

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

# СТРУКТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ ЗОЛОТОРУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ МАЛОУРАЛЬСКОГО ВУЛКАНО- ПЛУТОНИЧЕСКОГО ПОЯСА (ПОЛЯРНЫЙ УРАЛ) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНЫХ СНИМКОВ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА LANDSAT 8

© 2020 г. Ю. Н. Иванова<sup>a, b, \*</sup>, Р. И. Выхристенко<sup>a</sup>, И. В. Викентьев<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>b</sup>Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

\*E-mail: jnivanova@yandex.ru

Поступила в редакцию 08.01.2020 г.

Впервые для центральной части Малоуральского вулcano-плутонического пояса, включающего перспективный на выявление золоторудных месторождений Манюкую-Ворчатинский рудный узел, с помощью многоспектрональных космических снимков космического аппарата дистанционного зондирования Земли Landsat 8 было проведено дешифрирование, а также сопоставление этой территории с Тоупугол-Ханмейшорским рудным районом. Выявлены схожие закономерности геологического строения и размещения месторождений и рудопроявлений в системе морфоструктур, что поможет разработать прогнозно-поисковые признаки (геологические, морфологические) золоторудной минерализации. В результате дешифрирования космических снимков были выделены три структуры: Новогодненская структура (Тоупугол-Ханмейшорский рудный район) представляет собой моногенную структуру, образованную под влиянием одного ведущего геологического процесса, тогда как морфоструктуры № 1 и № 2 (центральная часть Малоуральского вулcano-плутонического пояса) – более крупные, со сложным строением, длительным и многоэтапным развитием. Для морфоструктур № 1 и № 2 были оценены глубины образования магматических очагов, составляющие ~12 км и ~16 км, соответственно. Тектоновулканическая реконструкция обнаружила, что корневые (очаговые) части морфоструктур № 1 и № 2 погружались в ходе развития магматического процесса на юг и затем на ЮЗ, соответственно. Поиски золоторудной гидротермальной минерализации на севере восточного склона Полярного Урала следует проводить на периферии центров крупных морфоструктур сложного строения и длительного развития с признаками “телескопированности”, локализованных в участках сгущения линеаментов СЗ и/или СВ направлений и в пределах разломных региональных зон протяженностью до сотен км.

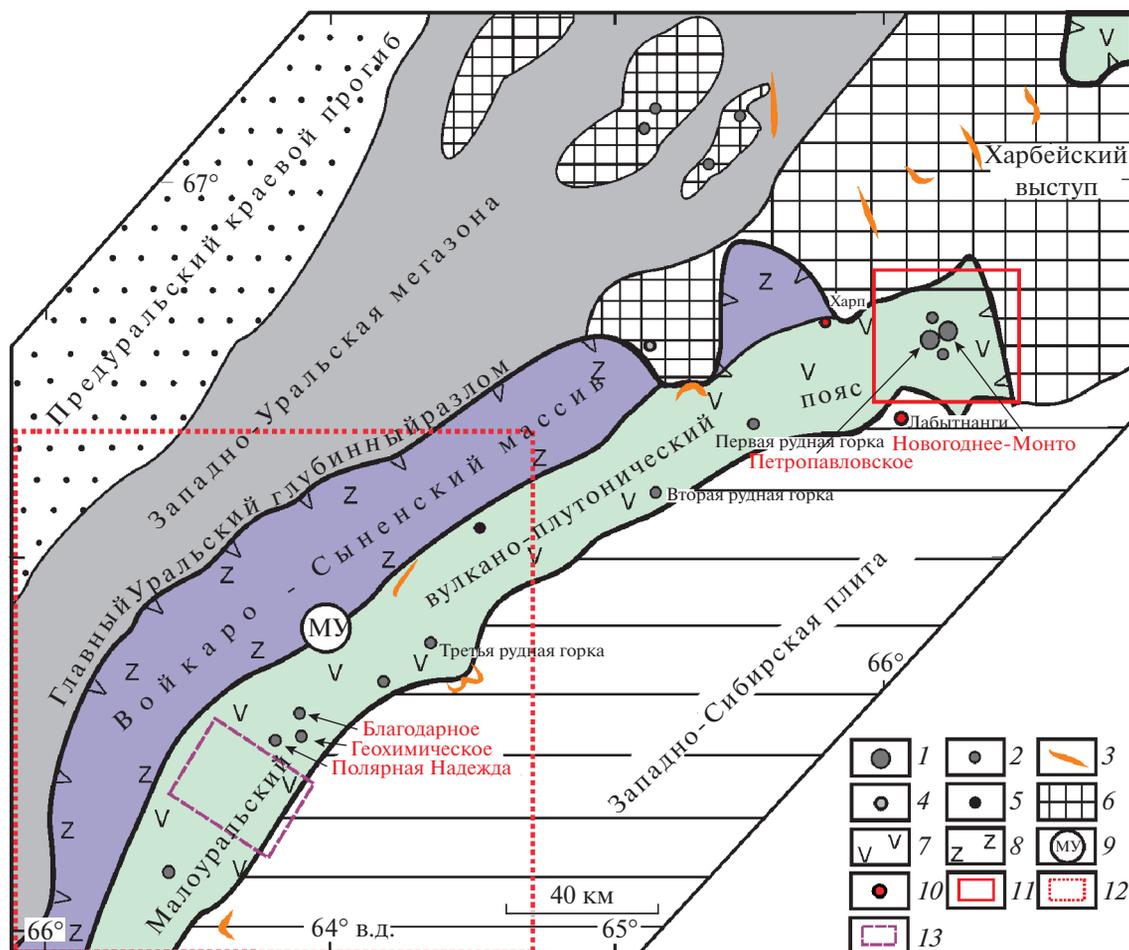
**Ключевые слова:** многозональные космические снимки, золоторудная минерализация, дешифрирование, линеаменты, тектоновулканическая реконструкция, Полярный Урал, Landsat 8

**DOI:** 10.31857/S0205961420040089

### ВВЕДЕНИЕ

Полоса вулканитов силуру-девонского возраста Малоуральской структурно-фациальной зоны, располагающаяся к востоку от Главного Уральского разлома, является перспективной на выявление золоторудной минерализации, что доказывают открытия месторождений в 1995 г. Новогоднее-Монто (Au-Fe-скарновое), а в 2002 г. – Петропавловского (Au-порфиоровое) в Тоупугол-Ханмейшорском рудном районе (Лючкин и др., 2006; Кениг, Бутаков, 2013; Soloviev et al., 2013; Ivanova et al., 2017; Викентьев и др., 2017). Это обусловило дальнейшие поисково-оценочные работы на этой территории. В 2010–2012 гг. к юго-западу от вышеуказанной

площади в результате оценочного бурения Полярная партия ИМГРЭ (Д.И. Смирнов и др.) выявила 3 рудопроявления на территории Манюкую-Ворчатинского рудного узла: Полярная Надежда, Геохимическое и Благодарное (рис. 1). Для рудопроявления Полярная Надежда оценены ресурсы золота, равные 20 т по категории Р<sub>2</sub> (Кременецкий и др., 2012). Поэтому мы провели анализ космоснимков этой площади, чтобы проанализировать геолого-структурные особенности локализации золоторудных проявлений этой территории с учетом выявленных при космодешифрировании линеаментов и концентрических структур.



