяженную зону почти меридионального простираения интрузивных тел габбро, габбро-диоритов, диорит-порфиров и гранодиорит-порфиров трех генераций, относимых к нижнеамурскому комплексу [Государственная..., 2009а,б]. U-Pb возраст цирконов из дайкового тела монцодиорит-порфиров составляет 93.3 ± 1.2 млн лет [Петров и др., 2020], что немного меньше, чем возраст цирконов из интрузивов Малмыжского узла, но примерно равен верхней временной границе формирования Малмыжского месторождения, по [Буханова, 2020]. Характер рудной минерализации аналогичен малмыжскому. Интрузивные тела Пони-Мулинского узла также прорывают осадочные породы горнопротокской свиты. Ресурсы рудного узла на конец 2015 г. оценивались для меди в 0.4 млн т, для золота в 79 т [Роснедра, 2015].

Как указывалось выше, по легенде [Государственная..., 2009а,б], магматические образования Пони-Мулинского и Малмыжского рудных узлов отнесены к двум различным магматическим комплексам: первые к нижнеамурскому, вторые к мячанскому. Согласно новым минералогическим, петрогеохимическим данным, отмечается текстурно-структурное и вещественное сходство между магматическими породами двух рудных узлов: 1) спектры распределения редкоземельных элементов этих комплексов имеют тенденцию к обогащению легкими элементами с положительной Eu-аномалией [Минина и др., 2019]; 2) на диаграмме $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}-\text{SiO}_2$ фигуративные точки составов магматических комплексов группируются в поле золотомедно-порфировых и медно-порфировых месторождений, связанных с проявлением гранитоидного магматизма магнетитовой серии [Петров и др., 2020; Petrov et al., 2021]; 3) на диаграмме $\text{Sr/Y}-\text{Y}$ фигуративные точки составов изученных образцов этих двух комплексов находятся в области адакитовых магматических пород порфировых месторождений [Петров и др., 2020; Petrov et al., 2021]. Имеется единственное отличие между гранитоидами двух комплексов — это соотношение калия и натрия. На диаграмме $\text{SiO}_2-(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})$ фигуративные точки составов магматитов Пони-Мулинского рудного поля попадают в поле повышенной щелочности при незначительном преобладании натрия над калием, тогда как фигуративные точки составов магматитов Малмыжского рудного поля попадают в известково-щелочное поле при значительном преобладании натрия над калием [Петров и др., 2020; Petrov et al., 2021].

Приведенные выше данные по геологическому строению, вещественному составу и возрасту магматических пород Малмыжского и Пони-Мулинского рудных узлов позволили заключить [Минина и др., 2019; Петров и др., 2020; Petrov et al., 2021], что их магматические породы были сформированы в сеномане в рамках одного этапа (4—6 млн лет) проявления интрузивной магматической деятельности в пределах Журавлёвско-Амурского террейна раннемелового турбидитового осадочного бассейна.

¹ В работах [Петров и др., 2020; Petrov et al., 2021] указана ларгасинская свита, а не горнопротокская.

Завершая раздел, необходимо обратить внимание на положение в этом районе и прогнозируемого рудного узла с Au-Cu-Mo специализацией — Анаджаканского, отнесенного к Кур-Амгуньской минерогенической зоне [Государственная..., 2009а,б]. Этот рудный узел представляет протяженную зону северо-западного простираения, в пределах которой известно 8 рудопроявлений (АН, см. рис. 2, б; Ближнее, Высокое, Лагерное, Ночное, Перевальное, Приразломное, Просторное, Северомаглойское). По мнению В.И. Шпикермана, Ю.П. Змиевского и др. (2003 г.), оруденение узла следует относить к перспективному золотомедно-порфировому типу [Государственная..., 2009б]. Территория узла сложена верхнетриасовыми-нижнеюрскими (будюрская свита), среднеюрскими (хурбинская и улыбинская свиты) и верхнеюрскими (силинская и падалинская свиты) преимущественно терригенными породами. В отличие от Малмыжского и Пони-Мулинского рудных узлов, Анаджаканский находится на северо-востоке Хабаровского террейна (см. рис. 2, б), последний представляет собой фрагменты юрского аккреционного комплекса [Геодинамика..., 2006]. Все рудопроявления приурочены к зонам окварцевания и сульфидизации в триасово-юрских песчаниках и алевролитах на контакте с интрузиями гранодиоритов мяочанского комплекса, возраст цирконов из последних находится в интервале 94—98 млн лет [Государственная..., 2009а,б]. Есть все основания полагать, что магматические породы Анаджаканского рудного узла, так же как и Малмыжского и Пони-Мулинского рудных узлов, были сформированы в сеномане в рамках одного этапа (4—6 млн лет) проявления интрузивной магматической деятельности на сопредельных территориях Хабаровского и Журавлёвско-Амурского террейнов.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ МАГНИТНОЙ И ПЛОТНОСТНОЙ ГЛУБИННЫХ МОДЕЛЕЙ

При построении модели глубинного строения территории были использованы данные по гравитационному (редукция Буге) и аномальному магнитному полям, полученные в двухтысячных годах в рамках создания цифровой геофизической основы геологических карт 1 : 1 000 000 м-ба [Петров и др., 2016]. Масштаб гравиметрической съемки, на основе которой составлена цифровая основа в пределах площади исследований — 1 : 200 000, аэромагнитной съемки — 1 : 50 000—1 : 200 000. Данные взяты из соответствующих сводных моделей для Сихотэ-Алиньского орогенного пояса и сопредельных территорий, представленных нами ранее [Диденко и др., 2017; Диденко, Носырев, 2020; Didenko et al., 2021].

Для расчета магнитной и плотностной глубинных моделей использован алгоритм из программного комплекса «КОСКАД 3Д» «Оценка параметров аномалиеобразующих объектов по площади по Андрееву Б.А.».

Данный алгоритм основан на разложении поля на составляющие разной частоты по методу вариаций Б.А. Андреева и последующего расчета глубин для отдельных составляющих поля (локальных аномалий). Метод вариаций был предложен в 1936 г. [Андреев, Клушин, 1965] и основан на получении разностных аномалий по результатам осреднения по двум окружностям:

$$\sigma U(x, L) = U(x) - (U(x + L) + U(x - L))/2, \quad (1)$$

где $U(x)$ и $U(x \pm L)$ в центральной точке окна и на расстоянии L от него.

При совмещении начала координат с точкой вычисления вариаций [Griffin, 1949] получается более простое аналогичное равенство для случая площадных исходных данных:

$$\sigma U(0) = U(0) - U(R), \quad (2)$$

где R — радиус сглаживания.

Метод Андреева—Гриффина был не только реализован в программном комплексе «КОСКАД 3Д» [Комплекс..., 2008, 2018; Петров и др., 2010], но и существенно улучшен авторами комплекса на этапе выделения составляющих поля определенных частот за счет применения современных методов адаптивной полосовой фильтрации [Солоха, 2006; Комплекс..., 2008]. Согласно программному алгоритму, последовательность операций по оценке параметров аномалиеобразующих объектов следующая [Комплекс, 2018].

1. Осуществляется последовательная двумерная адаптивная фильтрация поля при размерах базового окна 3×3 , 5×5 , 7×7 и т. д. ячеек цифровой модели до тех пор, пока размеры окна не будут превышать величины $0.3L$, где L — максимальные размеры анализируемой площади (ширина или высота).

2. На выходе, после каждой из фильтраций получаются соответствующие результаты. При этом отличие между ними будет заключаться в следующем: чем больше ширина базового окна, тем меньше доля высоких частот будет содержаться на выходе фильтра. Таким образом, если из результатов фильтрации в окне 3×3 вычесть результат фильтрации в окне 5×5 , то разность будет характеризовать интервал частот $\Delta\omega_{3,5} = \omega_3 - \omega_5$.

3. Известно, что чем больше глубина залегания аномалиеобразующего объекта, тем меньше частота, которая ему соответствует в спектре исходного поля. То есть каждому интервалу частот можно

поставить определенный интервал глубин. Кроме этого, глубина h связана с шириной базового окна фильтрации m соотношением $h = 0.333m$. Поэтому, если полученное разностное поле отнести к соответствующей глубине, то вполне правомерным выглядит получаемое распределение источников гравитационного поля.

Таким образом, оценка глубин осуществляется по локальной составляющей поля, полученной как разность составляющих двух соседних окон. В результате расчетов находим относительное распределение масс или магнитных источников на некоторых глубинах, определяемых размером сетки исходной цифровой модели и алгоритмом расчета, заложенным в программе [Комплекс..., 2008]. Учитывая неизменный размер элементов модели, можно считать, что полученное распределение масс (для гравиметрии) или плотности распределения магнитных источников (для магнитометрии) фактически пропорционально распределению эффективных плотности или намагниченности со своим знаком относительно 0. В итоге мы получаем положение и параметр плотности или намагниченности для аномалиеобразующих тел определенного глубинного уровня и создающие гравитационные или магнитные аномалии, соответствующие локальной составляющей изучаемого поля в данном частотном (глубинном) интервале.

