

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

СТРУКТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ ЗОЛОТОРУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОСТОЧНОГО СКЛОНА ПОЛЯРНОГО УРАЛА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СНИМКОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА LANDSAT 8

© 2021 г. Ю. Н. Иванова^{a, b, *}, Р. И. Выхристенко^a

^aИнститут геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

^bРоссийский университет дружбы народов, Москва, Россия

*E-mail: jnivanova@yandex.ru

Поступила в редакцию 31.03.2021 г.

По материалам многозональной космической съемки аппарата Landsat 8 выполнен анализ территорий восточного склона Полярного Урала, перспективных на выявление золоторудной минерализации: Юньягинское рудное поле (Шучьинская зона), Тоупугол-Ханмейшорский рудный район и Манюкую-Ворчатинский рудный узел (центральная часть Малоуральской зоны). Мы провели сопоставление этих площадей для выявления схожих закономерностей геологического строения и размещения месторождений и рудопроявлений в системе морфоструктур, что поможет разработать прогнозно-поисковые признаки (геологические, морфологические) золоторудной минерализации. Было установлено, что поиски золоторудной гидротермальной минерализации на данной площади следует проводить в концентриках кольцевых структур 2-го порядка (диаметр от 10 км и более) в ассоциации с субвулканическими телами кварцевых диоритов/гранодиоритов и на периферии внутренней части крупных кольцевых структур 1-го порядка (диаметром более 50 км) сложного строения с признаками “телескопированности”, связанных с интрузивными образованиями, представленными диоритами, кварцевыми монцодиоритами, гранодиоритами заключительной фазы внедрения. Минерализация должна быть локализована совместно с участками сгущения линеаментов СЗ, СВ и/или субширотного направлений и в пределах региональных разломных зон протяженностью до сотен км. Оруденение формируется на заключительной стадии развития вулканических сооружений.

Ключевые слова: мультиспектральные снимки, золоторудная минерализация, линеаменты, морфоструктуры, тектоно-вулканическая реконструкция, Полярный Урал, Landsat 8

DOI: 10.31857/S0205961421050055

ВВЕДЕНИЕ

Спектральные методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в практике геологоразведочных работ стали применяться в 1970-х гг. благодаря внедрению многоспектральных фотографий земной поверхности. Сегодня подобные методы широко используются наряду с традиционными (геологическими, геофизическими, геохимическими и др.) для прогнозирования различных типов рудной минерализации (Velsky et al., 2003; Vaughan et al., 2005; di Tommaso, Rubinstein, 2007; Zhang et al., 2007; Pour, Hashim, 2011; Amer et al., 2012).

В последнее время Арктика привлекает большое внимание научных кругов по всему миру, и все больше научных миссий нацелены на этот регион из-за огромных и разнообразных запасов полезных ископаемых, которые все еще плохо

изучены. В состав региона входят Северный Ледовитый океан, части территорий Аляски, Канады, Финляндии, Гренландии, Исландии, Норвегии, России и Швеции, а также прилегающие к ним моря.

Сегодня Китай также заинтересован в ресурсах Арктики. Эта страна не имеет доступа к региону, что объясняет их желание интернационализировать данную площадь. КНР является важным игроком на арктической территории и имеет свои интересы и приоритеты в этом районе (Xinmina, 2019).

Решение многих специфических задач в Арктике, включая прогнозирование залежей руды, также может быть решено с помощью космических технологий, обеспечивающих множество преимуществ для исследовательских и опытно-конструкторских проектов на этой площади, поз-

воляющих проводить широкомасштабные и относительно рентабельные наблюдения и сбор данных в регионе с ограниченной наземной инфраструктурой (Bohlmann, Koller, 2020).

В настоящее время в специализированных журналах и книгах, посвященных ДЗЗ, очень мало работ по теме прогнозирования рудной минерализации на арктической территории (например, Pour, Hashim, 2012; Sarapää, Sarala, 2013; Graham et al., 2017; Иванова и др., 2019, 2020). Подобные единичные публикации встречаются у исследователей из Китая на территории страны. Их статьи направлены на прогнозирование различных типов минерализации (Cu-порфировые, Ag–Pb–Zn, Ti–V–Fe, Fe–Cu-скарновые, Au) на основе технологий ГИС, 3D-моделирования, методов математической статистики с привлечением геологических, геохимических и геофизических данных (Wang, Chen, 2008; Cong et al., 2017; Lindagato et al., 2018; Zhang et al., 2019; Wang et al., 2020). Возможно, вскоре аналогичные работы появятся и для северных районов, поскольку в этой стране есть для этого все ресурсы и технологии (например, Xiong et al., 2020).

В данной статье мы представляем анализ мультиспектральных спутниковых изображений с КА ДЗЗ Landsat 8 и результаты морфоструктурного картирования территорий восточной части Полярного Урала, входящих в Российскую часть Арктики. Это исследование поможет выявить прогнозные особенности (геологические, морфологические) для золоторудного оруденения, которые могут быть использованы в качестве вспомогательного средства для разведки полезных ископаемых в других районах Полярного Урала и северных широтах.

Мы выбрали следующие площади (с севера на юг): Щучинскую зону (Юньягинское рудное поле), Тоупугол-Ханмейшорский рудный район и центральную часть Малоуральской зоны (ЦЧМЗ), являющиеся наиболее перспективными на выявление золоторудной минерализации. Собь-Харбейская площадь ранее была проанализирована Г.А. Миловским с соавторами (см. Миловский и др., 2007). Данная территория также является перспективной для выявления золотого оруденения и поэтому включена в работу.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ИЗУЧАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Полярно-Уральский сегмент Восточно-Уральской мегазоны разделяют на Щучинскую и Войкарскую зоны (рис. 1). Они характеризуются осадочно-вулканогенным типом разреза, широко проявленным плутоническим и гипабиссальным магматизмом, сравнительно слабым динамотермальным и интенсивным дислокационным метаморфизмом. Формации отвечают обста-

новкам океанического рифтинга островодужных систем и активной континентальной окраины (Пучков, Иванов, 2020).

Щучинская зона располагается на северном окончании Восточно-Уральской мегазоны. На западе она ограничивается региональным разломом, входящим в систему Главного Уральского разлома (ГУР). Он представляет собой крупный надвиг, по которому комплексы Центрально-Уральской мегазоны. Фрагмент ГУР обрамляет Щучинский синклиниорий в виде системы дугообразных нарушений, сливающихся в единую полукольцевую разломную структуру и образующую фронтальную часть надвига, теряющегося в восточном направлении под покровом мезозойских отложений.

В строении Щучинской зоны участвуют осадочные и вулканогенно-осадочные образования ордовика, силура, девона и карбона, прорванные разновозрастными интрузиями различного состава.

Интрузивные магматические образования на территории Щучинской зоны представлены массивами ультрабазитов, сформированных сыум-кеуским дунит-гарцбургитовым комплексом (O_{1-2}), слагающим одноименный массив, расположенный в ее западной части. Массив имеет протяженность 70 км и ширину до 12 км. К данным участкам приурочены рудные залежи хромитов, локализованные в телах дунитов. Образования сыум-кеуского и малыкского комплексов отнесены к офиолитовым комплексам Урала (Гурская, Смелова, 2003).

Крупные массивы базитов представлены породами малыкского (O_3) и харампэйско-масловского (S_1) габброноритовых комплексов.

Небольшие интрузивные тела образуют базиты юньягинского габбро-гранодиорит-гранитового комплекса (D_{1-2}). Они сложены метаморфизованными габброноритами и габброамфиболитами с линзовидно-полосчатым внутренним строением (Зылева и др., 2014; Andreichev et al., 2017).

С габбро и диоритами данного комплекса генетически связаны золотосодержащие скарново-магнетитовые месторождения и рудопроявления, локализованные в Юньягинское платино-золото-железородном узле площадью 670 км² ($S-D_2$). Одноименное месторождение в настоящее время представляет промышленный интерес. Помимо данного объекта рудный узел вмещает ряд рудопроявлений и пунктов минерализации медно-железородной скарновой с золотом, титан-железородной мафитовой (волковский тип), ванадий-титан-железородной ультрамафит-мафитовой (качканарский тип) и титан-железородной метаморфогенной формаций.