**Рис. 1.** Положение Манюкую-Варчатинского рудного узла и Тоупугол-Ханмейшорского рудного района в структурах Полярного Урала. Структурная основа по (Черняев и др., 2005) с изменениями: 1–3 – месторождения (1), рудопроявления (2) и россыпи (3) золота; 4 – V-Fe-Cu-(Au) рудопроявление; 5 – Cu-Zn-колчеданное рудопроявление; 6 – Центрально-Уральская мегазона; 7 – базальт-андезитовый комплекс; 8 – офиолиты; 9 – Малоуральская структурно-фашиальная зона; 10 – населенные пункты; 11–13 – границы: 11 – рис. 2а, 12 – рис. 2б, 13 – рис. 4.

## ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ

Малоуральский вулканоплутонический пояс (ВПП) (Ямало-Ненецкий автономный округ) в среднем палеозое ( $O_3-C_1$ ) представлял собой либо островную дугу ( $O_3-D_1$ ), которая в раннем девоне сменилась окраинно-континентальным ВПП (Язева, Бочкарев, 1984), либо островную дугу, сформировавшуюся на гетерогенном основании (Кузнецов, Романюк, 2014; Соболев и др., 2018). В северной и западной части Малоуральской зоны локализованы офиолитовые габбро-гипербазитовые массивы: Войкаро-Сыньинский и Рай-Из, окаймленные на юго-востоке полосой габбро-амфиболитов. Восточнее расположены ордовикско-девонские островодужные плутонические и осадочно-вулканогенные комплексы, объединенные в Малоуральскую зону. В пределах этой зоны (восточнее габбро-амфиболитов) выходят на поверхность вулканогенные толщи ( $O_3-D_2$ ) с маломощными прослоями осадочных пород,

прорванные интрузивами пестрого состава (от габбро до гранитоидов) (Государственная..., 2007). В эйфеле и вплоть до пермской коллизии с Восточно-Европейским континентом надсубдукционная система Полярного Урала развивалась, скорее всего, как зрелая островная дуга (Викентьев и др., 2017).

Тоупугол-Ханмейшорский рудный район расположен в северной части Малоуральского ВПП (Лючкин и др., 2006). Он сложен вулканогенно-осадочными породами базальт-андезито-базальтовой формации, прорывающиеся интрузивами собского ( $D_{1-2}$ ) (кварцевые диоритовые порфиристы, кварцевые диориты, гранодиориты, дайки диоритовых порфиристов), конгорского ( $D_{1-2}$ ) (дайки монцодиоритовых порфиристов, порфиридные габбро-долериты) и малоханмейского ( $C_{1-2}$ ) (лампрофиды и долеритовые порфиристы) интрузивных комплексов (Соболев и др., 2020). Они особенно широко распространены в пределах ме-

сторождений Новогодненского рудного поля (Викентьев и др., 2017).

Манюкую-Варчатинский рудный узел сложен вулканогенными и вулканогенно-осадочными породами малоуральской свиты ( $S_2-D_2$ ), прорванными интрузивными телами собского и конгорского комплексов. Свита характеризуется фациальной невыдержанностью и сложена разнообломочными туфами и вулканомиктами пироксен-плагиоклазовых андезибазальтов с редкими потоками базальтов, андезибазальтов, отдельными пластами туфопесчаников и туфитов. Изредка встречаются биогермы, сложенные рифогенными известняками. В разрезе малоуральской свиты выделяются три толщи (нижняя – вулканогенно-туфогенная, средняя – тонкослоистых осадочных, туфогенно-осадочных и туфогенных пород и верхняя – вулканогенно-туфогенная) (Шишкин и др., 2007; Кремененцкий и др., 2012). Нижняя толща представлена субаэральными агломератовыми и бомбовыми туфами, туфобрекчиями, кластолавами и лавами, слагающими вулканические постройки преимущественно базальт-андезитового состава. Очевидно, это руины центральных частей древних вулканических аппаратов. Один из таких центров извержения слагает горный массив Манюкую; аналогичные образования частично слагают хр. Дзольварчатый. Средняя толща распространена в районе ручья Элькошор, в районе рудопроявлений Элькошорское и Третья Рудная Горка и на правобережье среднего течения р. Танью. Верхняя толща развита на правобережье р. Танью. Она представлена пирокластическими и вулканогенно-осадочными породами и лавами. Для них характерно широкое развитие грубой пирокластике (бомбовые туфы, туфобрекчии, туфоконгломераты). В целом петрогеохимический состав и петрографические особенности вулканических и туфогенных пород свиты указывают на то, что они произошли в результате эксплозивной деятельности вулкана центрального типа на островодужной палеогеодинамической обстановке (Шишкин и др., 2007). Чередование в разрезе пачек существенно вулканогенных и осадочных пород указывает на периодическую активизацию вулканической деятельности в период накопления пород свиты.

Интрузивные комплексы включают образования собского ( $D_{1-2}$ ) и конгорского ( $D_{1-2}$ ) комплексов. Собский комплекс состоит из крупных интрузивов габбро, диоритов и тоналитов. К конгорскому комплексу отнесены небольшие интрузивы и дайковые образования, встречающиеся среди полей вулканитов: габбро, габбро-диориты, диориты, монцодиориты (Шишкин и др., 2007; Соболев и др., 2018).