Применяемый метод изначально имеет дело с локальной составляющей поля и после завершения расчета всегда остается неучтенная низкочастотная компонента, которая отражает плотностные или магнитные неоднородности ниже принятой глубины расчета.

Магнитная и плотностная глубинные модели были рассчитаны для площади 200×200 км, в центре которой находится рудный узел Малмыж (см. рис. 2, б; 3, а; 4, а). Плотностная модель земной коры рассчитана по сети 1×1 км до глубины 34 км. Полученное в результате расчета относительное распределение масс аномальных источников было пересчитано в распределение плотности при условии изменения этого параметра с глубиной — от 2.5 г/см^3 на поверхности до 3.20 г/см^3 на глубине 34 км (средняя глубина Мохо в регионе) [Didenko et al., 2021]. В конечном итоге для оптимальной визуализации на разрезах и глубинных срезах, сделанных по модели, значения плотности были пересчитаны в проценты, показывающие отклонения этого параметра от среднего значения для данного глубинного уровня. Распределение плотности для более глубоких горизонтов взято по ранее построенной авторами модели для всего Сихотэ-Алиньского орогенного пояса [Диденко, Носырев, 2020].

Магнитная модель рассчитана по гриду с размером ячейки 0.5 км, так как при создании магнитной цифровой модели на эту территорию проведена компиляция всех существующих на начало 2000-х годов данных аэромагнитных съемок масштабов 1 : 200 000 и 1 : 50 000, что позволило получить результирующую модель с размером сетки $0.5 \times 0.5 \times 0.5$ км. Район исследований располагается между 49° — 51° с. ш., поэтому для уменьшения влияния широты, рельефа местности, разных направлений ориентации намагниченности горных пород и более точной локализации магнитных источников предварительно была выполнена редукция магнитного поля к полюсу [Блох, 2009]. Параметр, полученный в результате расчета 3Д модели, отражает плотность магнитных источников на данном глубинном уровне и при неизменности размера ячейки модели с глубиной может рассматриваться как аналог эффективной намагниченности пород в условных единицах. По данным ранее проведенных исследований [Диденко и др., 2017], глубина поверхности температуры Кюри магнетита в данном районе составляет в среднем 20 км, поэтому будем считать, что полученная магнитная модель ограничена этой же глубиной.

Интерпретация как магнитного, так и гравитационного полей осложняется за счет широкого распространения на площади палеоген-неогеновых осадков Среднеамурского осадочного бассейна и четвертичных перекрывающих отложений. Погружение магнитных источников на глубину означает уменьшение интенсивности аномалий с ними связанных и сглаживание некоторых структурных особенностей поля, важных для понимания геологического строения площади. Поле силы тяжести осложнено здесь наличием локальных минимумов, связанных с отдельными небольшими грабенами, выполненными палеоген-неогеновыми осадками и положительными аномалиями, которые соответствуют выступам фундамента. Это определяет мозаичный характер поля, вызванный чередованием небольших аномалий разного знака амплитудой до 6 мГал размерами в десятки км². Данный факт усложняет интерпретацию плотностной модели территории с точки зрения выделения возможных интрузивных тел повышенной плотности на верхних горизонтах земной коры. В ряде случаев при условии, что породы интрузии характеризуются также повышенной намагниченностью, достоверность их выделения при совпадении двух аномалий повышается.

Для визуализации полученных данных использовался программный комплекс ESRI ArcGis [ESRI, 2011].

ГЛУБИННЫЕ МОДЕЛИ

Магнитная модель. На рисунке 3, а представлена карта аномального магнитного поля анализируемой площади, распределение его значений (всего 40197 точек) близко нормально (см. рис. 3, б) с асимметрией в сторону максимальных значений. Значения меняются от -301 до 1294 нТл. Размер и мор-

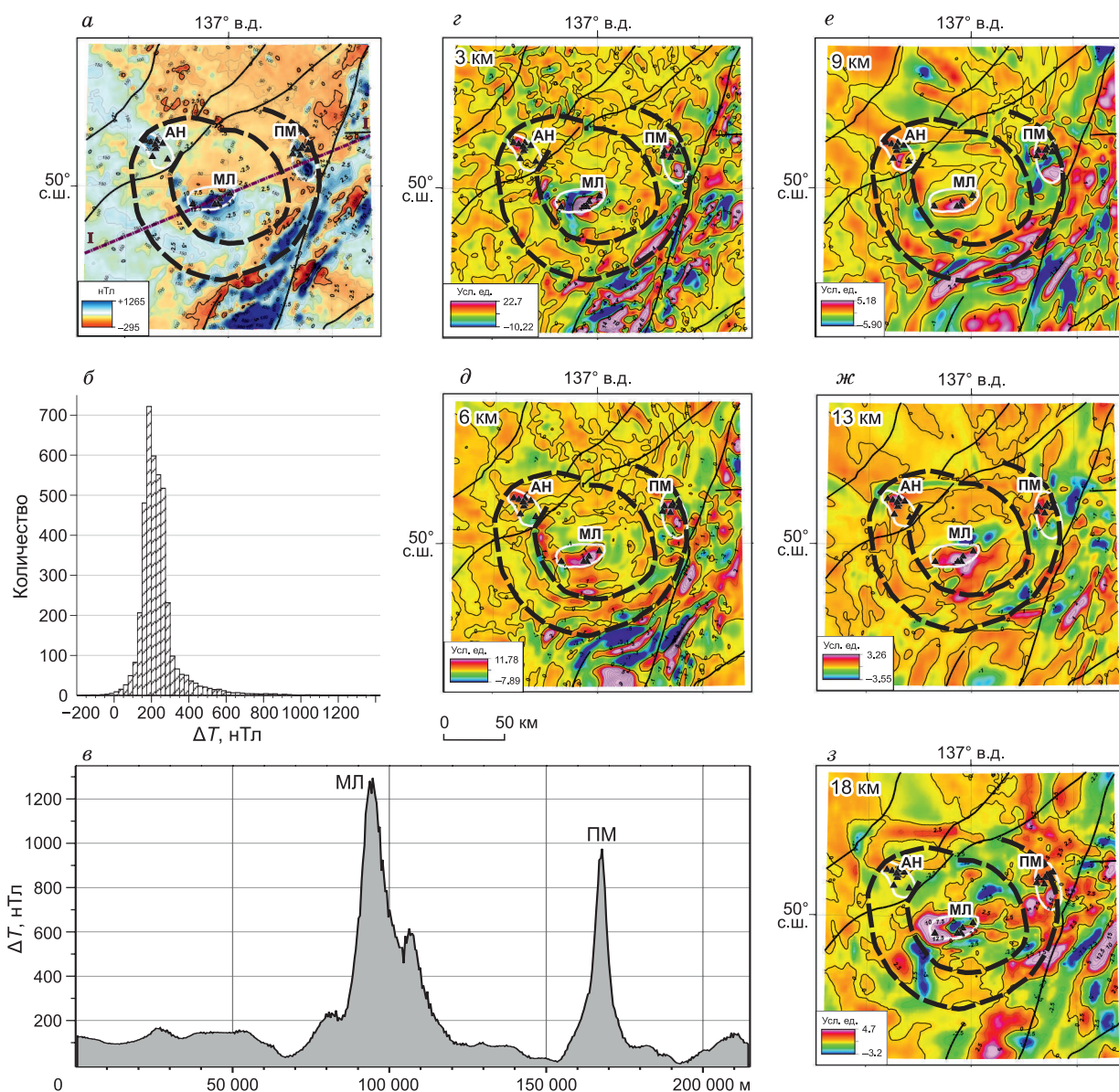


Рис. 3. Магнитная глубинная модель территории Малмыжского, Пони-Мулинского и Анаджаканского рудных узлов.

а — карта исходного аномального магнитного поля, *б* — гистограмма значений ΔT (гид размер 200 × 200 точек), *в* — значения ΔT по профилю I—I, *г*—*з* — карты эффективной намагниченности на глубинах 3, 6, 9, 13 и 18 км соответственно. Проекция Гаусса—Крюгера, центральный меридиан 137°.