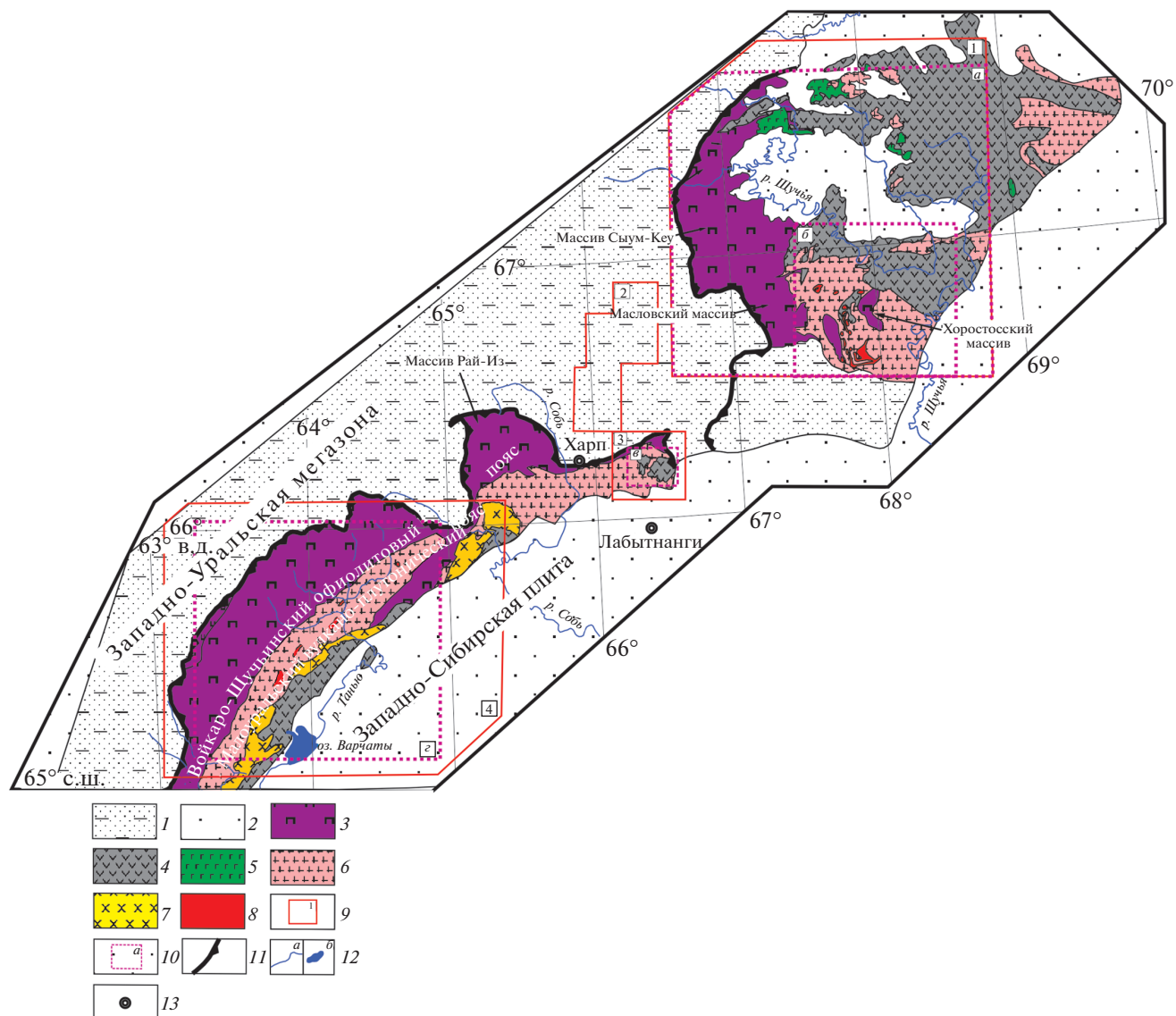


Рис. 1. Тектоническая схема Уральского складчатого пояса (по Государственная..., 2007): 1 – позднекембрийские и палеозойские образования Западно-Уральской структурной мегазоны; 2 – мезозойско-кайнозойский чехол Западно-Сибирской плиты; 3–9 – Восточно-Уральская мегазона (Шучинская – южная, Войкарская – северная): 3 – ордовикские метаморфизованные гипербазиты и габброиды; 4 – ордовикско-девонские вулканические и вулканогенно-осадочные образования; 5 – средне-позднеордовикские габброиды и плагиогранитоиды хойпейского комплекса; 6 – ранне-среднедевонские диориты и гранитоиды юнягинского и собского комплексов; 7 – ранне-среднедевонские габброиды, диориты и монцонитоиды конгорского комплекса; 8 – средне-позднедевонские гранитоиды юрменекского и яносурского комплексов; 9–10 – границы изучаемых территорий, соответствующие рамкам на рис. 2–4: 9 – рис. 2, а (1), рис. 2, б (2), рис. 2, в (3), рис. 2, г (4); 10 – 3, а (а), рис. 4 (б), рис. 3, б (в), рис. 3, в (г); 11 – ГУР; 12 – основные реки и озеро; 13 – города.

Месторождение Юнягинское расположено в 10 км восточнее железнодорожной ветки Обская–Бованенково. На объекте выполнена предварительная разведка. Скважинами вскрыты рудоносные скарны на контакте плагиогранитов и диоритов юнягинского комплекса с эффузивно-осадочными породами янганапэйской толщи, представленной порфиоровыми андезибазальтами и базальтами и их туфами, содержащей маломощ-

ные прослои кварцитов, песчаников и мраморизованных известняков. В экзоконтакте интрузии породы превращены в роговики и скарны. Главные рудные минералы представлены магнетитом, пиритом, пирротинном и халькопиритом, образующими иногда линзообразные тела с крутым падением. Мощность рудных интервалов составляет до 120 м. Наблюдаются отдельные залежи массивных магнетитовых руд мощностью до 9 м.

Концентрация золота по данным пробирного анализа (кern разведочных скважин) проб составляет от 0.5 до 5.5 г/т (Селюкова и др., 1999). Ресурсы категории P_3 для рудного узла были апробированы Всероссийским научно-исследовательским геологическим институтом им. А.П. Карпинского (ФГУП ВСЕГЕИ) и утверждены в количествах: железная руда — 139.5 млн т, сопутствующее золото — 60 т; платина — 30 т (экспертами переведены в минерагенический потенциал) (Зылева и др., 2014). Другие известные перспективные рудопоявления и пункты минерализации изучены гораздо хуже.

Габброиды харампэйско-масловского комплекса образуют группы субизометричных массивов размером до 16 км, приуроченных к периферийным частям Шучинской зоны. Выделяются два крупных массива данного комплекса: Масловский и Хоросотосский (см. рис. 1). Первый массив с юго-запада обрезан крупным Ханмей-Сибилейским разломом, входящим в систему надвигов ГУР. Фланги массива дислоцированы нарушениями СЗ и СВ простираения. Второй — перекрыт кайнозойскими осадками. К массивам габброидов харампэйско-масловского комплекса приурочены залежи титано-магнетитовых руд магматогенного типа (Зылева и др., 2014; Andreichev et al., 2017).

Войкарская зона имеет субмеридиональное ССВ простираение и представляет собой ряд аллохтонов, полого погружающихся в ВЮВ направлении. Зона существенно тектонизирована и разбита надвигами на отдельные пластины. Аллохтоны состоят из вулканогенных и терригенно-вулканогенных пород палеозойского возраста океанического и надсубдукционного происхождения. Подошва аллохтонов (в западной части Войкарской зоны) ограничена ГУР. Восточная часть зоны сложена ранне-среднепалеозойскими и поздне-девонскими блоками в различной степени метаморфизованных ультраосновных и основных пород офиолитовой ассоциации. Эти блоки слагают горные массивы Рай-Из и Войкаро-Сыньинский в осевой части Уральского хребта. Восточнее ГУР расположены девонские надсубдукционные плутонические, гипабиссальные, а также ассоциирующие с ними преимущественно вулканические и вулканогенно-осадочные образования (D_3-S_2) Восточной подзоны (Малоуральская зона) (Ремизов и др., 2014).

Малоуральская зона в среднем палеозое (O_3-C_1) представляла собой либо островную дугу (O_3-D_1), сменившуюся в раннем девоне окраинно-континентальным вулканоплутоническим поясом (Язева, Бочкарев, 1984), либо островную дугу, сформированную на гетерогенном основании (Кузнецов и др., 2000; Соболев и др., 2017; 2018). В северной и западной частях Войкарской подзоны массивы Войкаро-Сыньинский и Рай-Из об-

рамлены с юга и востока полосой габбро-амфиболитов. На востоке расположены ордовикско-девонские островодужные плутонические и осадочно-вулканические комплексы, объединенные в Малоуральскую подзону. В ней (к востоку от габбро-амфиболитов) выходят на поверхность вулканические толщи (поздний ордовик — средний девон) с тонкими прослоями осадочных пород, прорванными интрузиями разного состава (от габбро до гранитоидов) (Государственная..., 2007). Эти вулканические толщи являются частью палеозойской островодужной системы Полярного Урала, которая в эйфеле и вплоть до пермского столкновения с Восточно-Европейским континентом развивалась, скорее всего, как зрелая островная дуга (Estrada et al., 2012; Викентьев и др., 2017).

Геологическое строение Манюкую-Варчатинского рудного узла, Тоупугол-Ханмейшорского рудного района и Собь-Харбейской площади можно найти в отчетах (Прямоносков и др., 2001; Галлиулин и др., 2005; Шишкин и др., 2007; Перминов и др., 2009; и др., Бутаков и др., 2012; Кременецкий, 2012; Зылева и др., 2014; Ремизов и др., 2014; и др.) и работах (Черняев и др., 2005; Кениг, Бутаков, 2013; Soloviev и др., 2013; Викентьев и др., 2017).

МЕТОДИКА

В процессе анализа космических снимков (КС) нами была использована трехканальная мозаика, составленная из сцен КА ДЗЗ Landsat 8 в растровом формате MrSID с разрешением на местности ~30 м и площадью около 35000 м². Анализ КС проводился в программе ArcGis. При обработке КС основное внимание уделялось выявлению дизъюнктивных нарушений (линейных, дуговых, кольцевых и радиально-концентрических). Наиболее четко линейные выражаются на каналах раstra RGB = 1 : 2 : 2; 7 : 5 : 3 и 10 : 7 : 3 по резкой границе фототона и рисунку речной сети.

Анализ КС основывался на комплексном подходе, включающем морфоструктурный анализ (Иванова и др., 2019): снятие информативных структурных показателей рельефа и гидрографической сети с различных изображений земной поверхности; выявление главнейших морфоструктурных элементов в масштабе 1 : 200000; сопоставление с имеющимися геологическими картами, данными геофизических работ (карты магнитных и гравитационных полей, масштаб 1 : 200000 — как для изучаемой площади (Шишкин и др., 2007; Прямоносков и др., 2001; Ремизов и др., 2014; Зылева и др., 2014)), так и для сопредельных территорий с целью уточнения внешних контуров морфоструктур и элементов их внутреннего строения.

ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Комплексная аэрогеофизическая съемка Щучинской зоны была выполнена АО “ГНПП “Аэрогеофизика” в 2006–2009 гг. по госзаказу для составления геофизической основы в зоне проектируемой железной дороги Ивдель–Лабытнанги (Калмыков, Трусев, 2015). Съемка проводилась в масштабе 1 : 50000. В геофизический комплекс входили: аэромагниторазведка, аэроэлектроразведка дипольного индуктивного профилирования и аэрогамма-спектрометрия.

Щучинская зона по данным геофизических исследований имеет дугообразную морфологию с повышенными значениями магнитного поля и поля силы тяжести, приуроченными к ее периферийным частям в соответствии с развитыми здесь комплексами плутогенных формаций гипербазитов и габброидов. Внутренние и восточные области структуры характеризуются спокойным характером потенциальных полей и их пониженным уровнем, что обусловлено развитием здесь палеозойских вулканогенно-осадочных и осадочных комплексов, а также присутствием наложенных мезозойских впадин, выполненных мощной толщей терригенных осадков.

Геофизические исследования для Тоупугол-Ханмейшорской площади можно найти в отчетах (Волчков, Кряжев, 2005; Будаков и др., 2012).

В 2009 г. ИМГРЭ провело комплекс геофизических работ в пределах Манюкую-Варчатинского рудного узла (ЦЧМЗ) с целью уточнения положения рудных зон и корректировки на этой основе бурения для заложения скважин: метод вызванной поляризации с установкой срединного градиента по сети 50 × 10; профильные высокочастотные магнитометрические работы; аэромагнитные съемки масштаба 1 : 50000.

В результате в пределах рудопоявления Богдатовское была выявлена крупная отрицательная аномалия, интерпретируемая как глубокозалегающая интрузия конгорского комплекса, с которой, вероятно, связано оруденение (рис. 2г) (Кременецкий, 2012).

АНАЛИЗ КС ИЗУЧАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Впервые для территории Щучинской зоны с помощью многоспектральных КС КА ДЗЗ Landsat 8 мы был проведен анализ, построена морфоструктурная карта (рис. 2, а) и выполнена тектоно-вулканическая реконструкция (рис. 3, а).

В работе (Дьяконов, 2011) был проведен палеофациальный анализ палеовулкана (Щучинский) с выделением жерловой, прижерловой, склоновой и удаленной фаций.

С помощью КС уверенно выделяются фрагменты Центрально-Уральской мегазоны, представленные радиальными субпараллельными линейными СЗ направления от 20 до 40 км и ГУР —

также радиальные субпараллельные разрывные нарушения, но уже СВ ориентировки протяженностью до 30 км (см. рис. 2, а, 3, а). Данный палеовулкан имеет овальную форму, вытянутую в СЗ направлении, и размер 90 × 95 км. В ее строении входят 3 дуговые структуры 2-го и более низших порядков.

С анализом КС для Тоупугол-Ханмейшорского рудного района и ЦЧМЗ можно ознакомиться в статьях (Иванова и др., 2019, 2020) (рис. 2, в, г).

Методику анализа КС для Собь-Харбейской площади и их интерпретацию можно посмотреть в статье (Миловский и др., 2007) (рис. 2, б).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже было сказано выше, на геофизических картах четко фиксируется и прослеживается Ханмей-Сибилейская зона разломов, которую не удалось выделить на КС. Это, скорее всего, связано с тем, что западная часть палеовулкана сильно эродирована, а значительная часть ее восточной половины скрыта под мезо-кайнозойским чехлом, мощность которого более 1 км.

Возможно, данная зона разломов является долгоживущей структурой, с глубинным заложением (проникает в земную кору и верхнюю мантию) и магмопроводящим характером. Она совместно с линейными СВ направления “контролировала” главный глубинный очаг внутри данного палеовулкана. В периоды активизации по ним происходили тектонические подвижки, сопровождавшиеся притоком мантийного тепла, и, возможно, происходило “перемещение” очага с ЮЗ на СВ (по возрасту интрузивных массивов) с поступлением легкоподвижных компонентов из глубинных оболочек.

Параллельно возникали второстепенные (дополнительные) малоглубинные очаги, формировавшие дуговые/кольцевые структуры № 1, 2, 3 более низших порядков с разнообразной рудной специализацией (Томпсон и др., 1984).

На периферии кольцевой структуры № 1 локализованы рудопоявления Мо, Ti и Cr (см. рис. 2, а). К внутренней части кольцевой структуры № 2 относится наибольшее число рудопоявлений Fe и Hg, включая месторождение Юнгинское. К кольцевой структуре № 3 приурочены рудопоявления Fe и Ti. Возможно, наименьшее разнообразие рудной минерализации для кольцевой структуры № 3 связано с тем, что она образовалась последней в результате постепенного отмирания исходного и/или второстепенного очага с дефицитом порции глубинных расплавов и флюидов, тогда как кольцевая структура № 2 не испытывала недостатка расплавов (Почелуев и др., 2006).

На площадях Тоупугол-Ханмейшорского рудного района и ЦЧМЗ прослеживаются протяженные