Для Малоуральского ВПП продукты контактового метаморфизма представлены довольно широко в виде зон ороговикования, осложнен-

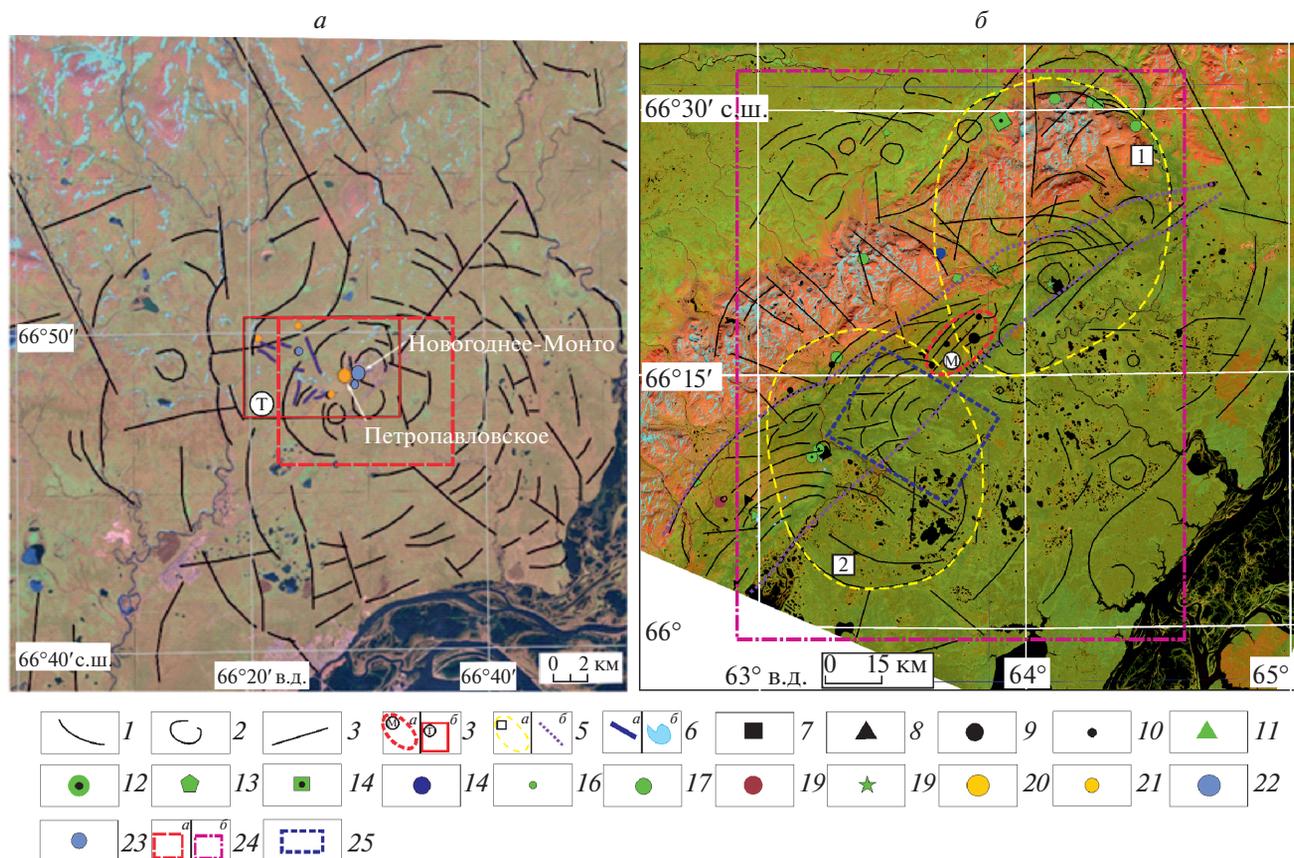
ных скарнированием, эпидотизацией, березитизацией, окварцеванием, альбитизацией, сульфидизацией. Эпидотовые и эпидот-гранатовые скарны вмещают магнетитовые и сульфидно-магнетитовые тела. С процессами контактового метаморфизма связаны месторождения и рудопроявления скарново-магнетитовых руд (Новогоднее-Монто, Первая Рудная Горка, Третья Рудная Горка, Магнетитовое и др.) (см. рис. 1). Скарнирование, как правило, проявлено вблизи контакта кварцевых диоритов собского комплекса с вулканогенно-осадочными породами. На отдельных участках наблюдается развитие кварц-серицитовых метасоматитов – филлизитов (березитов), сопровождающихся интенсивной халькопиритовой минерализацией (рудопроявления Элькошорское, Манюкую) (Шишкин и др., 2007).

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе дешифрирования нами была использована трехканальная мозаика, составленная из сцен космического аппарата дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) Landsat 8 при комбинации каналов 7-5-3 и 10-7-3 в растровом формате MrSID. Были использованы следующие сцены:

LC08\_L1TP\_165013\_20180820\_20180829\_01\_T;  
LC08\_L1TP\_166013\_20170707\_20170716\_01\_T1;  
LC08\_L1TP\_166014\_20180827\_20180911\_01\_T1;  
LC08\_L1TP\_166013\_20180726\_20180731\_01\_T1. Разрешение на местности ~30 м, площадь около 35000 м<sup>2</sup>. Дешифрирование проводилась в программе ArcGis. При обработке многоспектральных космоснимков (КС) основное внимание уделялось выявлению дизъюнктивных нарушений (линейных, дуговых, кольцевых и радиально-концентрических). Наиболее четко линейamentos выделяются при каналах раstra RGB = 1 : 2 : 2 по резкой границе фототона и рисунку речной сети.

Дешифрирование космоснимков основывалось на комплексном подходе, включающем морфоструктурный анализ (Иванова и др., 2019; Куприков, Викентьев, 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), так и для сопредельных территорий) для уточнения внешних контуров морфоструктур, элементов их внутреннего строения.



**Рис. 2.** Схема дешифрирования космоснимков для Тоупугол-Ханмейшорского рудного района (а) и центральной части Малоуральского ВПП (б): 1–3 – линеаменты: 1 – концентрические морфоструктуры 1 и 2-го порядков; 2 – кольцевые (а) и дуговые (б) морфоструктуры центрального типа 3-го порядка; 3 – радиальные; 4 – контуры Манюкую-Варчатинского рудного узла (а) и Тоупугол-Ханмейшорского рудного района (б), 5 – контуры: морфоструктур № 1 и № 2 (а), структура СВ простириания (б); 6 – субвулканические тела: Тоупугол-Ханмейшорского рудного района по (Прямоносов и др., 2001) (а), Манюкую-Варчатинского рудного узла по (Шишкин и др., 2007) (б); 7–23 – рудные месторождения, рудопроявления и пункты минерализации: 20, 22 – рудные месторождения, 7–9, 11, 13, 15, 17–19, 21, 23 – рудопроявления, 10, 12, 14, 16 – пункты минерализации (7 – Fe–Cu–Au, 8 – Fe–Cu, 9, 10 – Fe–Ti–V, 11 – Cu–Au, 12 – Cu–Mo, 13 – Cu–Pd–Au, 14 – Cu–Zn, 15 – Cu–Zn, 16, 17 – Cu, 18 – Mo–Cu, 19 – Pt, 20, 21 – золото-кварцевый/порфиновый тип; 22, 23 – скарно-магнетитовый тип с золотом, 24–26 – границы: 24 – рис. 3а (а) и 3б (б), 25 – рис. 4.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ДЕШИФРИРОВАНИЯ КОСМОСНИМКОВ

Дешифрирование КС в пределах Тоупугол-Ханмейшорского рудного района позволило выделить кольцевые, дуговые и радиальные линеаменты (рис. 2, а), а также крупную структуру (Новогодненская) овальной формы размером 6 на 10 км, вытянутую в северо-восточном направлении, и мелкие кольцевые структуры, осложняющие ее.