фология аномалий различная, от изометричных размером в первые километры до линейных в 100 км и более. Последние проявлены исключительно в восточной части изучаемой площади вдоль Центрального Сихотэ-Алиньского разлома (рис. 2, б) и ориентированы в ССВ направлении, так же как и разлом (см. рис. 3, а). Малмыжский и Пони-Мулинский рудные узлы приурочены к локальным положительным аномалиям магнитного поля интенсивностью более 1200 и 900 нТл соответственно (см. рис. 3, в). Малмыжский узел пространственно сопряжен с положительной магнитной аномалией, имеющей два экстремума.

Общая ориентировка аномалии — субширотная-северо-восточная, протяженность составляет 36 км при ширине от 10 км в западной части и до 20 км в центральной и восточной частях. Наибольшая интенсивность магнитного поля наблюдается в центральной и восточной частях (более 1200 нТл), протяженность этого отрезка — 25 км. Западный экстремум имеет интенсивность 420 нТл и отделен от восточной части аномалии узкой зоной пониженного поля, где его значения опускаются менее 200 нТл. Пони-Мулинский рудный узел также пространственно ассоциирует с двумя практически соприкасаю-

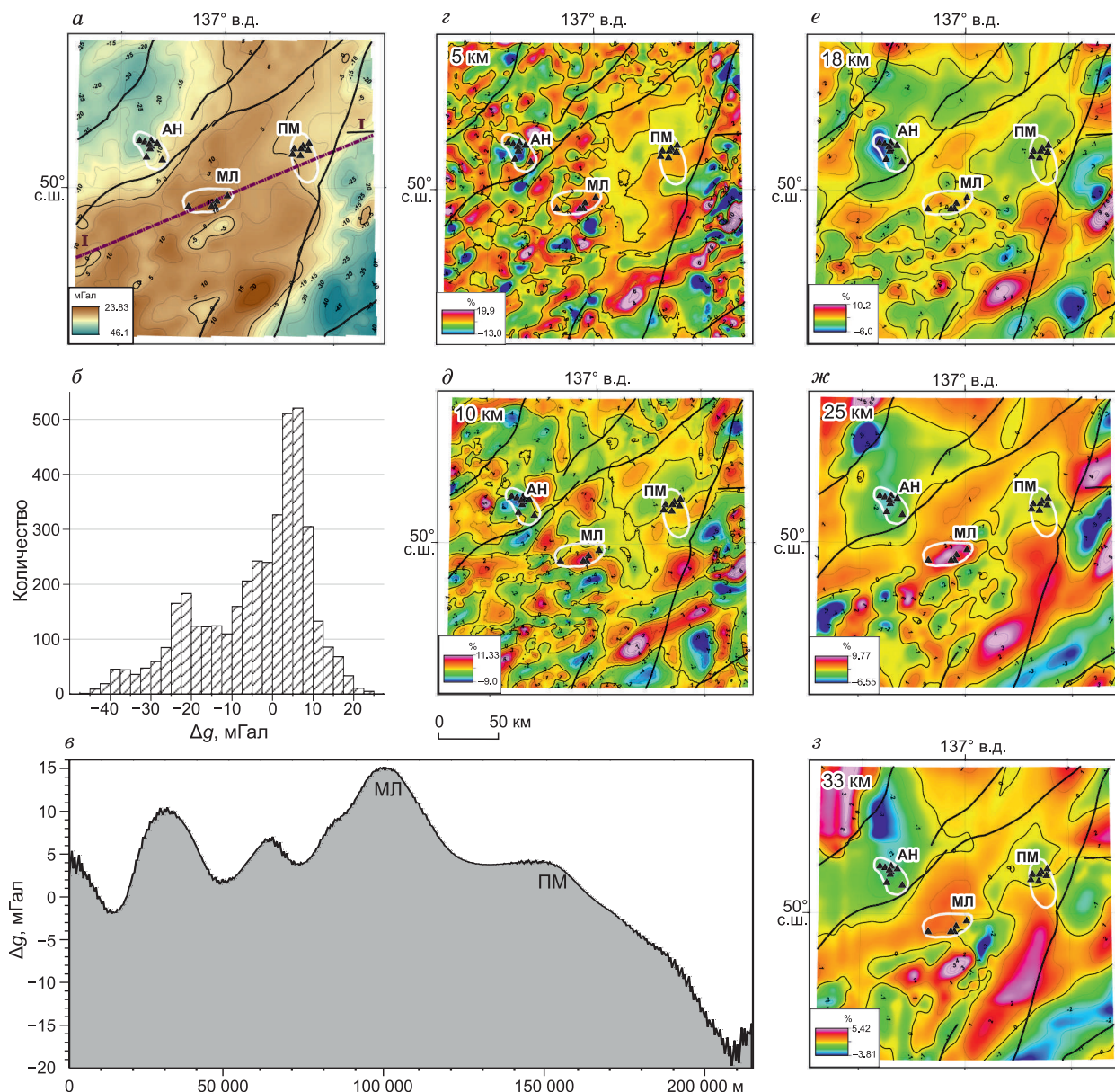


Рис. 4. Плотностная глубинная модель территории Малмыжского, Пони-Мулинского и Анаджаканского рудных узлов.

а — карта исходного поля силы тяжести в редукции Буге, *б* — гистограмма значений ΔG (грид размером 200×200 точек), *в* — значения ΔG по профилю I—I, *г*—*з* — карты относительной плотности на глубинах 5, 10, 18, 25 и 33 км соответственно. Проекция Гаусса—Крюгера, центральный меридиан 137°.

щимися положительными магнитными аномалиями. Эта аномальная зона имеет северо-западное простираие и общую длину немногим более 30 км при ширине в северной части до 5.5 км, в южной — до 12 км. Южная аномалия наиболее интенсивная (более 900 нТл), имеет протяженность 15.5 км. Северная аномалия имеет меньшую интенсивность 370 нТл. К положительной изометричной магнитной аномалии, но несколько меньшей интенсивности (~ 350 нТл), приурочен и Анаджаканский рудный узел (см. рис. 3, *а*). Ее размеры составляют 10 × 11 км, и она занимает только северную половину узла. Таким образом, можно сделать вывод, что площадям развития всех трех рудных узлов свойственны локальные положительные магнитные аномалии площадью в первые сотни км². При этом форма аномалий, их ориентировка различны для отдельных узлов.

Как было показано ранее [Диденко и др., 2017], глубина подошвы магнитоактивного слоя (изотерма точки Кюри магнетита) находится в интервале 18—25 км, поэтому 3Д магнитная модель (эффективная намагниченность в усл. ед.) территории была ограничена глубиной 20 км (Дополнительные ма-

териалы, https://sibran.ru/journals/Suppl_Didenko1.pdf, приложение 1). Здесь мы приводим и кратко характеризуем пять глубинных срезов (см. рис. 3, $z-z$) из объемной модели.

Пространственно магнитные тела, зафиксированные на глубине 3 км (см. рис. 3, z), соответствуют аномалиям магнитного поля на поверхности как по форме, так и по соотношению их эффективной намагниченности. Размах величины эффективной намагниченности для всей площади составляет от -10 до $+23$ усл. ед. Малмыжский, Пони-Мулинский и Анаджаканский рудные узлы пространственно совпадают с магнитными телами, при этом их расчетная намагниченность (в усл. ед.) по интенсивности соответствует амплитуде магнитных аномалий. Так, магнитное тело Малмыжского узла имеет максимальную намагниченность около 20 усл. ед., Пони-Мулинского — около 10 усл. ед. для южного магнитного тела и 4 для северного, намагниченность 3.5 усл. ед. — максимальное значение для магнитного тела в Анаджаканском узле. На этой глубине положительная аномалия под Малмыжским рудным узлом «разбивается» на две узкой зоной с пониженной намагниченностью. Понижение отчетливо просматривалось и на исходной карте аномального магнитного поля (область пониженного магнитного поля, разделяющая западный и восточный экстремумы). Это объясняется тем, что в данной области вертикальная мощность магнитного тела менее 3 км и на срезе оно уже отсутствует. Интерпретируя данный факт в геологических терминах, можно сказать, что магнитная интрузия в этой зоне имеет мощность менее 3 км и на срезе имеют место уже немагнитные осадочные породы.

Размах величин эффективной намагниченности на глубине 6 км (см. рис. 3, d) составляет от -8 до $+12$ усл. ед. В площади рудных узлов на данной глубине также наблюдаются положительные аномалии намагниченности, соответствующие магнитным телам под рудными узлами. При этом наблюдается определенная генерализация аномалий, в частности, в Пони-Мулинском узле они сливаются в одну зону северо-западного простирания. Наиболее важной особенностью распределения эффективной намагниченности на этом уровне является наличие хорошо выраженных положительных линейных и дугообразных аномалий, определяющих в совокупности отчетливо выраженную кольцевую структуру с размером в поперечнике 120 км в широтном направлении и 90 км в меридиональном направлении. Ширина дугообразных аномалий (магнитных тел) составляет от 5 до 15 км. Интенсивность намагниченности для тел, расположенных в западной, южной и восточной частях структуры, колеблется от 1.5 до 5.0 усл. ед., в северной дугообразные тела характеризуются относительно пониженной эффективной намагниченностью в основном менее 1 усл. ед. Центром структуры, несколько смещенным к западу, является положительная аномалия Малмыжского узла (см. рис. 3, d).