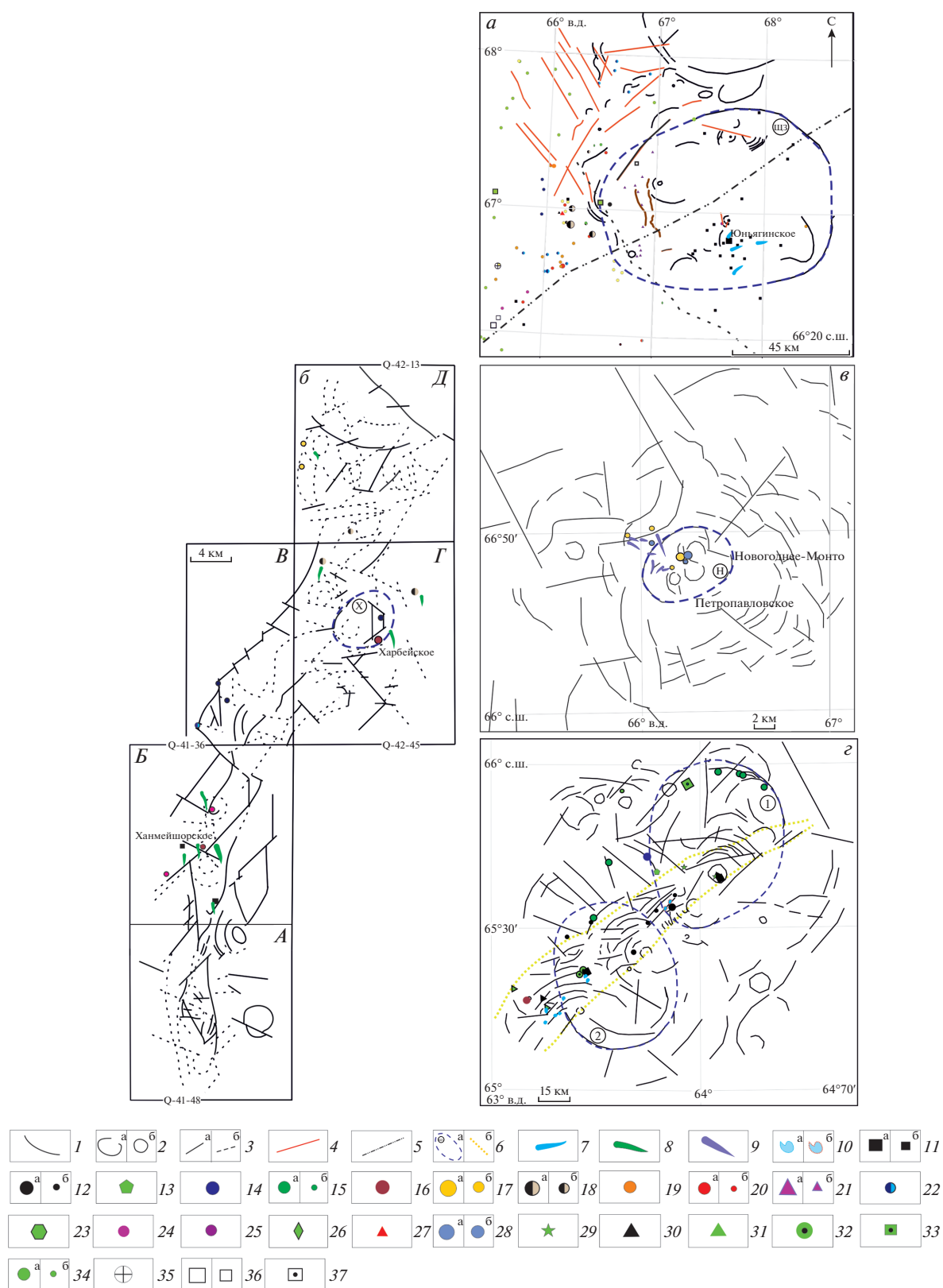


Рис. 2. Морфоструктурные карты: Щучинская зона (а), Собь-Харбейская площадь (по Миловский и др., 2007) с добавлениями (площади: А–Д: А – Яркеуская, Б – Ханмейская, В – Понпельзиская, Г – Тайкеуская, Д – Харбейская) (б), Тоупугол-Ханмейшорский рудный район (в), ЦЧМЗ (г). Условные обозначения: 1–6 – линеаменты: 1 – концентрические структуры 1-го и 2-го порядков; 2 – кольцевые (а) и дуговые (б) морфоструктуры 3-го порядка центрального типа; 3 – радиальные (а) и радиальные с нечетко выраженными структурно-тектоническими или геоморфологическими особенностями территории, которые не всегда подтверждаются в результате геолого-разведочных работ по (Миловский и др., 2007) для рис. 2, б; 4 – ГУР; 5 – Ханмей-Сибилейская зона разломов, вынесенная с геофизической карты; 6 – контуры: Щучинская зона (ЩЗ), Харбейская морфоструктура (Х), Новогодненская морфоструктура (Н), морфоструктуры № 1 и № 2 ЦЧМЗ (1, 2) (а); структура СВ направления ЦЧМЗ (б); 8–11 – субвулканические тела: 7 – диориты и гранодиориты 2-й фазы внедрения юнягинского комплекса по (Зылева и др., 2014); 8 – кварцевые диориты и гранодиориты харбейско-собского комплекса 2-й фазы внедрения по (Шишкин и др., 2007), 9 – кварцевые диориты кварцевые диориты собского комплекса 2-й фазы внедрения Тоупугол-Ханмейшорского рудного района по (Прямосов и др., 2001), 10 – кварцевые монцодиориты, гранодиориты и диориты конгорского комплекса Манюкую-Варчатинского рудного поля по (Шишкин и др., 2007) (а); перспективные интрузии диоритов конгорского комплекса 2-й фазы внедрения, выявленные в ходе геофизических работ (б), 11 – Fe–Cu–Au (а – месторождение, б – рудопроявление), 12 – Fe–Ti–V (а – месторождение, б – рудопроявление), 13 – рудопроявление Cu–Pd–Au, 14 – рудопроявление Pb, 15 – рудопроявление Cu, 16 – Mo–Cu рудопроявление, 17 – золото–кварцевый/порфирировый тип (а – месторождение, б – рудопроявление); 18 – Tn–Nb (а – месторождение, б – рудопроявление); 19 – месторождение Mn, Fe, Ge; 20 – Mo (а – месторождение, б – рудопроявление), 21 – Cr (а – месторождение, б – рудопроявление), 22 – Pb–Zn рудопроявление; 23 – рудопроявление Be; 24 – рудопроявление Sb; 25 – рудопроявление Hg; 26 – рудопроявление редких земель; 27 – рудопроявление Mn, 28 – скарново-магнетитовый тип с золотом (а – месторождение, б – рудопроявление), 29 – рудопроявление Pt, 30 – рудопроявление Fe–Cu, 31 – Cu–Au рудопроявление, 32 – рудопроявление Cu–Mo, 33 – точка минерализации Cu–Zn, 34 – Cu–Zn (а – месторождение, б – рудопроявление), 35 – месторождение фосфорита, 36 – месторождение (а), рудопроявление (б) жадеита, 37 – месторождение мусковита. Черными кружками внутри Манюкую-Варчатинского рудного поля показаны рудопроявления Благодатное, Геохимическое и Полярная Надежда.

радиальные ← зоны первого порядка. Они имеют СВ (до 50 км) и СЗ (до 25 км) направления (см. рис. 2, в, г). Эти структуры, вероятно, соответствуют ослабленным участкам земной коры (зонам декомпрессии), фиксирующим разломы фундамента и контролирующим рудную минерализацию (Горный и др., 2014).

К морфоструктуре № 1 (ЦЧМЗ) приурочено большинство рудопроявлений, которые локализованы в основном на ее периферии (Cu, Au, Zn, Fe, Ti, V). Рудопроявления Благодарное, Геохимическое и Полярная Надежда также принадлежат морфоструктуре № 1. Некоторые рудопроявления Fe, Cu, Mo принадлежат морфоструктуре № 2. Рудопроявления и точки минерализации (Cu–Mo, Fe–Ti–V, Cu располагаются во внутренней части, Fe–Cu, Mo–Cu, Cu–Au – во внешней части) относятся к морфоструктуре № 2 (см. рис. 2, в, г).

Кроме того, в пределах ЦЧМЗ была выделена серия коротких по простиранию радиальных линеаментов СВ простирания, сосредоточенных в полосе шириной 25 км при общей длине первые сотни км. Эта зона формирует структуру СВ направления и, вероятно, отражает дизъюнктивные нарушения и сложное блоковое строение территории, а также, вероятно, играет рудоконтролирующую роль. Возможно, она образовалась позже морфоструктур № 1 и 2, поскольку при пересечении кольцевых структур концентрические и радиальные линеаменты пересекают их без видимого смещения, так и с разрывами, а также с обрезаниями и смещениями отдельных частей кольцевых разломов (Космическая..., 1983).

ТЕКТОНО-ВУЛКАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗУЧАЕМЫХ ТЕРРИТОРИЙ

По (Ваганов и др., 1985; Ананьев и др., 2010) для кольцевых структур № 1 и 2 ЦЧМЗ выявлено, что в целом со временем положение последовательно формировавшихся очагов при подъеме к поверхности смещалось на юг и затем на ЮЗ в ходе эволюции магматического процесса (рис. 3, в) (Иванова и др., 2020).

Для основной кольцевой структуры Щучинской зоны проведение тектоно-вулканической реконструкции было затруднительным из-за небольшого числа выделенных дуговых/кольцевых линеаментов 1-го порядка и мощного чехла осадков мезозой-кайнозойского возраста. Мы можем посмотреть, как менялись со временем характер и траектории очагов, формировавших дуговые и кольцевые структуры 2 и 3-го порядков, входящих в Щучинскую зону.

Данные линеаменты также имеют признаки телескопированности расположения дуговых структур. Траектория магматического очага также изменялась при его подъеме к поверхности. Так для кольцевой структуры № 1 направление смещения траектории магматического очага было с ЮЗ на СВ. Для кольцевой структуры № 2 с СЗ на ЮВ. Для кольцевой структуры № 3 – с СВ на ЮЗ (рис. 3, а).

По расчетам (Ваганов и др., 1985, Аэрокомические..., 2000) для Щучинского палеовулкана можно заключить, что основная магматическая камера располагалась на глубине 30 км (или ниже?) – в нижних частях земной коры. Для кольцевых структур № 1, 2 и 3 промежуточные камеры располагались на глубинах примерно 18, 6 и 8 км,

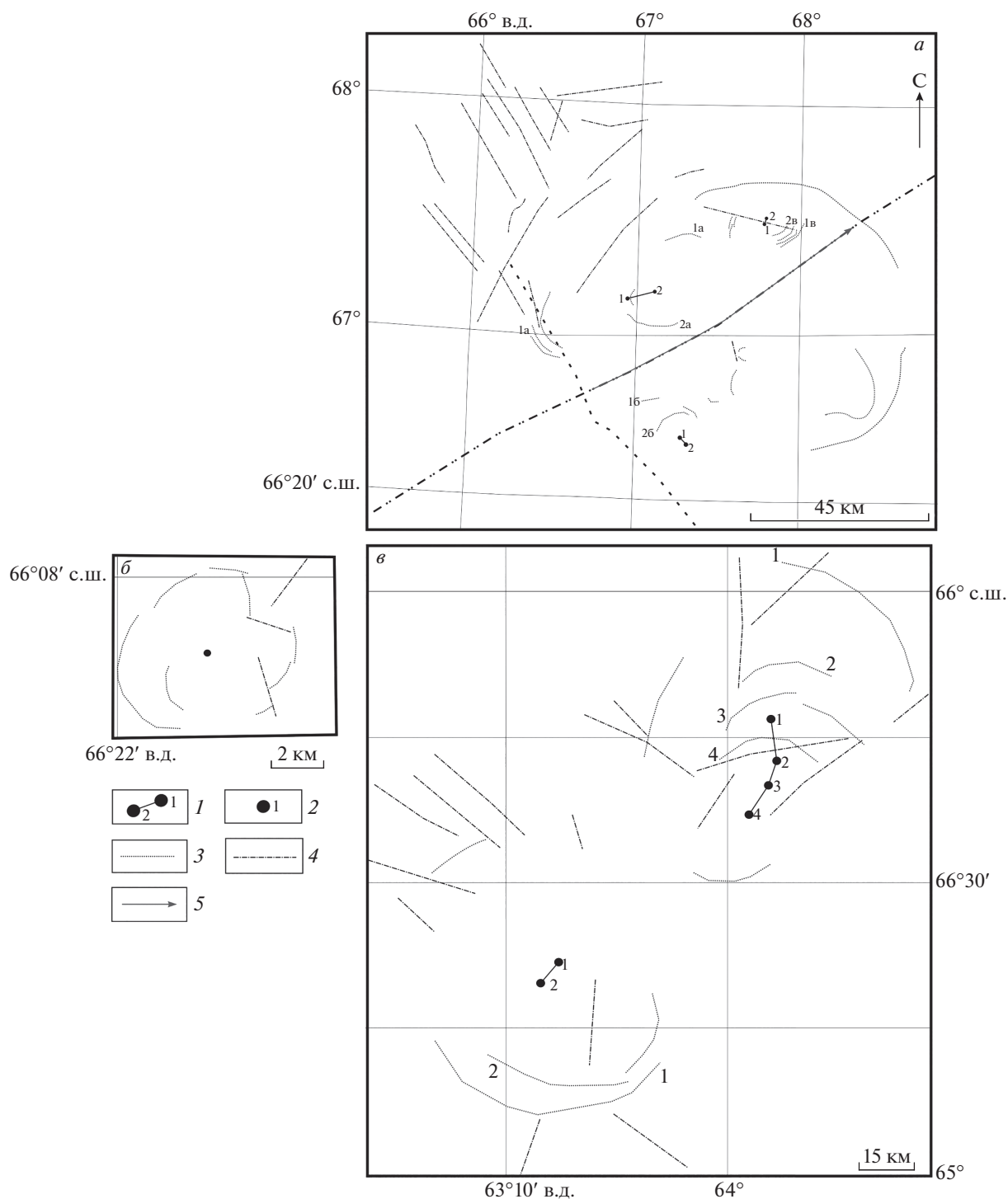


Рис. 3. Морфометрические модели кольцевых структур № 1–3 Щучинской зоны (а), Новогодненского рудного поля (б) и морфоструктур № 1 и № 2 ЦЧМЗ (в): 1 – проекция на дневную поверхность траектории изменения положения магматического очага для Щучинской зоны (а) ЦЧМЗ (в); 2 – центры кольцевых структур и их номера; 3 – основные кольцевые структуры и их номера, 1, а, 1, б, 1, в – кольцевые структуры № 1, 2, 3 Щучинской зоны (а); 4 – главные линейменты; 5 – вероятное направление перемещения основного магматического очага Щучинского палеовулкана (а).