Месторождения и рудопроявления рудного района приурочены к центральной части Новогодненской структуры – морфоструктуры центрального типа, ассоциирующие с линеаментами СЗ направления.

Дешифрирование КС позволило выделить в пределах центральной части Малоуральского ВПП аналогичные элементы – кольцевые, дуговые и

радиальные линеаменты. На рис. 2б представлены две крупные структуры овальной формы.

Морфоструктура № 1 имеет размер 54 на 48 км и вытянута в СВ направлении. Ее осложняют более мелкие кольцевые (около 7 км), дуговые и радиальные линеаменты. Морфоструктура № 2 вытянута в СЗ направлении и имеет размеры немного меньшие (48 на 38 км), чем морфоструктура № 1.

К морфоструктуре № 1 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 к морфоструктуре № 2.

Морфоструктуры № 1 и № 2 представляет собой вулcano-плутонические гетерогенные струк-

туры 1-го порядка, вероятно, образованные под влиянием нескольких геологических процессов, и осложняются концентрическими структурами 2-го порядка (меньшего диаметра) и дугowymi ли-неаментами, создающими признаки “телескопи-рованности” (ср., например, Горный и др., 2014).

На рис. 2, б четко выделяется серия коротких по простираанию радиальных ли-неаментов СВ простираания, сосредоточенных в полосе шириной 25 км при общей длине первые сотни км. Эти ли-неаменты образуют “зону” СВ направления, возможно, отражая дизъюнктивные нарушения и сложное блоковое строение территории, а также, вероятно, играя рудоконтролирующую роль.

Важными характеристиками системы кольце-вых структур центральной части Малоуральской ВПП являются положение ее центроида и глуби-на заложения магматического очага, с периодами активности которого, по всей видимости, было связано образование кольцевых структур. Харак-тер расположения центроидов колец основной кольцевой структуры позволяет восстановить ха-рактер и траекторию перемещения очага, форми-рующего данные структуры (Ананьев и др., 2010). По тектоновулканическим расчетам (Ваганов и др., 1985; Аэрокосмические..., 2000) выяснено, что вулканические взрывы, локализуясь в самых верхних горизонтах земной коры, на глубине ме-нее 3.5 км, могут привести к образованию каль-дер с диаметром воронки до 10 км. Поэтому для Новогодненской структуры глубина центроида, импульсировавшего заложение кольцевых струк-тур, составляет 4 км (рис. 4, а) и отвечает малоглу-бинному очагу, с которым было связано рудооб-разование на Петропавловском месторождении (Викентьев и др., 2017). Полученные данные не противоречат результатам (Соболев и др., 2018). Так, рассчитанные по геобарометрам (Johnson, Rutherford, 1989; Ridolfi et al., 2010) давления, отве-чающие условиям кристаллизации роговой об-манки, свидетельствуют о формировании пород конгорского и собского интрузивных комплексов в относительно малоглубинных условиях (4–12 км и 8–14 км соответственно). Используя для мор-фоструктур № 1 и № 2 тот же расчетный подход (Ваганов и др., 1985; Аэрокосмические..., 2000; Ананьев и др., 2010), по которому видимый диа-метр структуры на поверхности в 2–4 раза боль-ше, чем глубина очага (нами принята средняя ве-личина 3), можно заключить, что магматические камеры располагались на глубинах 12 и 16 км – в средних и нижних частях земной коры. Эти коль-цевые структуры 1-го порядка, вероятно, были сформированы в периоды тектонической активизации, сопровождавшей импульсы магматической деятельности этих нижнекоровых очагов, а ослож-няющие структуры более высокого порядка мар-кируют позицию промежуточных малоглубинных очагов (см. например, Горный и др., 2014).

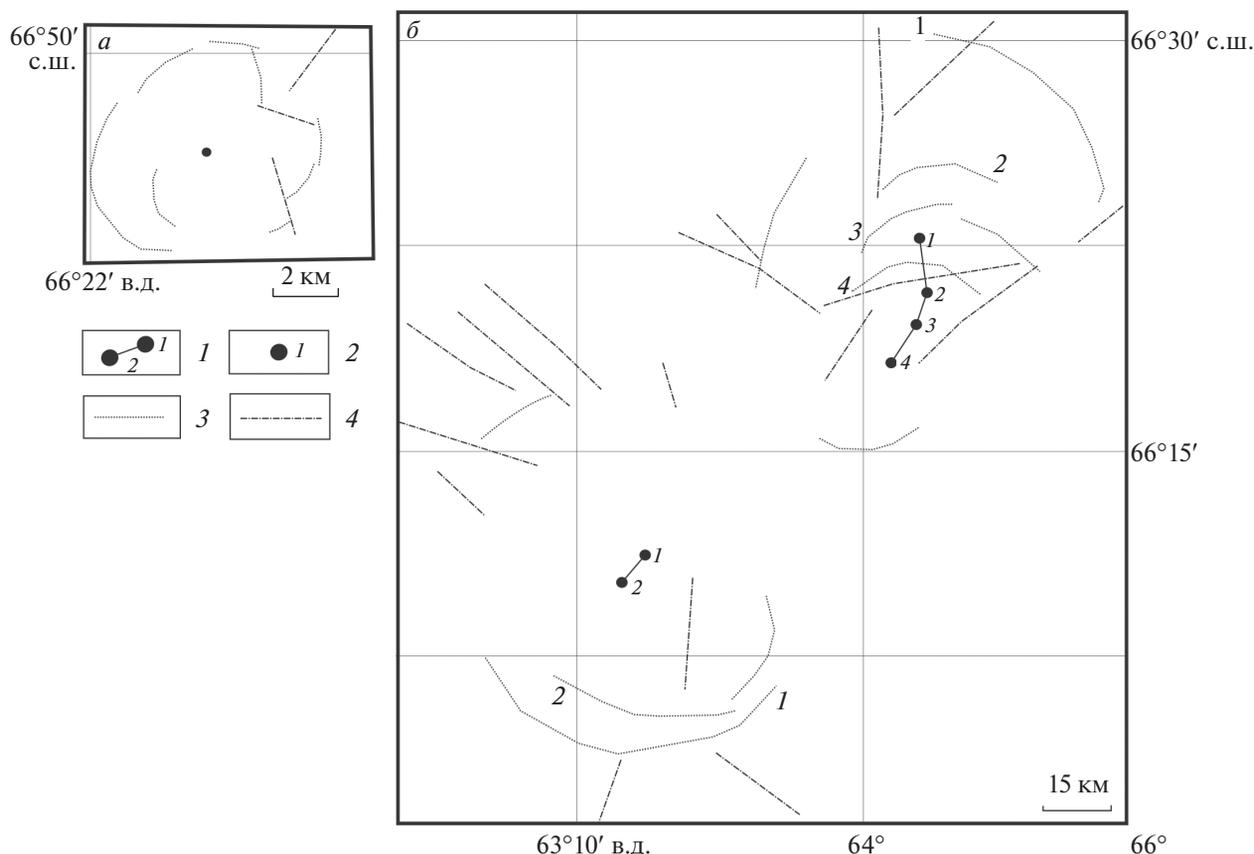
Предполагаем, что развитие процесса для центральной части Малоуральского ВПП шло по восходящей, а положение центроидов в плане соответствует области очага. Последовательное соединение центроидов показывает траекторию (проекция на горизонтальную плоскость) пуль-сационно-поступательного развития эндоген-ной системы (рис. 3, б). Полученная в результате такой тектоновулканической реконструкции тра-ектория указывает на то, что в целом со временем положение последовательно формировавшихся очагов смещалось на юг и затем на ЮЗ (для мор-фоструктур № 1 и № 2, соответственно) в ходе эволюции магматического процесса.