Расположение магнитных тел на глубинах 9 и 13 км остается в основном подобным уровню 6 км. Наблюдается система линейных и дугообразных положительных аномалий эффективной намагниченности различной интенсивности, расположенных на разном расстоянии вокруг центральной Малмыжской аномалии и образующих в совокупности кольцевую структуру. Для магнитных тел этих уровней характерно уменьшение значений эффективной намагниченности, но, тем не менее, положительные аномалии остаются хорошо выраженными.

Размах величин эффективной намагниченности на глубине 18 км (см. рис. 3, z) составляет от -3.2 до $+4.7$ усл. ед. Распределение магнитных тел становится более генерализованным, теряет кольцевой вид. Это связано, видимо, с двумя факторами. С одной стороны, с ростом температуры магнитная восприимчивость растет, особенно заметно вблизи точки Кюри (эффект Гопкинсона), а, с другой, — при достижении температуры точки Кюри магнетита (578°C), основного магнитного минерала горных пород, последние теряют намагниченность [Печерский, Диденко, 1995]. Сочетание этих двух процессов на площади, где глубина подошвы магнитоактивного слоя (глубина температуры Кюри) варьируется от 18 до 25 км [Диденко и др., 2017а], приводит к хаотизирующему влиянию на структуру магнитного поля.

Плотностная модель. На рисунке 4, a представлена карта поля силы тяжести (редукция Буге) анализируемой площади, распределение его значений (всего 40 209 точек) бимодально с модами -22.5 и $+5.0$ мГал (см. рис. 4, b), минимальная, средняя и максимальная величины аномального поля силы тяжести равны -46 , -4 и $+24$ мГал соответственно. Бимодальность распределения свидетельствует о двух типах земной коры в пределах рассматриваемой площади. Структура поля достаточно проста; прослеживается одна положительная аномалия ССВ простирания, которая обрамляется с двух сторон отрицательными аномалиями. Северо-западный и юго-восточный блоки — области интенсивного проявления гранитоидного магматизма, области развития крупных батолитов в коре и дополнительно общего разуплотнения в верхней мантии. Центральный блок характеризуется преимущественно осадочным разрезом верхней части земной коры, наличием мелких интрузий различного состава, уплотнением в низах коры и верхах мантии. Малмыжский рудный узел расположен в центральном блоке и приурочен к положительной гравитационной аномалии с интенсивностью до 15 мГал (см. рис. 4, b). Два других рудных узла — Пони-Мулинский и Анаджаканский — располагаются на «склонах» центрального блока, в зонах перехода от положительных к отрицательным значениям поля силы тяжести (см. рис. 4, a, b).

Как было показано ранее [Didenko et al., 2021], диапазон глубин границы кора—мантия в пределах рассматриваемой площади составляет 29—39 км. Максимальная глубина Мохо отмечена на юго-востоке площади, восточнее Центрального Сихотэ-Алиньского разлома (см. рис. 2, б) в зоне развития крупных гранитных массивов Сихотэ-Алиньского хребта, минимальные — на севере территории в зоне распространения юрских пород Баджалского террейна. На основной территории в зоне развития рассматриваемых рудных узлов глубина Мохо составляет 30—35 км, поэтому плотностная модель территории была рассчитана до глубины 35 км (см. доп. материалы, Приложение 2). Здесь мы приводим и кратко характеризуем 5 глубинных срезов из объемной модели в земной коре до Мохо (см. рис. 4, а—з).

Уровень глубин 5 км (см. рис. 4, а) отличается ячеистым распределением плотности и небольшими размерами аномалий. Это особенно характерно для юго-западной части площади и определяется влиянием локальных грабенов в пределах Среднеамурского прогиба выполненных кайнозойскими осадками со значительным дефицитом плотности (до 0.6 г/см^3) по отношению ко всем остальным породам. Схожая причина в восточной части — здесь локальные понижения выполнены вулканогенными структурами и приповерхностными интрузиями гранитов. Малмыжский рудный узел приурочен к положительной аномалии (+3 %), и наоборот, Анаджаканский — к отрицательной аномалии (–5 %). Явно выраженной аномалии плотности для Пони-Мулинского рудного узла не наблюдается.

Карта расчетной относительной плотности на глубине 10 км (см. рис. 4, б) сходна с таковой для глубины 5 км, но пространственные размеры аномалий здесь существенно больше. Размах величин плотности на этом глубинном уровне становится меньше и составляет от –9 до +11 %. Как и на предыдущем глубинном уровне, Малмыжский рудный узел приурочен к положительной аномалии (+3 %); Анаджаканский — к отрицательной аномалии (–4 %); для Пони-Мулинского узла какой-либо ярко выраженной аномалии не наблюдается.

Распределение плотностных неоднородностей на глубине 18 км (см. рис. 4, в) существенно отличается от таковой для глубины 10 км. В центральной части площади практически исчезли локальные аномалии. Плотностная дифференциация разреза уменьшилась ($-6 \pm 10 \%$), что хорошо видно на карте. Практически исчезла положительная аномалия плотности под Малмыжским узлом, Анаджаканский узел по-прежнему отчетливо ассоциирует с зоной разуплотнения. Пони-Мулинский узел располагается в безаномальной области, плотностных неоднородностей не наблюдается.

Распределение плотности на глубине 25 км (см. рис. 4, г) также отличается от предыдущего уровня. Размах величин относительной плотности на этом глубинном уровне составляет от –7 до +10 %. Анаджаканский рудный узел сохраняет свою приуроченность к отрицательной плотностной аномалии (–3.5 %), а вот Малмыжский — вновь «занял» место над положительной аномалией (+4 %). Пони-Мулинский узел, так же как и на предыдущих глубинных уровнях, расположен в зоне перехода от отрицательной плотности к положительной и не характеризуется какой-либо спецификой.

Следующий глубинный уровень 33 км (см. рис. 4, д) в общем соответствует уровню границы Мохо и кровле мантии. Здесь естественно уменьшился размах значений плотности, который составляет от –4 до +5 %. Малмыжский узел остался внутри области повышения плотности, но интенсивность аномалии несколько упала. Интересно, что к югу от Малмыжского узла на расстоянии 31 км появилась соразмерная с ним интенсивная положительная аномалия плотности, которая, возможно, может свидетельствовать еще об одной перспективной площади, скрытой под осадочным чехлом. Анаджаканский узел устойчиво располагается в зоне разуплотнения. Пони-Мулинский узел не характеризуется какой-либо индивидуализированной аномалией плотности также и на этом уровне.

Глубинные профили по данным магнитной и плотностной моделей. На профиле эффективной намагниченности по линии I—I, проходящей через Малмыжский и Пони-Мулинский рудные узлы (рис. 5, а), отчетливо проявлены области повышенных ее значений, располагающихся под этими узлами. Под первым, на глубинах 0—5 км, величина эффективной намагниченности возрастает до 100 усл. ед., под вторым — до 30. Области повышенной эффективной намагниченности под этими рудными узлами имеют двухъярусную структуру; до глубины 5—6 км фиксируются высокомагнитные области, далее на глубине примерно 8—10 км намагниченность резко уменьшается вплоть до отрицательных значений, а затем на глубинах 12—15 км снова возрастает. Полагаем, что наличие разноглубинных высокомагнитных объемов связано с двумя уровнями приповерхностных магматических камер.

На рисунке 5, б представлен профиль относительной плотности по линии I—I, проходящей через Малмыжский и Пони-Мулинский рудные узлы. Здесь также отчетливо видны вертикальные области повышенной относительной плотности под этими рудными узлами. Особенно наглядно это видно в случае Малмыжского рудного узла; здесь контраст плотностей пород области собственно рудного узла и окружающих достигает 6—8 %. Так же как и на профиле эффективной намагниченности, область повышенной плотности имеет «разрыв», но уже на глубинах 17—25 км, а затем в нижней коре снова фиксируется область повышенной плотности. Вероятно, здесь фиксируется самая глубокая коровая магматическая камера.