Примечание: для Новогодненской структуры глубина центра составляет 4 км (рис. 3б) и отвечает малоглубинному очагу, с которым было связано рудообразование на Петропавловском месторождении (Иванова и др., 2019). Полученные данные не противостоят результатам (Соболев и др., 2018). Так, рассчитанные по геобарометрам (Johnson, Ruth-erford, 1989; Ridolfi et al., 2010) давления, отвечающие условиям кристаллизации роговой обманки, свидетельствуют о формировании пород конгорского и собского интрузивных комплексов в относительно малоглубинных условиях (4–12 и 8–14 км соответственно). Магматические очаги морфоструктур № 1 и № 2 ЦЧМЗ располагались на глубинах 12 и 16 км (средняя и нижняя части земной коры) (Иванова и др., 2020) (в).

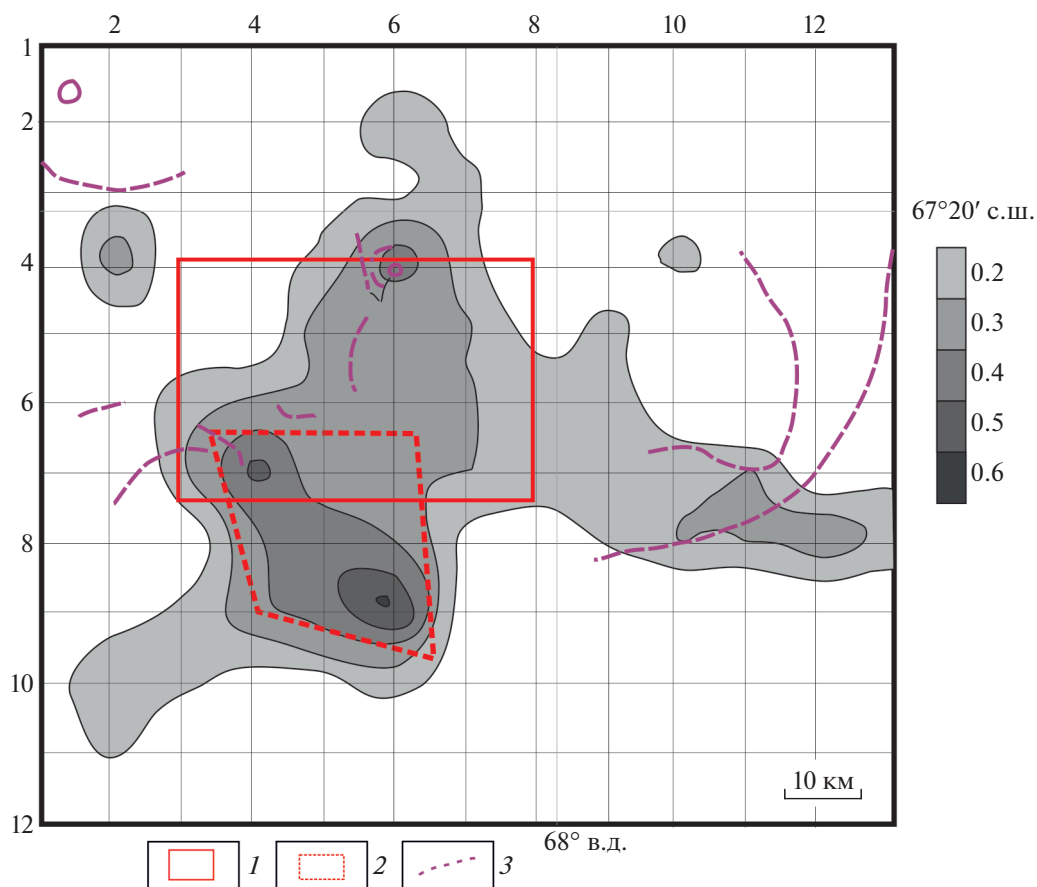


Рис. 4. Прогнозная карта на золото-медно-порфировый тип оруденения: 1 – границы Юньягинского рудного поля, 2 – рекомендуемый участок для прогнозных работ; 3 – линеаменты, вынесенные с рис. 3, а. Градацией серого цвета показаны рискованные зоны. Горизонтальные и вертикальные линии – сетка, где по горизонтали изображены профили, по вертикали – линии.

соответственно, что отвечает средней и верхней частям земной коры.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗОЛОТО-МЕДНО-ПОРФИРОВОГО ТИПА МИНЕРАЛИЗАЦИИ В ПРЕДЕЛАХ ЩУЧЬИНСКОЙ ЗОНЫ

В работе (Иванова, Бочнева, 2016) на основе разработанной методики прогнозирования оруденения для Щучьинской зоны (Юньягинское рудное поле и прилегающая территория) приведена прогнозная карта для золото-медно-порфировой минерализации с указанием на ней рискованных зон и линеаментов (совмещение прогнозной и морфоструктурных карт) (рис. 4), где рискованные зоны – это различные уровни вероятности обнаружения оруденения. По мере увеличения насыщенности цветов возрастает степень уверенности в прогнозе золото-медно-порфировой минерализации, т.е. вероятности обнаружения оруденения.

Зона с наибольшим значением прогноза образует компактную область, расположенную в юго-западной части исследуемой территории, чуть

ниже Юньягинского рудного поля и составляет небольшую площадь $\sim 101 \text{ км}^2$.

В пределах рекомендуемой области необходимы дальнейшие крупномасштабные (в т.ч. полевые) работы, которые рекомендуется проводить совместно с геофизическими и геохимическими исследованиями.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИЙ

Мы сравнили морфоструктурные карты Щучьинской зоны, Собь-Харбейской площади, Топугул-Ханмейшорского рудного района и ЦЧМЗ для выявления схожих структурных особенностей локализации золотого оруденения и разработки прогнозно-поисковых признаков на данный тип оруденения.

Территории имеют следующие сходства:

1. На площадях присутствуют тектоно-магматические образования сложной природы и длительной эволюции.

2. Внутреннее строение кольцевых морфоструктур 1-го порядка осложняется радиальными разломами разного ранга СЗ и СВ направления, субширотными нарушениями, которые секут концентрические и (или) дуговые линеаменты 2-го и 3-го ранга, а также зонами концентрации мелких кольцевых структур.

3. Рудная минерализация принадлежит центрам кольцевых структур 2-го порядка (диаметр от 10 км и более) и периферии внутренних частей крупных кольцевых структур 1-го порядка (диаметром более 50 км) сложного строения с признаками телескопированности совместно с участками сгущения линеаментов СЗ и/или СВ, а также субширотного направлений в пределах региональных разломных зон протяженностью до сотен км.

4. Интрузивные образования представлены многофазными и разновозрастными комплексами, с которыми связана минерализация.

Различия:

1. Новогодненская морфоструктура (6×10 км), а также кольцевые и дуговые структуры Сось-Харбейской площади (до 5 км) имеют меньший диаметр, чем морфоструктуры ЦЧМЗ (54×44 км и 48×38 км) и Щучинской зоны (90×95 км).

2. Кольцевые и дуговые структуры Сось-Харбейской площади (до 10 км) и Тоупугол-Ханмейшорского рудного района (до 20 км) сопровождаются менее протяженными радиальными линеамен- тами, чем морфоструктуры № 1 и 2 ЦЧМЗ (до 50 км).

3. Новогодненская морфоструктура — вул- ка-но-плутоническая моногенная структура 2-го по- рядка — вероятно, образованная под влиянием одного ведущего геологического процесса, тогда как Щучинская зона и морфоструктуры ЦЧМЗ — кольцевые структуры 1-го порядка, которые фор- мировались в периоды тектонической активиза- ции, сопровождавшей импульсами магматической деятельности ниже- и среднекоровых очагов.

4. Изучаемые концентрические структуры от- личаются морфологией, характером магматизма, типом металлогенической зональности внутри структур за счет индивидуальных особенностей рудоносности отдельных блоковых структур и влияния секущих, специализированных линеа- ментных зон различной ориентировки.

7. Щучинская зона отличается разнообразием рудной минерализации по сравнению с другими территориями, возможно, из-за наличия протя- женной до 145 км Ханмей-Сибилейской зоны, определяющей размещение минерализации.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в результате анализа изобра- жений КА Landsat 8 территорий восточного скло- на Полярного Урала в сочетании с комплексным

подходом установлено, что золоторудная минера- лизация северного сегмента Урала приурочена к сложно построенной системе кольцевых, дуговых и радиальных структур. Представляется, что пер- востепенное значение в рудолокализации играли крупные кольцевые морфоструктуры, реконстру- ированные в качестве корневых частей длительно развивавшихся стратовулканов с глубокофокус- ными (Щучинская зона, ЦЧМЗ) и относительно мелкофокусными (Новогодненское рудное поле, Сось-Харбейская площадь) магматическими оча- гами.