Как видно на рис. 3, б, для ЮВ части террито-рии удалось дешифровать гораздо меньше ли-неаментов, по сравнению с сопредельной площа-дью. Это связано скорее всего, с наличием мощ-ного покрова мезозойских отложений (около 1200 м) (Брадучан и др., 2015, лист Q-43), тогда как СЗ часть территории имеет чехол мощностью около 200 м (Шишкин и др., 2007; Зылева и др., 2014).

#### СОПОСТАВЛЕНИЕ ТООПУГОЛ-ХАНМЕЙШОРСКОГО РУДНОГО РАЙОНА И ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ МАЛОУРАЛЬСКОГО ВПП

Мы сопоставили полученную морфоструктур-ную карту центральной части Малоуральского ВПП с более северной территорией – Тоупугол-Ханмейшорским рудным районом (Ivanova et al., 2017; Викентьев и др., 2017) (см. рис. 2, а, б). Вы-явлены схожие закономерности геологического строения и размещения золоторудной минерали-зации:

1. Исследуемые территории приурочены к тек-тоно-магматической структуре сложного строе-ния и длительного развития.
2. Рудные районы и узлы локализованы в обла-сти пересечения региональных долгоживущих зон тектонических нарушений СВ и СЗ направлений.
3. Интрузивные образования представлены полифазными и разновозрастными комплексами, с которыми связана скарново-магнетитовая и золоторудная минерализация.
4. Внутреннее строение кольцевых морфо-структур осложнялось пересечением концентри-ческих и (или) дугowych разломов, радиальными разрывными нарушениями СВ и СЗ простираания различных рангов, а также участками сосредото-чения мелких кольцевых структур.
5. Месторождения и рудопроявления локализо-ваны внутри крупных кольцевых структур ослож-ненных концентрическими структурами 2-го по-рядка и дугowymi ли-неаментами, а также образо-ванных под влиянием нескольких геологических процессов.



**Рис. 3.** Морфометрические модели кольцевых структур Новогодненского рудного поля (а) и морфоструктур № 1 и № 2 центральной части Малоуральского ВПП (б): 1 – проекция на дневную поверхность траектории изменения положения магматического очага для Малоуральского ВПП (б); 2 – центры кольцевых структур и их номера; 3 – основные кольцевые структуры и их номера; 4 – главные линейменты.

Кроме того, выявлены и некоторые различия:

1. Новогодненская структура имеет размеры намного меньше, чем морфоструктуры № 1 и № 2 (6 на 10 км, 54 на 44 км и 48 на 38 км соответственно).

2. Кольцевые и дуговые морфоструктуры сопровождаются менее протяженными радиальными линейментами (до 20 км – для Новогодненской структуры и до 50 км – для морфоструктур № 1 и № 2).

3. Новогодненская морфоструктура – вулканоплутоническая моногенная структура 2-го порядка – вероятно, образованная под влиянием одного ведущего геологического процесса.

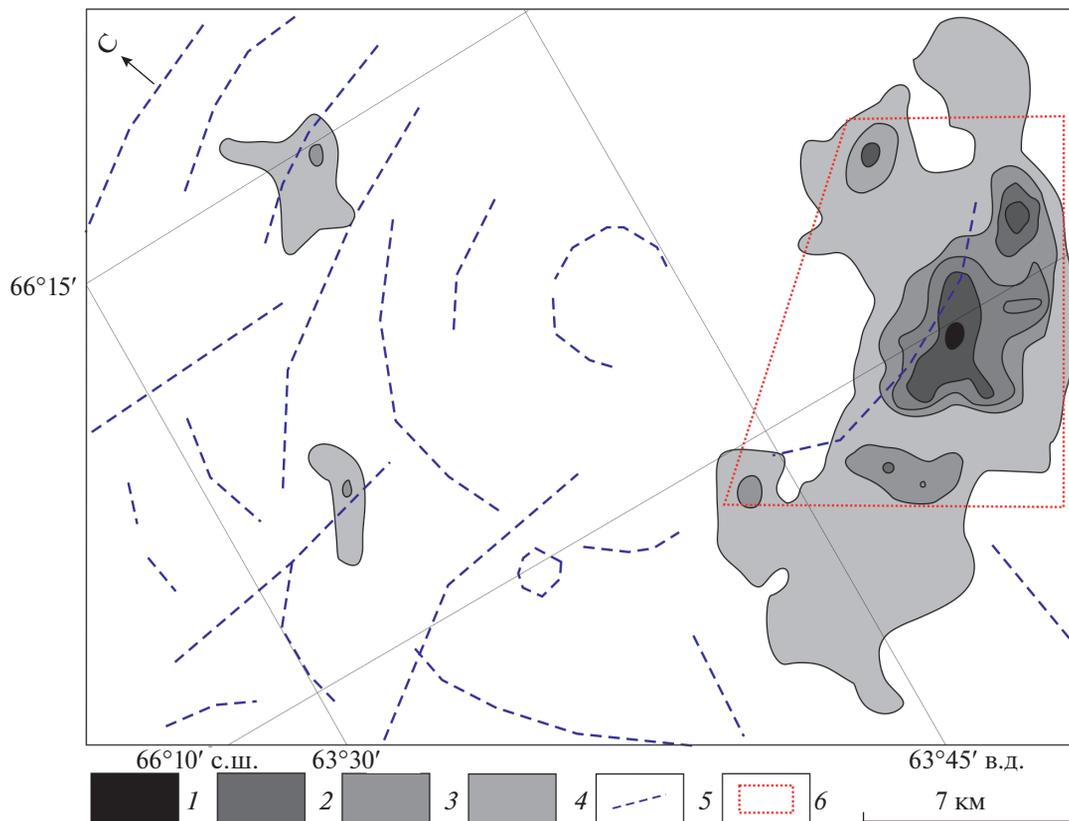
#### ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫЙ ПРИЗНАК НА ЗОЛОТО-МЕДНО-ПОРФИРОВЫЙ ТИП МИНЕРАЛИЗАЦИИ ДЛЯ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ВОСТОЧНОГО СКЛОНА ПОЛЯРНОГО УРАЛА