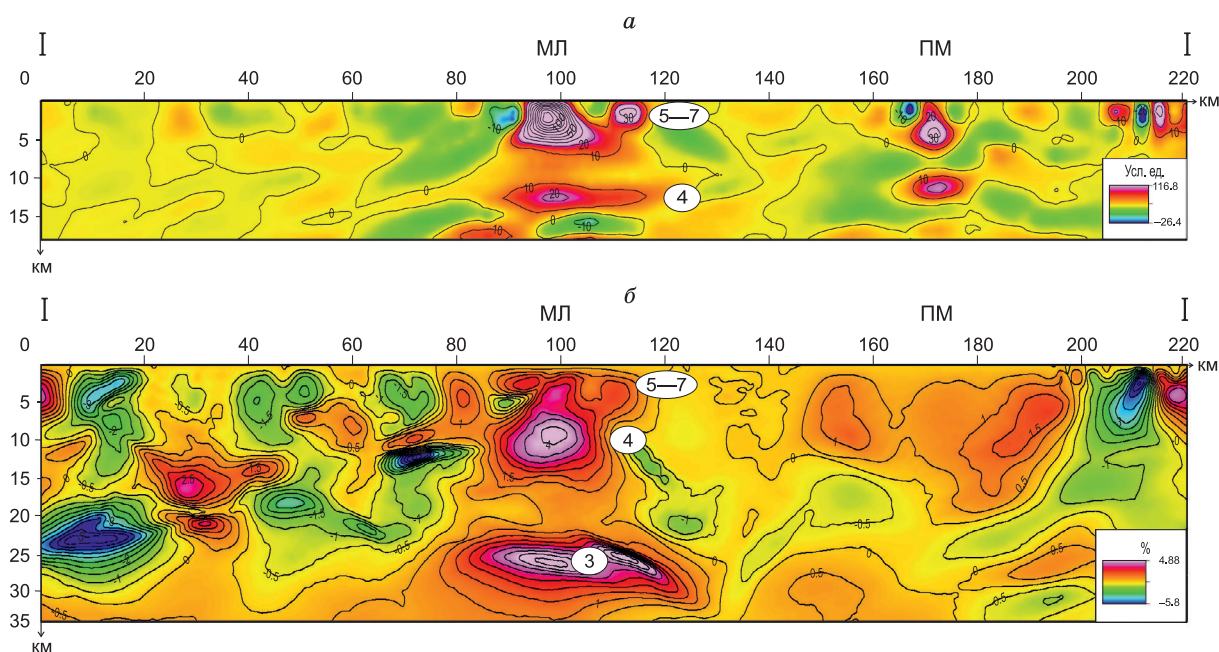


Рис. 5. Глубинные профили по линии I—I эффективной намагниченности (а) и относительной плотности (б), пересекающие Малмыжский и Пони-Мулинский рудные узлы.

Положение профиля I—I дано на геологической карте рис. 2, б. Цифры в белых овалах на рис. 5, а, б; 6, б, в обозначают стадии формирования рудной структуры, по [Richards, 2021], см. текст.

Различная горизонтальная мощность областей с повышенной плотностью и намагниченностью под Малмыжским и Пони-Мулинским рудными узлами на этом профиле объясняется различным углом их пересечения, если первую структуру профиль сечет вдоль ее простирания, то вторую — практически вкрест простирания (см. рис. 2, б). Второй причиной «невывразительности» в глубинной магнитной структуре Пони-Мулинского рудного узла является, вероятно, наличие рядом — через Центральный Сихотэ-Алиньский разлом — высокомагнитных пород (см. рис. 3, а), образование которых связано уже с другими процессами.

ДИСКУССИЯ И СОПОСТАВЛЕНИЕ С ИЗВЕСТНЫМИ МОДЕЛЯМИ Cu-ПОРФИРОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Модельным построениям глубинного строения суперкрупных золотомедно-порфировых месторождений посвящено огромное количество литературы, но в большинстве из них эта проблема решалась на уровне минералогических и петрологических систем, геодинамических и минералого-термобарогеохимических реконструкций [Richards, 2003, 2021; Berger et al., 2008; John et al., 2010; Sillitoe, 2010, 2012; Буханова, Плечев, 2017; Буханова, 2020; и др.], работ же, посвященных глубинному строению Au-Cu-порфировых рудных узлов и основанных на анализе геопотенциальных полей, не так много. Из геофизических работ, в которых на основе анализа аномального магнитного поля с привлечением других геолого-геохимических данных рассматривается глубинная структура, необходимо отметить циклы статей: 1) по порфировым медным месторождениям Чили на западной активной окраине Южной Америки [Behn et al., 2001]; 2) для Au-Cu-Mo-порфирового рудного узла «Pebble» на юго-западе Аляски [Anderson et al., 2013, 2014]. Наш интерес к последнему рудному узлу на противоположном берегу Тихого океана обусловлен двумя следующими причинами. Во-первых, он, так же как и большинство рудных узлов (в том числе и Малмыжский) с суперкрупными Au-Cu-порфировыми месторождениями, был сформирован в пределах активной окраины (см. рис. 1). Во-вторых, возраст гранодиоритов и кварцевых монцодиоритов, с которыми ассоциирует месторождение «Pebble» составляет от 91 до 89 млн лет [Lang et al., 2013], что очень близко возрасту интрузивов мяочанского и нижнеамурского комплексов.

Для района месторождения «Pebble» методами 2D и 3D инверсий магнитного поля были рассчитаны объемная модель до глубины 10 км и карты на шести глубинных уровнях от 200 до 9000 м кажущейся магнитной восприимчивости пород [Anderson, 2013]. На этой модели хорошо видно, что источником выходящих на поверхность нескольких отдельных гранодиоритовых штоков является батолит размером примерно 60 × 45 км на глубине 9 км.

Примерно такую же картину мы видим и на профиле I—I эффективной намагниченности, пересекающем Малмыжский и Пони-Мулинский рудные узлы (см. рис. 5, а). На профиле отчетливо видны вертикальные зоны повышенной относительной эффективной намагниченности под этими рудными узлами, причем эти зоны не сплошные, а имеют «разрывы» на глубине 8—12 км. Можно предположить, что такую картину формируют несколько разноглубинных батолитов — бывших магматических камер.

Анализ полученной магнитной модели дает основание выделить в пределах площади кольцевую структуру с центральным крупным магнитным телом в районе собственно Малмыжского рудного поля и серии фрагментарно проявленных по периферии более мелких магнитных тел дугообразной формы. Центральное магнитное тело может быть проинтерпретировано как гранитоидный крупный батолит, периферийные магнитные тела на фоне немагнитных осадочных образований мелового возраста также могут быть проинтерпретированы как магнитные магматические тела. Наиболее контрастно по магнитным данным выделяемая кольцевая структура проявляется на глубинах 6—13 км (см. рис. 3, д—ж). Здесь отчетливо видна рассматриваемая кольцевая структура. Ее диаметр составляет примерно 80 км, а центром является интрузивный массив Малмыжского рудного узла. Отметим, что интрузии Пони-Мулинского и Анаджаканского рудных узлов также попадают на периферию данной кольцевой структуры, занимая там вполне закономерное положение. Большая часть магнитных тел располагается до глубины 8—9 км, отдельные наиболее крупные — до глубины более 12 км (см. рис. 3, ж—з; 5, а).

Для площадей с медно-порфировыми месторождениями обычно характерно развитие кольцевых, овальных и полосовых магнитных аномалий: «Pebble» на Аляске [Anderson, 2013], «Majagual» в Центральной Америке [Gray et al., 2014], на севере Чили [Behn et al., 2001; Gow, Walshe, 2005], Центральный Иран [Shahabpour, 1999] и Новая Гвинея [Gow, Walshe, 2005]. Например, для месторождения «Pebble» измерения магнитной восприимчивости показали, что породы в районе месторождения более магнитны, чем породы такого же состава и возраста примерно в 60—70 км западнее и юго-западнее (вулканоплутонические комплексы Пайк-Крик-Стайахок-Хиллс (Pike Creek-Stuyahok Hills)). Прямое и обратное магнитное моделирование показало, что магнитные породы в районе месторождения «Pebble» простираются на глубину более 9 км и образуют овальную структуру размером $\sim 60 \times 45$ км [Anderson, 2013]. Предложенная магнитная модель для месторождения «Pebble» весьма схожа с нашей моделью для Малмыжского рудного узла (см. рис. 3).