На основании результатов, полученных в ходе исследования 4 площадей, можно сделать вывод, что золоторудную гидротермальную минерализа- цию на севере восточного склона Урала следует искать в концентрах кольцевых структур 2-го по- рядка (диаметр от 10 км и более) в ассоциации с субвулканическими телами кварцевых диори- тов/гранодиоритов и на периферии внутренней части крупных кольцевых структур 1-го порядка (диаметром более 50 км) сложного строения с признаками телескопированности, связанных с интрузивными образованиями, представленны- ми диоритами, кварцевыми монцодиоритами, гранодиоритами заключительной фазы внедре- ния. Минерализация должна быть локализована совместно с участками сгущения линеаментов СЗ, СВ и/или субширотного направлений и в пределах региональных разломных зон протя- женностью до сотен км. Оруденение формируется на заключительной стадии развития вулкани- ческих сооружений.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Авторы выражают благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований (грант № 20-35-70060) за финансовую поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьев Ю.С., Поцелуев А.А., Житков В.Г. Космострук- турные модели золоторудных объектов Западной Кал- бы // Изв. Томского политех. ун-а. 2010. Т. 317. № 1. С. 35–42.
- Аэрокосмические методы геологических исследований / Под ред. А.В. Перцова. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 316 с.
- Бутаков К.В., Гандулкадыров М.М., Шамсутдинова Р.Р. Оценочные работы на золотое оруденение в пределах Тоупугол-Ханмейшорской площади. Отчет о результа- тах работ за 2010–2012 гг. Результаты оценочных работ в пределах Тоупугол-Ханмейшорской площади. Ла- бытнанги, 2012. 126 с.
- Ваганов В.И., Иванкин П.Ф., Кропоткин П.Н. и др. Взрывные кольцевые структуры щитов и платформ. М.: Наука, 1985. 200 с.
- Викентьев И.В., Мансуров Р.Х., Иванова Ю.Н. и др. Зо- лото-порфировое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минерало- гия и условия образования // Геол. руд. местор. 2017. Т. 59. № 6. С. 501–541.

- Волчков А.Г., Кряжев С.Г. Вещественный состав, условия локализации и формирования золотого оруденения Новогодненского рудного поля. Тоупугол-Ханмейшорская площадь, Полярный Урал. Отчет по договору № 6д. М.: ЦНИГРИ, 2005.
- Галиуллин И.З., Перминов И.Г., Коновалов Ю.И. и др. Специализированные геохимические поиски на благородные и редкие металлы в пределах Западно-Харьбейской площади за 2004–2005 гг., Лабытнанги, 2005.
- Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А. Особенности минералогической зональности рудно-магматических систем, вмещающих кварцево-жильные месторождения золота (по материалам спутниковой спектроскопии) // Соврем. пробл. дистан. зондир. Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 140–156.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (3-е поколение). Уральская серия. Лист Q-41 – Воркута. Объясн. зап. СПб: ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.
- Гурская Л.И., Смелова Л.В. Платинометальное минералообразование и строение массива Сыум-Кеу (Полярный Урал) // Геол. руд. местор. 2003. Т. 45. № 4. С. 353–371.
- Дьяконов В.В. Фанерозойские палеовулканические сооружения и рудная минерализация медно-молибден-порфирового типа // Дис. док. геол.-мин. наук. Москва: РУДН, 2011, 289 с.
- Зылева Л.И., Коновалов А.Л., Казак А.П. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (3-е поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-42 – Салехард: Объясн. зап. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 396 с.
- Калмыков Б.А., Трусев А.А. Особенности внутреннего строения палеозойских комплексов Шучинского синклиория Полярного Урала по аэрогеофизическим данным // Разведка и охрана недр. 2015. С. 57–64.
- Кениг В.В., Бутаков К.В. Месторождения рудного золота Новогоднее-Монто и Петропавловское – новый золоторудный район на Полярном Урале // Разведка и охрана недр. 2013. № 11. С. 22–24.
- Космическая информация в геологии / Под ред. А.В. Пейве. М.: Наука, 1983. 536 с.
- Кременецкий А.А. Обоснование поисковых и поисково-ревизионных работ на рудное золото в пределах Манюкуно-Варчатинского рудного узла (рудопоявления: Полярная Надежда, Геохимическое и Благодарное). Масштаб 1 : 10000. М.: ФГУП ИМГРЭ, 2012. 45 с.
- Кузнецов Н.Б., Удоратина О.В., Андреичев В.Л. Палеозойское изотопное омоложение комплексов доуралид и проблема эволюции восточной окраины восточно-европейского континента в палеозое // Вест. Ворон. гос. ун-а. Сер.: Геология. 2000. № 9. С. 15–19.
- Иванова Ю.Н., Бочнева А.А. Прогнозирование перспективных площадей на золото-медно-порфировый тип оруденения на основе анализа поисковых признаков и их функциональных и корреляционных взаимосвязей // Геоинформатика. 2016. № 2. С. 41–50.
- Иванова Ю.Н., Выхристенко Р.И., Викентьев И.В. Геологическая позиция и структурный контроль оруденения Тоупугол-Ханмейшорского района (Полярный Урал) по результатам дистанционного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 3. С. 66–76.
- Иванова Ю.Н., Выхристенко Р.И., Викентьев И.В. Структурный контроль золоторудной минерализации центральной части Малоуральского вулканоплутонического пояса (Полярный Урал) по результатам анали-
- за мультиспектральных снимков космического аппарата Landsat 8 // Исслед. Земли из космоса. 2020. № 4. С. 51–62.
- Миловский Г.А., Денисова Е.А., Ежов А.А., Каленкович Н.С. Прогнозирование оруденения на Собь-Харьбейской площади (Полярный Урал) по космогеологическим данным // Исслед. Земли из космоса. 2007. № 6. С. 29–36.
- Перминов И.Г., Григорьев В.В., Козлитин В.И. и др. Прогнозно-поисковые работы на рудное золото в пределах Собь-Харьбейской площади (ЯНАО). Отчет по работам 2006–2009 гг. согласно госконтракту № 111-143/1. Полярно-Уральское ГПП. 2009. Лабытнанги.
- Поцелуев А.А., Бабкин Д.И., Котегов В.И. Калгутинское комплексное месторождение (Горный Алтай): минералого-геохимическая характеристика, флюидный режим рудообразования // Геол. руд. местор. 2006. Т. 48. № 5. С. 439–459.
- Пучков В.Н., Иванов К.С. Тектоника севера Урала и Западной Сибири: общая история развития // Геотектоника. 2020. № 1. С. 41–61.
- Прямоносоев А.П., Степанов А.Е., Телегина Т.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000 (2-е изд.). Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-XII. Объясн. зап. Салехард: Комитет природных ресурсов по ЯНАО, 2001. 231 с.
- Ремизов Д.Н., Шишкин М.А., Григорьев С.И. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200 000 (2-е изд., циф.). Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-XVI (г. Хордьюс). Объясн. зап. СПб: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2014. 256 с.
- Селюкова Т.Н., Галиуллин И.З., Ивановская Г.П. и др. Отчет о поисковых работах на золото вдоль трассы Обская-Бованенково. Отчет Харьбейского отряда за 1996–1999 гг., п. Полярный, Полярно-Уральское государственное геологическое предприятие, 1999.
- Соболев И.Д., Соболева А.А., Удоратина О.В. и др. Девонский островодужный магматизм Войкарской зоны Полярного Урала // Геотектоника. 2018. № 5. С. 39–74.
- Соболев И.Д., Шадрин А.Н., Расторгуев В.А., Козырева Д.А. Раннеостроводужные гранитоиды Шучинской зоны Полярного Урала (результаты U-Pb (Sims) датирования цирконов) // Вест. Моск. ун-а. Сер. 4: Геология. 2017. Вып. 1. С. 22–32.
- Томпсон И.Н., Кочнева Н.Т., Кравцов В.С., Середин В.В., Селиверстова В.А., Хорошилов Л.В. Металлогения скрытых линейментов и концентрических структур // М.: Недра, 1984. 272 с.
- Черняев Е.В., Черняева Е.И., Седельникова А.Ю. Геология золото-скарнового месторождения Новогоднее-Монто (Полярный Урал) // Скарны, их генезис и рудоносность (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...). Мат. конф. XI Чтения А.Н. Заварицкого. Екатеринбург: ИГиГ УрО РАН, 2005. С. 131–137.
- Шишкин В.А., Астапов А.П., Кабатов Н.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Уральская. Лист Q-41 – Воркута. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.
- Язева Р.Г., Бочкарев В.В. Войкарский вулканоплутонический пояс (Полярный Урал). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. 156 с.
- Amer R., Kusky T., El Mezayen A. Remote sensing detection of gold related alteration zones of Um Rus Area, Central Eastern Desert of Egypt // Adv. Space Res. 2012. V. 49. P. 121–134.