В работе (Иванова, Бочнева, 2016) на основе разработанной методики прогнозирования ору-

денения для южной части Малоуральского ВПП Полярного Урала приведена прогнозная карта для золото-медно-порфировой минерализации с указанием на ней рискованных зон и линейментов (совмещение прогнозных и морфоструктурных карт) (рис. 4). По мере увеличения насыщенности цветов возрастает степень уверенности в прогнозе золото-медно-порфировой минерализации, т.е. вероятность обнаружения оруденения.

Зона с наиболее высоким значением прогноза образует компактный район, расположенный на юго-востоке исследуемой территории, и составляет небольшую площадь ~ 115 км<sup>2</sup>.

Таким образом, золото-медно-порфировую минерализацию в пределах прогнозной площади следует искать в пределах внешних кольцевых разломов крупных морфоструктур 1-го порядка, асимметричного и сложного строения, с длительным развитием и признаками “телескопированности”. Кроме того, в пределах кольцевых структур должны присутствовать непротяженные линейменты СЗ и/или СВ направлений (см. рис. 2, а и 4). Этот морфоструктурный прогнозно-поисковый при-



**Рис. 4.** Прогнозная карта на золото-медно-порфировый тип оруденения. Условные обозначения: 1–4 – рисковые зоны, 5 – линеаменты, 6 – рекомендованная область проведения оценочных работ.

знак может быть применен в дальнейшем для поисков золото-медно-порфировой минерализации для северной части восточного склона Полярного Урала.

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

#### ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КОСМОСНИМКОВ ЗА РУБЕЖОМ ДЛЯ ПОИСКА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ МИНЕРАЛИЗАЦИИ

Дешифрирование космоснимков и морфоструктурный анализ широко используются во всем мире, в том числе и в Арктике, для поиска и прогнозирования различных видов полезных ископаемых (например, Pour, 2012; Sarapää, Sarala 2013; Graham et al., 2018). Ученые из Алжира (Saibi et al., 2018) показали, как геофизические данные (аэромагнитная съемка) интегрируются с информацией ДЗЗ с целью анализа геологического строения территории долины Айнак-Логар (Афганистан), расположенной в 30 км к югу от Кабула. Эта область имеет перспективы на выявление кобальтовой, хром-

товой и медной минерализации. Для выделения геоструктурных особенностей и геоморфологических характеристик изучаемой площади, а также их связи с оруденением были использованы методы дистанционного зондирования и геофизические данные. Последние получены от Геологической службы США и обработаны в программе Geosoft Oasis Montaj Ver. 8. Данные дистанционного зондирования анализировались с использованием картографического устройства Earth Resource (ER) Ver. 7. Были применены мультиспектральные изображения КА Landsat 8 при комбинации каналов RGB = 7 : 4 : 2 (SWIR-VNIR composite), RGB = 5 : 4 : 3 (SWIR-NIR-VIR composite) и RGB = 7 : 4 : 8 (SWIR-NIR-Panchromatic composite), которые накладывались на затененные карты рельефа для улучшения возможности дешифрирования линеаментов, которые были выделены вручную на основе фотографических характеристик (форма: размер, рисунок, тень, тон и текстура) и геоморфологических особенностей.

На основе распределения линейных структур по направлениям были построены розы-диаграммы, имеющие в основном СВ и СЗ простирание, которые хорошо коррелируются с разломами на геологической карте. Кроме того, была использо-

вана геофизическая карта для уточнения внешних границ линейных элементов, согласующиеся с геологическими картами.

Исследователи из Ирана (Yousefi et al., 2018) применяют данные радиометра ASTER и мультиспектральные КА Landsat-8 (каналы раstra RGB = 5 : 2 : 1, а также комбинация каналов R = 11 : 10, G = 6 : 7, B = 4 : 2 для обнаружения зон гидротермальных изменений (окварцевание, аргиллизация и ожелезнение) с целью картирования литологических границ вмещающих пород, распределения Fe<sup>3+</sup> минералов (ярозит и гематит), выделения линейных элементов на примере золоторудного месторождения Заршуран (близок типу Карлин). Выделенные в процессе дешифрирования разрывные нарушения были также сопоставлены с геологической картой и визуально определены во время полевых работ. Морфоструктурный анализ выявил главную структуру СЗ направления и второстепенные разломы СВ простирания, которые тесно связаны с гидротермальными изменениями и золоторудной минерализацией. Дешифрирование проводилось в программе Environment for Visualizing Images (ENVI) (версия 5.1). Полученные результаты могут быть использованы для прогнозно-поисковых работ в региональном масштабе на золоторудный тип минерализации.

Ученые из Польши (Nawaz et al., 2019) также используют изображения КА OLI Landsat 8 (каналы раstra RGB = 6 : 5 : 3) с целью поиска зон метасоматических изменений и геологического картирования на территории Пакистана (офиолитовый пояс Вазиристан). Эта площадь является перспективной для выявления колчеданной, медной, хромитовой и марганцевой минерализации. Территория характеризуется сухим климатом, отсутствием растительного покрова, обширными и четкими обнажениями, что является хорошими условиями для дешифрирования, но при этом прогнозные и прогнозно-поисковые работы затруднены здесь из-за отсутствия инфраструктуры и военных действий. В качестве вспомогательного материала выступала геологическая карта Северного Вазиристана в масштабе 1 : 50000. Исследователями были выявлены основные геологические признаки (стратиграфические, литологические, геоморфологические, структурные, метасоматические и т.д.) с целью поиска оруденения при дешифрировании космоснимков. В целом результаты этих исследований можно применять для выделения литологических зон и границ метасоматических изменений. Авторы также рекомендуют использовать данные дистанционного зондирования совместно с полевыми и геофизическими материалами (магнито- и гравиразведка) для получения более точных и надежных результатов.