Предполагается, что магнитные аномалии отражают батолитоподобные интрузивные тела, расположенные вдоль путей продвижения магматического фронта активной континентальной окраины [Behn et al., 2001]. Наличие нескольких медно-порфировых месторождений, сгруппированных в кластеры в пределах района, объясняется тем, что они связаны с общим родительским интрузивным комплексом, о котором «сигнализирует» соответствующая магнитная аномалия, природа которой связана с распределением железа между силикатами и оксидными зонами. Все модели медно-порфировых месторождений [Lowell, Guilbert 1970; Berger et al., 2008] включают контрастные зоны изменений, сосредоточенные вокруг месторождения. Магнитные аномалии, вероятно, отражают местоположение этих зон: слабые локальные максимумы магнитного поля над калиевой зоной, низкая магнитная интенсивность над серицитовыми зонами и постепенно увеличивающаяся интенсивность над пропилитовой зоной [John et al., 2010]. Таким образом, в идеальном случае кольцевой магнитный минимум должен совпадать с зоной интенсивных изменений. Конечно, в природе намагничивание происходит гораздо сложнее; здесь, вероятно, имеют место намагниченности термической и термохимической, и химической (кристаллизационной) природы. В любом случае, наличие более магнитных железистых минералов, таких как магнетит и пирротин, определяется окислительно-восстановительными условиями.

Рассматривая плотностные особенности выделенной кольцевой структуры, отметим, что столь же определено, как в магнитной модели, она не выделяется, но отчетливо видно, что ряду магнитных тел (см. рис. 5, а) на различных глубинах отвечают тела повышенной плотности (см. рис. 5, б). Речь в первую очередь идет о верхне- и среднекоровых батолитах Малмыжского рудного узла. Для верхней коры этот вопрос рассматривался ранее в [Шашорин и др., 2018], а также в [Носырев, Кравченко, 2020]. Выводы примерно схожи; магнитной аномалии отвечает соразмерная аномалия поля силы тяжести.

При рассмотрении плотностной модели интерес представляет не только верхний уровень земной коры, но и аномалии более глубоких горизонтов. Согласно эмпирическим данным и модельным построениям [Richards, 2003, 2021; Berger et al., 2008; John et al., 2010; Sillitoe, 2010, 2012], зарождение крупных Си-порфировых месторождений происходит в зоне перехода океан—континент ниже поверхности Моховича на глубинах порядка 100 км. При погружении океанической коры под континентальную на уровне астеносферы идет дегидратация первой (выделение воды и других летучих), за счет чего происходит частичное плавление гидратированной мантии, всплытие и формирование нижнекорового батолита.

Проекция Малмыжского, Пони-Мулинского и Анаджаканского рудных узлов на карте Мохо Си-хотэ-Алиньского орогенного пояса, рассчитанного по гравиметрическим данным [Didenko et al., 2021], занимают позицию на южном склоне регионального выступа этой поверхности ССВ ориентировки с минимальной глубиной в 28 км. С юга и запада выступ обрамляют впадины Мохо с глубинами более

40 км, которые отражают зоны интенсивных разуплотнений в литосферной мантии региона — меридиональной Баджал-Ям-Алиньской (БАЗМР) на западе и северо-восточной Сихотэ-Алиньской (САЗМР) на востоке (рис. 6, а). По нашим представлениям [Диденко, Носырев, 2020], изначально БАЗМР и САЗМР представляли единую зону разуплотнения. Позднее, уже в режиме трансформной окраины [Ханчук и др., 2019а], она системой разломов Тан-Лу была разбита на две. Зоны пониженной плотности в литосферной мантии могут фиксировать области преобразования вещества в мантийном надсубдукционном клине, связанные с путями миграции расплавов и флюидов, формированием промежуточных магматических очагов над поверхностью погружающейся океанической коры. Такие неоднородности детально изучены в палео- и современных зонах субдукции [Добрецов и др., 2017]. Во многих случаях уже на уровне земной коры они разделяются на несколько ветвей, которым в верхней части коры соответствуют ареалы интенсивного проявления интрузивного магматизма и вулканизма.

Для определения глубинного строения изученной площади ниже Мохо из рассчитанной нами ранее [Диденко, Носырев, 2020] 3Д плотностной модели Сихотэ-Алиня по линии II—II (см. рис. 6, а) был «вырезан» профиль до глубины 120 км (см. рис. 6, б). Выбор этого направления представляется оптимальным по двум причинам: во-первых, он проходит через Малмыжский и Анаджаканский рудные узлы, и, во-вторых, что главное — он ортогонален к палеогранице океан—континент. На рисунке хорошо видно, что под Малмыжским и Анаджаканским рудными узлами прослеживаются вертикальные зоны повышенной относительной плотности. Причем под первым эта вертикальная зона в коровой области тоже двухъярусная, как это было видно и на профиле I—I (см. рис. 5, б), и отчетливо прослеживается вплоть до 80—90 км. На профиле юго-восточнее, примерно в 70 км от Малмыжа, фиксируется еще одна высокоплотностная зона с крутым наклоном в сторону континента, которая фиксируется вплоть до глубины 120 км, а на уровне 90—100 км она соединяется с «малмыжской» вертикальной зоной повышенной плотности (см. рис. 6, б).

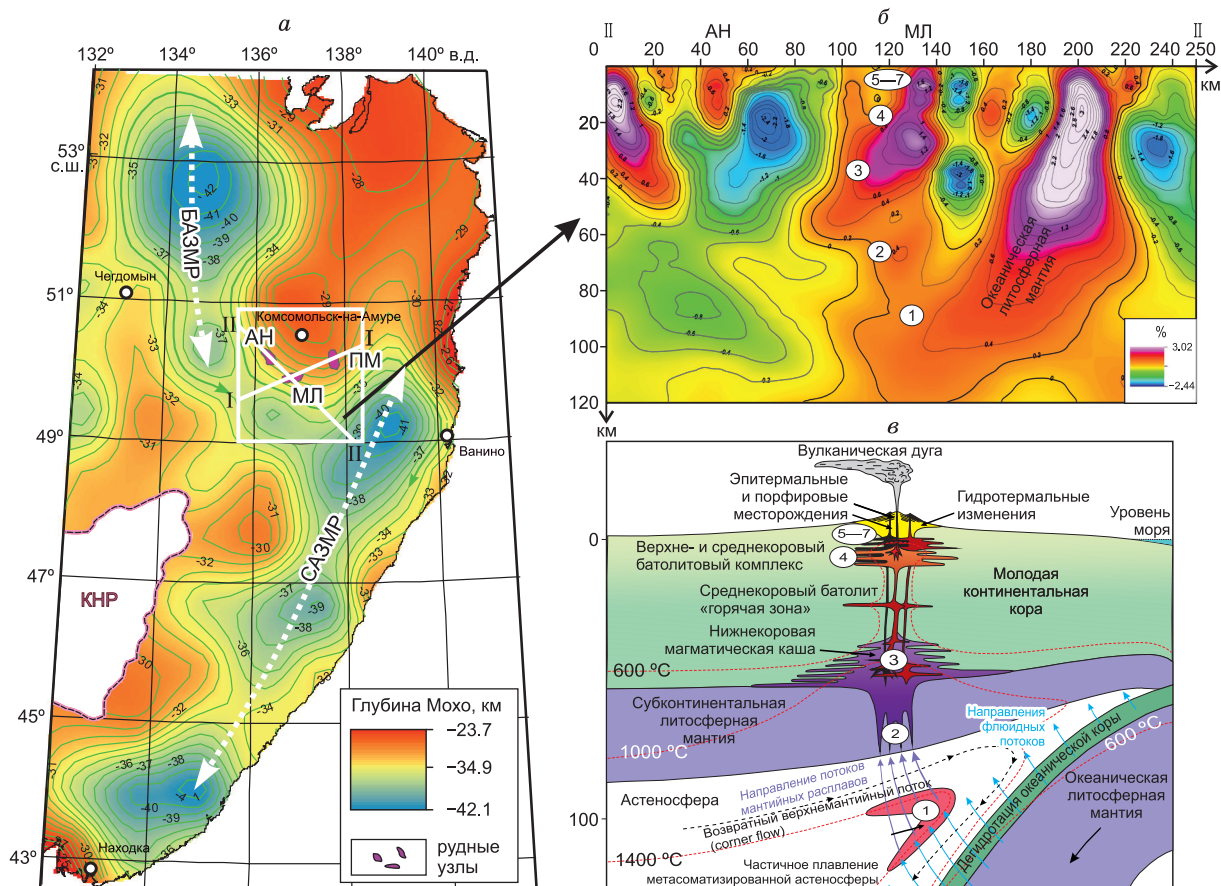


Рис. 6. Положение Анаджаканского, Малмыжского и Пони-Мулинского рудных узлов на карте Мохо Сихотэ-Алиньского орогенного пояса и прилегающих территорий [Didenko et al., 2021] (а), глубинный профиль относительной плотности по линии II—II (б) по модели [Диденко, Носырев, 2020], пересекающий Малмыжский рудный узел и модель образования крупного медно-порфирового месторождения (в), по [Richards, 2021].

Положение профиля II—II дано на геологической карте рис. 2, б.