- Andreichev V.L., Kulikova K.V., Larionov A.N., Sergeev S.A. Age of island-arc granites in the Shchuch'ya zone, Polar Urals: first U–Pb (SIMS) results // *Doklady Earth Sciences*. 2017. T. 477. № 1. P. 1260–1264.
- Bohlmann U.M., Koller V.F. ESA and the Arctic – The European Space Agency's contributions to a sustainable Arctic // *Acta Astronautica*. 2020. V. 176. P. 33–39.
- Cong Y., Dong Q., Bagas L., Xiao K., Wang K. Integrated GIS-based modelling for the quantitative prediction of magmatic Ti–V–Fe deposits: A case study in the Panzhihua-Xichang area of southwest China // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 91. P. 1102–1118.
- Di Tommaso I., Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina // *Ore Geol. Rev.* 2007. V. 32. P. 275–290.
- Estrada S., Henjes-Kunst F., Burgath K.P., Roland N.W., Schäfer F., Khain E.V., Remizov D.N. Insights into the magmatic and geotectonic history of the Voikar massif, Polar Urals // *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*. 2012. V. 163. № 1. P. 9–42.
- Graham G.E., Kokaly R.F., Kelley K.D. et al. Application of imaging spectroscopy for mineral exploration in Alaska: a study over porphyry Cu deposits in the Eastern Alaska Range // *Econ. Geol.* 2018. V. 113(2). P. 489–510.
- Johnson M.C., Rutherford M.J. Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks // *Geol.* 1989. V. 17. № 9. P. 837–841.
- Lindagato P., Li Yon., Yang G., Duan F., Wang Z. Application of geostatistical analyst methods in discovering concealed gold and pathfinder elements as geochemical anomalies related to ore mineralization // *Geologos*. 2018. V. 24. Is. 2. P. 95–109.
- Pour B.A., Hashim M. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits // *Ore Geol. Rev.* 2012. V. 44. P. 1–9.
- Pour B.A., Hashim M. The Earth Observing-1 (EO-1) satellite data for geological mapping, southeastern segment of the Central Iranian Volcanic Belt, Iran // *Int. J. Physical Scie.* 2011. V. 6(33). P. 7638–7650.
- Ridolfi F., Renzulli A., Puerini M. Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes // *Contrib. Mineral. Petrol.* 2010. V. 160. № 1. P. 45–66.
- Sarapää O., Sarala P. Rare earth element and gold exploration in glaciated terrain: example from the Mäkära area, northern Finland // *Geochem. Explor. Environ. and Anal.* 2013. V. 13(2). P. 131–143.
- Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Dyurechenskaya S.S. Geology, mineralization, stable isotope geochemistry, and fluid inclusion characteristics of the Novogodnee-Monto oxidized Au–(Cu) skarn and porphyry deposit, Polar Ural, Russia // *Miner Deposita*. 2013. 48(5). P. 603–627.
- Vaughan R.G., Hook S.J., Calvin W.M., Taranik J.V. Surface mineral mapping at Steamboat Springs, Nevada, USA, with multi-wavelength thermal infrared images // *Rem. Sens Environ.* 2005. V. 99. P. 140–158.
- Velosky J.C., Stern R.J., Johnson P.R. Geological control of massive sulfide mineralization in the Neoproterozoic Wadi Bidah shear zone, southwestern Saudi Arabia, inferences from orbital remote sensing and field studies // *Precambrian Res.* 2003. 123(2–4). P. 235–247.
- Wang G., Chen J. Mineral resource prediction and assessment of copper multi-mineral deposit based on GIS technology in the north of Sanjiang region China // *Earth Science Frontiers*. 2008. V. 15. Is. 4. P. 27–32.
- Wang J., Zhou Y., Xiao F. Identification of multi-element geochemical anomalies using unsupervised machine learning algorithms: A case study from Ag–Pb–Zn deposits in northwestern Zhejiang China // *Appl. Geochem.* 2020. V. 120. Article 104679.
- Xinmina M. China's Arctic policy on the basis of international law: Identification, goals, principles and positions // *Marine Policy*. 2019. № 100. P. 265–276.
- Xiong F., Robinson B.Z.P.T. Xiangzhen J.Y., Meng X.F. Genesis of the Ray-Iz chromitite, Polar Urals: Inferences to mantle conditions and recycling processes // *Lithos*. 2020. V. 374–375. Research Article.
- Zhang M., Zhou G., Shen L., Zhao W., Wang C. Comparison of 3D prospectivity modeling methods for Fe–Cu skarn deposits: A case study of the Zhuchong Fe–Cu deposit in the Yueshan orefield (Anhui), eastern China // *Ore Geol. Rev.* 2019. V. 114. Article 103126.
- Zhang X., Panzer M., Duke N. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) // *J. Photogram. and Rem. Sens.* 2007. V. 62. P. 271–282.

Structural Control of Gold Ore Mineralization of the Eastern Slope of the Polar Urals (Russia) Based on the Analysis of Multispectral Images of Spacecraft the Landsat 8

J. N. Ivanova^{1, 2} and R. I. Vyhristenko¹

¹*Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Peoples' Friendship University of Russia, Moscow, Russia*

We analysed the territories of the eastern slope of the Polar Urals, promising for the identification of gold mineralization based on the materials of the multispectral satellite imagery of the Landsat 8 spacecraft: Yunyaginskoe ore field (Shchuchinskaya zone), Toupugol-Khanmeyshorsky ore region, and Manyukuyu-Vorchatinsky ore cluster (central part of the Malouralskaya zona). It was compared with these areas, which revealed similar features as regards geological structure and the location of deposits and ore occurrences in the system of morphological structures. This will help to identify predictive features (geological, morphological) for gold-bearing ore mineralization. The identification of these features in underexplored parts of the eastern slope of the Polar Urals would aid mineral exploration in this remote region. In general, prospecting for gold ore hydrothermal mineralization in the north of the eastern slope of the Polar Urals should be carried out in centers of second-order ring structures (10 km and more in diameter) in association with subvolcanic bodies of quartz diorites/granodiorites, and on the periphery of the inner part of large ring structures of the

first order (more than 50 km in diameter) of a complex structure with signs of “telescoping” associated with intrusive formations, represented by diorites, quartz monzodiorites, and granodiorites of the final phase of intrusion. Mineralization should be localized together with areas of thickening lineaments in NW, NE and/or sublatitudinal directions and within regional fault zones up to hundreds of kilometers in length. Mineralization is formed in the final development stage of volcanic structures.

Keywords: multispectral satellite images, gold deposits, lineaments, morphostructural, tectono-volcanic reconstruction, the Polar Urals, Landsat 8

REFERENCES

- Aerospace methods of geological research / Ed. A.V. Pertsov, St. Petersburg: VSEGEI, 2000. 316 p. (In Russian).
- Amer R., Kusky T., El Mezayen A. Remote sensing detection of gold related alteration zones of Um Rus Area, Central Eastern Desert of Egypt // *Adv. Space Res.* 2012. V. 49. P. 121–134.
- Anan'yev Yu.S., Potseluyev A.A., Zhitkov V.G. Cosmostructural models of gold deposits at the Zapadnaya Kalba // *Izv. Tomsk. Politekh. Univ.* 2010. V. 317. № 1. P. 35–42. (In Russian)
- Andreichev V.L., Kulikova K.V., Larionov A.N., Sergeev S.A. Age of island-arc granites in the Shchuch'ya zone, Polar Urals: first U–Pb (SIMS) results // *Doklady Earth Sciences*. 2017. T. 477. № 1. P. 1260–1264.
- Bohlmann U.M., Koller V.F. ESA and the Arctic – The European Space Agency's contributions to a sustainable Arctic // *Acta Astronautica*. 2020. V. 176. P. 33–39.
- Butakov, K.V., Gapdulkadyrov, M.M., Shamsutdinova, R.R. Appraisals on Gold Mineralization in the Toupugol–Khanmeishor Area. Report on the Results of Activities for 2010–2012. Results of Appraisals in the Toupugol–Khanmeishor Area, Labytnangi, 2012. (In Russian).
- Chernyaev E.V., Chernyaeva E.I., Sedel'nikova A.Yu. Geology of the gold-skarn deposit the Novogodnee-Monto (the Polar Urals) // *Genesis and Ore Content of Skarns: Proceedings of the XI Conference A.N. Zavaritskii Readings (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...)*, Ekaterinburg: IGIG UrO RAN, 2005. P. 131–137. (In Russian)
- Cong Y., Dong Q., Bagas L., Xiao K., Wang K. Integrated GIS-based modelling for the quantitative prediction of magmatic Ti–V–Fe deposits: A case study in the Panzhihua-Xichang area of southwest China // *Ore Geol. Rev.* 2017. V. 91. P. 1102–1118.
- Di Tommaso I., Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina // *Ore Geol. Rev.* 2007. V. 32. P. 275–290.
- Dyakonov V.V. Phanerozoic paleovolcanic structures and ore mineralization of copper-molybdenum-porphyry type // *Dis. of doctor of geol.-min. sciences*. Moscow: RUDN, 2011, 289 p. (in Russia)
- Estrada S., Henjes-Kunst F., Burgath K.P., Roland N.W., Schäfer F., Khain E.V., Remizov D.N. Insights into the magmatic and geotectonic history of the Voikar massif, Polar Urals // *Zeitschrift der Deutschen Geologischen. Gesellschaft*. 2012. V. 163. № 1. P. 9–42.
- Galiullin I.Z., Perminov I.G., Konovalov Yu.I., and et al. Report on the results of works on completion of the object: “Specialized geochemical prospecting for noble and rare metals in within the West Harbeyskaya area Labytnangi”, 2005.
- Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A. Features of the mineralogical zoning of ore-magmatic systems that containing quartz-vein gold deposits (based on satellite spectrometry) // *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Kosmosa*. 2014. V. 11. № 3. P. 140–156 (In Russian)
- Graham G.E., Kokaly R.F., Kelley K.D., and et al. Application of imaging spectroscopy for mineral exploration in Alaska: a study over porphyry Cu deposits in the Eastern Alaska Range // *Econ. Geol.* 2018. V. 113(2). P. 489–510.
- Gurskaya L.I., Smelova L.V. PGE mineral formation and the structure of the Syum-Keu massif (Polar Urals) // *Geol. of Ore Dep.* 2003. V. 45. № 4. P. 309–325.
- Ivanova J.N., Bochneva A.A. Prediction of prospective areas of gold-copper-porphyry mineralization based on the analysis of prediction features and their functional and correlation relationships // *Geoinformatika*. 2016. № 2. P. 41–50 (In Russian).
- Ivanova J.N., Vyhristenko R.I., Vikentiev I.V. Geological position and structural control of ore mineralization in the Toupugol-Khanmeyshorsky district (the Polar Urals) based on the remote sensing results // *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. V. 55. № 9. P. 1379–1388.
- Ivanova J.N., Vyhristenko R.I., Vikentiev I.V. Structural control of gold mineralization in the central part of the Malouralskiy volcano-plutonic belt (Polar Urals) based on the analysis of multispectral images of the Landsat 8 spacecraft // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, 2020. № 4. P. 51–62.
- Johnson M.C., Rutherford M.J. Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks // *Geol.* 1989. V. 17. № 9. P. 837–841.
- Kalmykov B.A., Trusov A.A. Special features of internal structure of paleozoic complexes of Shuchenskiy synclinorium in Polar Urals With the help of airborne geophysical data // *Razvedka i okhrana neдр.* 2015. P. 57–64. (In Russian)
- Kenig V.V., Butakov K.V. Ore gold deposits the Novogodnee-Monto and the Petropavlovskoye are a new gold ore region in the Polar Urals // *Razvedka i okhrana neдр.* 2013. № 11. P. 22–24. (In Russian)
- Kremenetsky A.A. Justification of search and prediction and audit works on gold within the Manukuyu-Varchatinsky ore cluster (the Polyarnaya Nadezhda, the Geokhimicheskoe, and the Blagodatnoye ore occurrence). Scale 1 : 10000. Moscow: FSUC IMGRE. 2012. 45 p. (in Russian)
- Kuznetsov N.B., Udoratina O.V., Andreichev V.L. Paleozoic isotope rejuvenation of the pre-Uralide complexes and the problem of the Paleozoic evolution of the eastern margin of the East European continent, Vestn. Voronezh. Gos. Univ., Ser. Geol. 2000. № 3(9). P. 15–19. (in Russian)
- Lindagato P., Li Yon., Yang G., Duan F., Wang Z. Application of geostatistical analyst methods in discovering concealed gold and pathnder elements as geochemical anomalies related to ore mineralization // *Geologos*. 2018. V. 24. Is. 2. P. 95–109.
- Milovsky G.A., Denisova E.A., Yezhov A.A., Kalenkovich N.S. Asting mineralization in the Sob'-Kharbey area (the Polar Urals) from Geospatial data // *The study of the Earth from space*. 2007. № 6. P. 29–36. (In Russian)