Исследователи из Мичиганского технологического университета, США (Kumar et al., 2020) использовали спектральные данные AVIRIS-NG, такие как SAM, SID и SIDSAMtan с целью картирования зон гидротермальных изменений на месторождении золота Хутти-Маски, Индия. Район исследования представляет собой позднеархейский зеленокаменный пояс вулканического происхождения. Золоторудная минерализация локализована в Восточном кратоне Дхарвар на юге Индии. В результате проведенных работ было установлено, что северная часть области в основном состоит из мусковита, тогда как южная сложена хлоритом, гетитом, мусковитом и каолинитом, что указывает на пропилитовые изменения. Большая часть этих минералов связана с измененными метавулканическими породами и мигматитами. Полученная ими карта гидротермальных изменений поможет лучше понять связь ассоциации этих минералов с золотом в этом районе.

Таким образом, анализ литературы позволил сделать вывод, что в настоящее время КС, которые в основном находятся в открытом доступе, все чаще применяются для поиска и прогнозирования минерализации (морфоструктурный анализ, выделение зон гидротермальных изменений и др.). Анализ многоспектральных космоизображений активно используется в синтезе с другими методами (например, геологическими и геофизическими). Подобные дистанционные методы незаменимы и, в то же время, эффективны в местах со сложными климатическими условиями (постоянный ледниковый покров, пустынные территории, болотистая местность и др.) и отсутствием инфраструктуры – для районов Крайнего Севера и, в особенности Арктических территорий.

## ВЫВОДЫ

В результате анализа изображений КА Landsat 8 в центральной части Малоуральского вулканоплутонического пояса были выделены две крупные морфоструктуры № 1 и № 2 овальной формы, характеризующиеся сложным строением, длительным и многоэтапным развитием. Известные рудопоявления в основном локализованы на периферии этих морфоструктур. Выделенные радиальные зоны в основном имеют СВ и СЗ направление и длину до 50 км и 30 км, соответственно. Вероятно, они представляют собой активизированные структуры, отвечающие ослабленным участкам земной коры, которые фиксируют разломы фундамента и контролируют размещение рудных узлов.

В процессе дешифрирования многоспектральных изображений в пределах центральной части Малоуральского ВПП была выделена зона СВ направления шириной до 25 км и длиной около 105 км, насыщенная дизъюнктивными нарушениями,

которая имеет сложное блоковое строение и, вероятно, играет рудоконтролирующую роль. Она, скорее всего, образовалась позднее морфоструктур № 1 и № 2, так как при пересечении с кольцевыми структурами концентрические и радиальные линейные элементы рассекают их как без видимых смещений, так и с разрывами, а также с обрезаниями и смещениями отдельных частей кольцевых разломов (Космическая..., 1983).

Морфометрическое моделирование позволило оценить глубины образования магматических очагов для морфоструктур № 1 и № 2, составляющих порядка 12 км и 16 км, соответственно.

По результатам тектоновулканической реконструкции предполагается, что в ходе развития магматического процесса корневые (очаговые) части морфоструктур № 1 и № 2 погружались на юг и затем на ЮЗ, соответственно.

Проведенный анализ зарубежного опыта применения космоснимков обогащает методику подобных исследований с целью поиска и прогнозирования рудной минерализации. Данные многоспектральных космоизображений активно применяются совместно с другими методами, и они порой являются единственными источником информации в местах со сложными климатическими и географическими условиями, прежде всего, для районов Крайнего Севера.

Таким образом, на основании полученных в ходе исследования результатов, можно сделать вывод, что золоторудную гидротермальную минерализацию на севере восточного склона Урала следует искать на периферии внутренней части крупных морфоструктур сложного строения с признаками “телескопированности”; она локализуется в участках сгущения линейментов СЗ и/или СВ направлений и в пределах трансрегиональных разломных зон протяженностью до сотен км. При этом локальные очаговые структуры, расположенные за пределами этих морфоструктур, могут не сопровождаться значительной минерализацией вообще.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа написана при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18-05-70041 Ресурсы Арктики и госпрограммы “Научно-технологическое развитие Российской Федерации” (проект 2020-1902-01-258).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

*Ананьев Ю.С., Поцелуев А.А., Житков В.Г.* Космоструктурные модели золоторудных объектов Западной Калбы // Известия Томского политех. ун-та. 2010. Т. 317. № 1. С. 35–42.

Аэрокосмические методы геологических исследований / Под ред. А.В. Перцова. СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 316 с.

*Брадучан Ю.В., Василенко Е.П., Воронин А.С., Горелина Т.Е. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-43 – Новый Уренгой. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. 320 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.* Золото-порфировое Петропавловское месторождение (Полярный Урал): геологическая позиция, минералогия и условия образования // Геология рудных месторождений. 2017. Т. 59. № 6. С. 501–541.

*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) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 140–156.

Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (3-е покол.). Серия Уральская. Лист Q-41 – Воркута. Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2007. 541 с.

*Зылева Л.И., Коновалов А.Л., Казак А.П., Жданов А.В. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (третье поколение). Серия Западно-Сибирская. Лист Q-42 – Салехард: Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. 396 с.

*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 // Исследование Земли из космоса. 2019. № 3. С. 66–76.

*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 Манюкую-Варчатинского рудного узла (рудопоявления: Полярная Надежда, Геохимическое и Благодарное). Масштаб 1 : 10000. М.: ФГУП ИМГРЭ, 2012. 45 с.

*Кузнецов Н.Б., Романюк Т.В.* Палеозойская эволюция Полярного Урала: Войкарский бассейн с корой океанического типа существовал не менее 65 млн. лет // Бюлл. МОИП, отд. геол. 2014. Т. 89. Вып. 5. С. 56–70.

*Куприков Д.Н., Викентьев И.В.* Применение данных космодешифрирования для изучения рудоконтролирующих структур Лебединского рудно-россыпного узла, Южная Якутия // Исследование Земли из космоса. 2019. № 3. С. 45–57.

*Лячкин В.А., Толоконников А.В., Водоватов О.В. и др.* Золоторудные месторождения Новогодненского руд-

ного поля на Полярном Урале // Алмазы и благородные металлы Тимано-Уральского региона. Мат. конф. Сыктывкар, 2006. С. 186–189.

Прямоносов А.П., Степанов А.Е., Телегина Т.В. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 200000 (издание второе). Серия Полярно-Уральская. Лист Q-41-XII. Объяснительная записка. Салехард: Комитет природных ресурсов по Ямало-Ненецкому автономному округу, 2001. 231 с.

Соболев И.Д., Викентьев И.В., Травин А.В., Бортников Н.С. Каменноугольный магматизм Полярного Урала // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 494. № 2. С. 1–6.

Соболев И.Д., Соболева А.А., Удоротина О.В. и др. Девонский островодужный магматизм Войкарской зоны Полярного Урала // Геотектоника. 2018. № 5. С. 39–74.

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., Кабатова Н.В. др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1000000 (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.

Kumar C., Chatterjee S., Oommen T. Mapping hydrothermal alteration minerals using high-resolution AVIRIS-NG hyperspectral data in the Hutti-Maski gold deposit area, India // International Journal of Remote Sensing. 2020. V. 41. № 2. P. 794–812.