Рассчитанная глубинная модель Малмыжского месторождения и прилегающей территории до глубин 120 км в виде профиля II—II оказалась очень похожей на комплексную петрологическую модель крупного медно-порфирового месторождения Дж.П. Ричардса [Richards, 2021]. Полагаем, что практически все характерные структурные особенности рассчитанных магнитной и плотностной моделей (см. рис. 5; 6, б) можно отождествлять с характерными глубинами комплексной петрологической модели (см. рис. 6, в), на которой показаны ключевые этапы процесса формирования крупных и суперкрупных медно-порфировых месторождений:

- 1) гидратированная океаническая литосфера, приводящая к метасоматозу и частичному плавлению астеносферного мантийного клина и образованию обогащенных магм;
- 2) гидратация литосферы, рассеянный магматизм;
- 3) остановка магмы в промежуточной камере на границе Мохо, образование магматической каши (MASH — melting, assimilation, storage, homogenization) и насыщение сульфидами;
- 4) транспрессивные деформации в молодой континентальной коре, приводящие к быстрому подъему магмы и образованию крупного батолита в средней и верхней коре;
- 5) формирование субвулканических купольных зон в кровле батолита, подъем в них пузырьковой магмы и металлосодержащих флюидов;
- 6) крупнообъемный поток магматических гидротермальных флюидов через купольные зоны, поддерживаемый непрерывной подпиткой батолита;
- 7) эффективное осаждение Cu-Fe-Mo-сульфидных минералов с образованием крупного порфирового месторождения.

Сходство комплексной петрологической модели крупного медно-порфирового месторождения Дж.П. Ричардса [Richards, 2021], по сути дела феноменологической, с рассчитанной глубинной моделью Малмыжского месторождения и прилегающей территории на основе гравитационного и магнитного полей свидетельствует об объективности последней. Полагаем также, что применение метода Андреева—Гриффина [Griffin, 1949; Андреев, Клушин, 1963], реализованного в программном комплексе «КОСКАД 3Д» [Комплекс..., 2008, 2018; Петров и др., 2010], при производстве прогностических и поисковых исследований на обнаружение крупных медно-порфировых месторождений весьма перспективно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные выводы настоящей работы можно сформулировать следующим образом.

1. При анализе аномального магнитного поля выделена кольцевая структура магматогенного генезиса, определяющая пространственную локализацию минерализации в Малмыжском и Пони-Мулинском рудных узлах. Показано, что подобные структуры в аномальном магнитном поле фиксируются для других медно-порфировых месторождений.

2. Площадь выделенной структуры может рассматриваться как потенциальный рудный район, перспективный на выявление Au-Cu-порфировой минерализации. В пределах кольцевой структуры дополнительно могут быть намечены перспективные площади с интрузиями гранитоидов и диоритов, развитых по ее периферии и находящихся под чехлом осадков Среднеамурского бассейна.

3. Рассчитаны геофизические модели для отдельных рудных узлов с Au-Cu-порфировой минерализацией, определены глубинные признаки, которые могут быть использованы при региональном металлогеническом прогнозе и выделении потенциальных рудных районов.

4. Показано, что структура рассчитанной в настоящей работе глубинной геофизической модели Малмыжского рудного узла сходна с петрологическими моделями крупных Cu-порфировых месторождений, предложенных Джеремии Ричардсом (J.P. Richards), Ричардом Силлитой (R.H. Sillitoe) и другими.

Авторы выражают благодарность рецензентам рукописи М.М. Буслову, В.Д. Суворову и М.И. Эпову, замечания и предложения которых были учтены при подготовке окончательной версии статьи и способствовали улучшению качества представленного материала. Особую благодарность выражаем С.Д. Головею, Е.Ю. Диденко, О.В. Рыбасу и А.С. Тютюник за подготовку гридов исходных данных, техническую помощь при выполнении расчетов и подготовки настоящей статьи.

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда (проект № 22-17-00023). Базовое финансирование за счет субсидий на выполнение госзадач ИТиГ ДВО РАН и ГИН РАН.

ЛИТЕРАТУРА

Андреев Б.А., Клушин И.Г. Геологическое истолкование гравитационных аномалий. Л., Недра, 1965, 496 с.

Архипов М.В., Войнова И.П., Кудымов А.В., Песков А.Ю., Ото Ш., Нагата М., Голозубов В.В., Диденко А.Н. Сравнительный анализ апт-альбских пород Кемского и Киселевско-Маноминского террейнов: геохимия, геохронология и палеомагнетизм // Тихоокеанская геология, 2019, т. 38, № 3, с. 58—83.

Блох Ю.И. Интерпретация гравитационных и магнитных аномалий. 2009, <http://sigma3d.com/pdf/books/blokh-interp.pdf>.

Буханова Д.С. Минералого-геохимические особенности Малмыжского золотомедно-порфирового месторождения, Хабаровский край: автореф. дис.... к. г.-м. н. Петропавловск-Камчатский, 2020, 25 с.

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

Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн. / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток, Дальнаука, 2006, кн. 1, 572 с.; кн. 2, 409 с.

Голозубов В.В. Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. Владивосток, Дальнаука, 2006, 239 с.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист М-53. Хабаровск. Геологическая карта, лист 1. СПб, Картфабрика ВСЕГЕИ, 2009а.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист М-53. Хабаровск. Объяснительная записка. СПб, Картфабрика ВСЕГЕИ, 2009б, 376 с.

Государственный доклад «О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2020 году». М., Роснедра, 2021, 569 с., <https://www.rosnedra.gov.ru/data/Files/File/7992.pdf>.

Десяткин А.С., Усова В.М., Котельникова Е.М. Типовые модели разработки комплексных медно-порфировых месторождений Дальнего Востока России // Вестник РУДН. Серия Инженерные исследования, 2019, т. 20, № 1, с. 96—104.

Диденко А.Н., Носырев М.Ю. Плотностная структура литосферы Сихотэ-Алиньского орогенного пояса // ДАН, 2020, т. 492, № 2, с. 66—71.

Диденко А.Н., Носырев М.Ю., Шевченко Б.Ф., Гильманова Г.З. Тепловая структура Сихотэ-Алиня и прилегающих территорий по данным спектрального анализа аномального магнитного поля // ДАН, 2017а, т. 477, № 3, с. 352—356.

Диденко А.Н., Песков А.Ю., Кудымов А.В., Войнова И.П., Тихомирова А.И., Архипов М.В. Палеомагнетизм и аккреционная тектоника Северного Сихотэ-Алиня // Физика Земли, 2017б, № 5, с. 121—138.

Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Кулаков И.Ю., Котляров А.В. Проблемы фильтрации флюидов и расплава в зонах субдукции и общие вопросы теплофизического моделирования в геологии // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (5), с. 701—722, doi: 10.15372/GiG20170503.

Звездов В.С. Обстановки формирования крупных и сверхкрупных медно-порфировых месторождений // Отечественная геология, 2019, № 5, с. 16—35.

Комплекс спектрально-корреляционного анализа данных «КОСКАД 3Д». Ч. II. 2008.1. М., РГТУ, 2008, 119 с.

Комплекс спектрально-корреляционного анализа данных «КОСКАД 3Д». Ч. I. 2018.1. М., МГРИ, 2018, 136 с.

Минина О.В., Мигачёв И.Ф., Звездов В.С. Прогнозно-металлогеническое районирование южной части Дальневосточного региона на медно-порфировое оруденение // Отечественная геология, 2019, № 1, с. 35—49.

Носырев М.Ю., Кравченко С.И. Плотностная модель земной коры района Малмыжского месторождения и ее использование для выделения перспективных площадей // Физика: фундаментальные и прикладные исследования, образование. Материалы XVIII региональной научной конференции / Под ред. А.И. Мазура, К.А. Драчева. Хабаровск, Тихоокеанский государственный университет, 2020, с. 75—78.

Парфенов Л.М. Континентальные окраины и островные дуги мезозойского северо-востока Азии. Новосибирск, Наука, 1984, 192 с.

Петров А.В., Юдин Д.Б., Сюэли Х. Обработка и интерпретация геофизических данных методами вероятностно-статистического подхода с использованием компьютерной технологии «КОСКАД 3Д» // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле, 2010, № 2(16), с. 126—132.

Петров О.В., Зубова Т.Н., Вербицкий В.Р. Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1:100 000 // Региональная геология и металлогения, 2016, № 67, с. 19—33.

Петров О.В., Киселев Е.А., Шпикерман В.И., Змиевский Ю.П. Прогноз размещения месторождений золото-медно-порфирового типа в вулканоплутонических поясах восточных районов России по результатам работ составления листов Госгеолкарты-1000/3 // Региональная геология и металлогения, 2019, № 80, с. 50—73.