- Mineragenic potential of the subsoil of Russia. Is. 2: The Ural nappe-fold area: 3 v. V. 1: the Polar and the Northern Urals. Moscow: GEOKART: GEOS. 2013, 484 p. (In Russian)
- Perminov I.G., Grigoriev V.V., Kozlitin V.I.* et al. Prospecting and prospecting works for ore gold within the Sob-Kharbeyskaya area (YaNAO). Report on works 2006–2009 according to the State Contract No. 111–143 // Labytnangi, the Polar-Ural State Geological Enterprise, 2009. (In Russian)
- Potseluev A.A., Babkin D.I., Kotegov V.I.* The Kalguty complex deposit, the Gorny Altai: Mineralogical and geochemical characteristics and fluid regime of ore formation // Geol. of Ore Dep. 2006. V. 48. № 5. P. 384–401.
- Pour B.A., Hashim M.* The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. Ore Geol. Rev. 2012. V. 44. P. 1–9.
- Pour B.A., Hashim M.* The Earth Observing-1 (EO-1) satellite data for geological mapping, southeastern segment of the Central Iranian Volcanic Belt, Iran // Int. J. Physical Scie. 2011. V. 6(33). P. 7638–7650.
- Pryamonosov A.P., Stepanov A.E.* et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 200000 (second edition). The Polar Ural series. Q-41-XII Sheet. Explanatory note. Salekhard: natural resources committee for the Yamalo-Nenets autonomous district. 2001. 231 p. (In Russian)
- Puchkov V.N., Ivanov K.S.* Tectonics of the Northern Urals and Western Siberia: General History of Development // Geotectonics. 2020. V. 54. № 1. P. 35–53.
- Remizov D.N., Shishkin M.A., Grigoriev S.I., Stepunin A.V.* et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 200,000 (second edition, digital). The Polar-Ural series. Sheet Q-41-XVI (Khordyus). Explanatory letter. Saint Petersburg: Cartographic factory VSEGEI. 2014, 256 p. (In Russian)
- Ridolfi F., Renzulli A., Puerini M.* Stability and chemical equilibrium of amphibole in calc-alkaline magmas: an overview, new thermobarometric formulations and application to subduction-related volcanoes // Contrib. Mineral. Petrol. 2010. V. 160. № 1. P. 45–66.
- Sarapää O., Sarala P.* Rare earth element and gold exploration in glaciated terrain: example from the Mäkära area, northern Finland // Geochem: Explor. Environ. and Anal. 2013. V. 13(2). P. 131–143.
- Selyukova T.N., Galiullin I.Z., Ivanovskaya G.P.,* and et al. Report on prospecting works for gold along the Obskaya – Bovanenkovo highway. Harbei Detachment Report 1996–1999 biennium Pos. Polyarny, Polar-Ural State Geological Enterprise, 1999. (In Russian)
- Shishkin M.A., Astapov A.P., Kabatov N.V.* et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (third generation). The Ural series. Q41 – Vorkuta sheet: Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI. 2007. 541 p. (In Russian)
- Sobolev I.D., Shadrin A.N., Rastorguev V.A., Kozyreva D.A.* Early island-arc granitoids of THE Shchuchinskaya Zone of the Polar Urals: U–PB (SIMS) zircon isotope data // Moscow University Geology Bulletin. 2017. V. 72. № 2. P. 115–125.
- Sobolev I.D., Soboleva A.A., Udoratina O.V.,* and et al. Devonian island-arc magmatism of the Voikar zone in the Polar Urals // Geotectonics. 2018. V. 52. № 5. P. 531–563.
- Soloviev S.G., Kryazhev S.G., Dvurechenskaya S.S.* Geology, mineralization, stable isotope geochemistry, and fluid inclusion characteristics of the Novogodnee-Monto oxidized Au–(Cu) skarn and porphyry deposit, Polar Ural, Russia // Miner Deposita. 2013. V. 48(5). P. 603–627.
- Space information in geology / Ed. A.V. Peive. Moscow: Nauka, 1983. 536 p. (In Russian)
- State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (3rd generation). Ural Series. Sheet Q-41 – Vorkuta. Explanatory note. St. Petersburg: VSEGEI. 2007, 541 p. (In Russian)
- Thompson I.N., Kochneva N.T., Kravtsov V.S., Seredin V.V., Seliverstova V.A., Khoroshilov L.V.* Metallogeny of hidden lineaments and concentric structures. Moscow: Nedra, 1984, 272 p. (In Russian)
- Vaganov V.I., Ivankin P.F., Kropotkin P.N.* et al. Explosive ring structures of shields and platforms. M.: Nauka. 1985, 200 p. (In Russian)
- Vaughan R.G., Hook S.J., Calvin W.M., Taranik J.V.* Surface mineral mapping at Steamboat Springs, Nevada, USA, with multi-wavelength thermal infrared images // Rem. Sens Environ. 2005. V. 99. P. 140–158.
- Velosky J.C., Stern R.J., Johnson P.R.* Geological control of massive sulfide mineralization in the Neoproterozoic Wadi Bidah shear zone, southwestern Saudi Arabia, inferences from orbital remote sensing and field studies // Precambrian Res. 2003. V. 123(2–4). P. 235–247.
- Vikentyev I.V., Ivanova Y.N., Tyukova E.E.* et al. Porphyry-Style Petropavlovskoe Gold Deposit, the Polar Urals: Geological Position, Mineralogy, and Formation Conditions // Geol. Ore Dep. 2017. V. 59(6). P. 482–520.
- Volchkov A.G., Kryazhev S.G.* Species composition, localization and formation conditions of gold mineralization in the Novogodnensky ore field, Toupugol–Khanmeishor area, Polar Urals. Contract report no. 6. 2005. 150 p. (In Russian)
- Wang G., Chen J.* Mineral resource prediction and assessment of copper multi-mineral deposit based on GIS technology in the north of Sanjiang region China // Earth Sci. Frontiers V. 15. Is. 4. 2008. P. 27–32.
- Wang J., Zhou Y., Xiao F.* Identification of multi-element geochemical anomalies using unsupervised machine learning algorithms: A case study from Ag–Pb–Zn deposits in northwestern Zhejiang China // Appl. Geochem. 2020. V. 120. Article 104679.
- Xinmina M.* China's Arctic policy on the basis of international law: Identification, goals, principles and positions // Marine Policy. 2019. № 100. P. 265–276.
- Xiong F., Robinson B.Z.P.T., Xiangzhen J.Y., Meng X.F.* Genesis of the Ray-Iz chromitite, Polar Urals: Inferences to mantle conditions and recycling processes // Lithos. 2020. V. 374–375. Research Article.
- Yazeva R.G., Bochkarev V.V.* Voikar volcano-plutonic belt (Polar Urals). Sverdlovsk: UC AN SSSR, 1984. 156 p. (In Russian).
- Zhang M., Zhou G., Shen L., Zhao W., Wang C.* Comparison of 3D prospectivity modeling methods for Fe–Cu skarn deposits: A case study of the Zhuchong Fe–Cu deposit in the Yueshan orefield (Anhui), eastern China // Ore Geol. Rev. 2019. V. 114. Article 103126.
- Zhang X., Panzer M., Duke N.* Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) // J. Photogram. and Rem. Sens. 2007. V. 62. P. 271–282.
- Zylova L.I., Kononov A.L., Kazak A.P.* et al. State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (third generation). Series West Siberian. Sheet Q-42 – Salekhard: Explanatory note. Saint-Petersburg: VSEGEI, 2014. 396 p. (In Russian)