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

Печерский Д.М., Диденко А.Н. Палеоазиатский океан: петромагнитная и палеомагнитная информация о его литосфере. М., ОИФЗ РАН, 1995, 298 с.

Роснедра, 2015. <https://www.rosnedra.gov.ru/article/8309.html>.

Роснедра, 2021. <https://www.rosnedra.gov.ru/article/13725.html>.

Рундквист Д.В., Ткачев А.В., Черкасов С.В., Гатинский Ю.Г., Вишневская Н.А. База данных и металлогеническая карта крупных и суперкрупных месторождений мира: принципы составления и предварительный анализ результатов // Крупные и суперкрупные месторождения: закономерности размещения и условия образования / Ред. Д.В. Рундквист. М., ИГЭМ РАН, 2004, с. 391—422.

Сахно В.Г. Позднемезозойско-кайнозойский континентальный вулканизм востока Азии. Владивосток, Дальнаука, 2002, 336 с.

Солоха Е.В. Методика и технология обработки и интерпретации геофизических данных в скользящих окнах «живой» формы: Автореф. дис. ... к. т. н. М., 2006, 26 с.

Среднеамурский осадочный бассейн: геологическое строение, геодинамика, топливно-энергетические ресурсы / Ред. Г.Л. Кириллова. Владивосток, ДВО РАН, 2009, 424 с.

Ханчук А.И., Гребенников А.В., Иванов В.В. Альб-сеноманские окраинно-континентальный орогенный пояс и магматическая провинция Тихоокеанской Азии // Тихоокеанская геология, 2019а, т. 38, № 3, с. 4—29, doi: 10.30911/0207-4028-2019-38-3-4-29.

Ханчук А.И., Иванов В.В., Игнатьев Е.К., Коваленко С.В., Семенова Д.В. Альб-сеноманский магматизм и медный рудогенез Сихотэ-Алиня // ДАН, 2019б, т. 488, № 3, с. 69—73.

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

Шашорин Б.Н., Макаров А.И., Руднев В.В., Выдрич Д.Е. Геолого-геофизическая модель Малмыжской рудно-магматической системы и возможности ее использования в прогнозировании (Северный Сихотэ-Алинь) // Разведка и охрана недр, 2018, № 2, с. 8—16.

Anderson E. Aeromagnetic signature of the geology and mineral resources near the Pebble porphyry Cu-Au-Mo deposit, Southwest Alaska. Thesis for the degree of Doctor of Philosophy (Geology). Colorado School of Mines, 2013, 102 p., https://mountainscholar.org/bitstream/handle/11124/11/Anderson_mines_0052E_10323.pdf?sequence=1.

Anderson E.D., Hitzman M.W., Monecke T., Bedrosian P.A., Shah A.K., Kelley K.D. Geological analysis of aeromagnetic data from Southwestern Alaska: Implications for exploration in the area of the Pebble porphyry Cu-Au-Mo deposit // Econ. Geol., 2013, v. 108 (3), p. 421—436, doi: 10.2113/econgeo.108.3.421.

Anderson E.D., Zhou W., Li Y., Hitzman M.W., Monecke T., Lang J.R., Kelley K.D. Three-dimensional distribution of igneous rocks near the Pebble porphyry Cu-Au-Mo deposit in southwestern Alaska: Constraints from regional-scale aeromagnetic data // Geophysics, 2014, v. 79 (2), p. B63—B79, doi: 10.1190/geo2013-0326.1.

Behn G., Camus F., Carrasco P., Ware H. Aeromagnetic signature of porphyry copper systems in Northern Chile and its geologic implications // Econ. Geol., 2001, v. 96, p. 239—248.

Berger B.R., Ayuso R.A., Wynn J.C., Seal R.R. Preliminary model of porphyry copper deposits. USGS Open-File Rep. 2008–1321, 2008, 55 p., <http://pubs.usgs.gov/of/2008/1321/>.

Didenko A.N., Nosyrev M.Yu., Gil'manova G.Z. A gravity-derived Moho model for the Sikhote Alin orogenic belt // Pure Appl. Geophys., 2021, doi: 10.1007/s00024-021-02842-8.

ESRI. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA, 2011.

Goldman Sachs, 2021, <https://www.forbes.com/sites/greatspeculations/2021/06/01/the-race-for-copper-the-metal-of-the-future/?sh=48a73274319a>.

Gow P., Walshe J.L. The role of preexisting geologic architecture in the formation of giant porphyry-related Cu ± Au deposits: Examples from New Guinea and Chile // Econ. Geol., 2005, v. 100, p. 819—833.

Gray F., Hammarstrom J.M., Ludington S., Zürcher L., Nelson C.E., Robinson G.R., Jr., Miller R.J., Moring B.C. Porphyry copper assessment of Central America and the Caribbean Basin. USGS Sci. Invest. Rep. 2010–5090–I, 2014, 81 p., doi: 10.3133/sir20105090I.

Griffin W.R. Residual gravity in theory and practice // Geophysics, 1949, v. 14 (1), p. 39—56, doi: 10.1190/1.1437506.

John D.A., Ayuso R.A., Barton M.D., Blakely R.J., Bodnar R.J., Dilles J.H., Gray F., Graybea F.T., Mars J.C., McPhee D.K., Sea R.R., Taylor R.D., Vikre P.G. Porphyry copper deposit model, Ch. B of Mineral deposit models for resource assessment. USGS Sci. Invest. Rep. 2010–5070–B, 2010, 169 p.

Khanchuk A.I., Kemkin I.V., Kruk N.N. The Sikhote-Alin orogenic belt, Russian South East: Terranes and the formation of continental lithosphere based on geological and isotopic data // *J. Asian Earth Sci.*, 2016, v. 120, p. 117—138.

Lang J.R., Gregory M.J., Rebagliati C.M., Payne J.G., Oliver J.L., Roberts K. Geology and magmatic-hydrothermal evolution of the giant Pebble porphyry copper-gold-molybdenum deposit, southwest Alaska // *Econ. Geol.*, 2013, v. 108, p. 437—462.

Lowell J.D., Guilbert J.M. Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits // *Econ. Geol.*, 1970, v. 65, p. 373—408.

Petrov O.V., Khanchuk A.I., Ivanov V.V., Shatov V.V., Seltmann R., Dolgoplova A.V., Alenicheva A.A., Molchanov A.V., Terekhov A.V., Leontev V.I., Belyatsky B.V., Rodionov N.V., Sergeev S.A. Porphyry indicator zircons (PIZ) and geochronology of magmatic rocks from the Malmyzh and Pony Cu-Au porphyry ore fields (Russian Far East) // *Ore Geol. Rev.*, 2021, v. 139, Part A, Article 104491, doi: 10.1016/j.oregeorev.2021.104491.

Ren J., Niu B., Wang J., Jin X., Zhao L., Liu R. Advances in research of Asian geology: A summary of 1:5M International Geological Map of Asia project // *J. Asian Earth Sci.*, 2013, v. 72, p. 3—11.

Richards J.P. Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation // *Econ. Geol.*, 2003, v. 98, p. 1515—1533.

Richards J.P. Porphyry copper deposit formation in arcs: What are the odds? // *Geosphere*, 2021, v. 18 (1), p. 130—155, doi: 10.1130/GES02086.1.

Shahabpour J. The role of deep structures in the distribution of some major ore deposits in Iran, NE of Zagros Thrust Zone // *J. Geodyn.*, 1999, v. 28, p. 237—250.

Sillitoe R.H. Porphyry copper systems // *Econ. Geol.*, 2010, v. 105, p. 3—41, doi: 10.2113/gsecongeo.105.1.3.

Sillitoe R.H. Copper provinces // *SEG Spec. Publ. 16* / Eds. J.W. Hedenquist, M. Harris, F. Camus. 2012, p. 1—18.

Singer D.A., Berger V.I., Moring B.C. Porphyry copper deposits of the world: database and grade and tonnage models. Open-File Rep. 2008-1155. USGS, Menlo Park, 2008, 46 p., https://www.researchgate.net/publication/303172164_Porphyry_copper_deposits_of_the_world_database_map_grade_and_tonnage_models/link/5f530c17299bf13a31a0946e/.

Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Dvurechenskaya S.S., Vasyukov V.E., Shumilin D.A., Voskresensky K.I. The superlarge Malmyzh porphyry Cu-Au deposit, Sikhote-Alin, eastern Russia: Igneous geochemistry, hydrothermal alteration, mineralization, and fluid inclusion characteristics // *Ore Geol. Rev.*, 2019, v. 113, Article 103112, doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.103112.

Tectonic map of Northern-Central-Eastern Asia / Eds. O.V. Petrov, Yu.G. Leonov, Li Tingdong, O. Tomurtogoo. 15 sheets + explanatory note. St. Petersburg, VSEGEI, 2014.