<https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1648906>

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.

<https://doi.org/10.5382/econgeo.2018.4559>

Ivanova J.N., Vikentyev I.V., Sobolev I.D. et al. Gold-porphyrification of the Toupugol-Khanmeyshorsky ore

district (the Polar Urals, Russia): geochronology and geological controls on ore genesis. 14th SGA Biennial Meeting, Quebec, Canada. 2007. V. 1. P. 363–366.

Johnson M.C., Rutherford M.J. Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks // Geology. 1989. V. 17. № 9. P. 837–841.

[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1989\)017](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1989)017)

Nawaz A., Magiera J., Inz. Remote sensing based geological mapping and mineral exploration of the area of North Waziristan // 15th SGA Biennial Meeting 2019 “Life with Ore Deposits on Earth”. Glasgow. UK. 2019. V. 3. P. 1378–1381.

Pour B.A., Hashim M. The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits // Ore Geology Review. 2012. V. 44. P. 1–9.

<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2011.09.009>

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.

<https://doi.org/10.1007/s00410-009-0465-7>

Saibi H., Bersi M., Mia B.M. et al. Applications of Remote Sensing in Geoscience // Recent Advances and Applications in Remote Sensing. 2018.

<https://doi.org/10.5772/intechopen.75995>

Sarapää O., Sarala P. Rare earth element and gold exploration in glaciated terrain: example from the Mäkära area, northern Finland // Geochem. Explor. Environ. Anal. 2013. V. 13(2). P. 131–143.

<https://doi.org/10.1144/geochem2012-136>

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 // Mineral. Deposita. 2013. V. 48(5). P. 603–627.

<https://doi.org/10.1007/s00126-012-0449-9>

Yousefi T., Aliyari F., Abedini A., Calagari A.A. Integrating geologic and Landsat-8 and ASTER remote sensing data for gold exploration: a case study from Zarshuran Carlin-type gold deposit, NW Iran // Arabian J. Geoscience. 2018. 11:482.

<https://doi.org/10.1007/s12517-018-3822-x>

## Structural Control of Gold Mineralization of the Central Part of the Malouralsky Volcanic-Plutonic Belt (the Polar Urals) Based on the Analysis of Multispectral Images of the Spacecraft Landsat 8

J. N. Ivanova<sup>1,2</sup>, R. I. Vykhristenko<sup>1</sup>, and I. V. Vikentyev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup>Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russia

Analyses of the central part of the Malouralsky volcano-plutonic belt, which includes the Manyukuy-Vorchatinsky ore cluster, were carried out using multispectral satellite imagery of the spacecraft Landsat 8 Earth remote sensing for gold deposit identification. This territory was characterised in comparison with the Toupugol-Khanmeishor ore region. The similar features of the geological structure and location of deposits and ore occurrences in the system of morphological structures were identified. It allows to formulate the specific features (geological, morphological) of gold mineralization. Three structures were distinguished based on the analyses of satellite images. The Novogodnensk structure (the Toupugol-Khanmeishorsky ore region) is a

monogenic one. This structure was formed under the influence of one leading geological process. Morphostructures № 1 and № 2 (the central part of the Malouralsky volcanic-plutonic belt) are larger, complex structures, with long and multi-stage development. Magmatic chambers were located at depths of ~12 km and ~16 km, respectively for morphostructures № 1 and № 2. The root (focal) parts of morphostructures № 1 and № 2 immersed during the development of the magmatic process from south to southwest, respectively, according to the tectonic-volcanic reconstruction. In general, prediction of gold hydrothermal mineralization at the north of the eastern slope of the Polar Urals should be carried out on the periphery of the centers of large morphostructures with complex structure and a long and multi-stage development with “telescoping”. This mineralization is probably located in areas of lineaments concentration of northwest and/or northeast trending and within regional fault zones up to hundreds km.

**Keywords:** multispectral satellite images, gold mineralization, lineament analysis, tectono-volcanic reconstruction, the Polar Urals, Landsat 8

## REFERENCES

- Aerokosmicheskiye metody geologicheskikh issledovaniy [Aerospace methods of geological research] / Pertsov, A.V., Ed., St. Petersburg: VSEGEI, 2000. 316 p. (In Russian).
- Anan'yev Yu.S., Potseluyev A.A., Zhitkov V.G. Kosmostrukturnyye modeli zolotorudnykh ob'yektov Zapadnoy Kalby [Cosmostructural models of gold deposits at the Zapadnaya Kalba] // *Izv. Tomsk. Politekh. Univ.*, 2010, vol. 317, no. 1. P. 35–42.
- Braduchan Yu.V., Vasilenko Ye.P., Voronin A.S., Gorelina T.Ye. et al. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 1000000 (3-e pokoleniye). Seriya Zapadno-Sibirskaya. List Q-43 - Novyy Urengoy [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (3rd generation). Series is West Siberian. Sheet Q-43 – t = Novyi Urengoy. Explanatory note]. Obyasnitel'naya zapiska. SPb.: Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2015. 320 p. (in Russian).
- Chernyaev E.V., Chernyaeva E.I., Sedel'nikova A.Yu. Geologiya zoloto-skarnovogo mestorozhdeniya Novogodneye-Monto (Polyarnyy Ural) [Geology of the gold-skarn deposit the Novogodnee-Monto (the Polar Urals)] // *Skarny, ikh genesis i rudonosnost' (Fe, Cu, Au, W, Sn, ...)*. Mat. konf. XI Chteniya A.N. Zavaritskiy [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).
- Gornyy V.I., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A. Osobennosti mineralogicheskoy zonal'nosti rudno-magmaticheskikh sistem, vmeshchayushchikh kvartsevo-zhil'nyye mestorozhdeniya zolota (po materialam sputnikovoy spektrometrii) [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, vol. 11, no. 3, pp. 140–156. (in Russian).
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 1000000 (3-ye pokol.). Seriya Ural'skaya. List Q-41 – Vorkuta. Ob'yasnitel'naya zapiska [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).
- 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. doi 10.5382/econgeo.2018.4559
- Ivanova J.N., Vikentyev I.V., Sobolev I.D. et al. Gold-porphyry mineralization of the Toupugol-Khanmeyshorsky ore district (the Polar Urals, Russia): geochronology and geological controls on ore genesis. Mineral Resources to Discover – 14th SGA Biennial Meeting, Quebec, Canada. 2017. V. 1. P. 363–366.
- Ivanova Yu.N., Bochneva A.A. Prognozirovaniye perspektivnykh ploshchadok na zoloto-medno-porfirovom tipe na osnove analiza priznakov i ikh funktsional'nykh i korrelyatsionnykh vzaimosvyazey [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., Vikentyev 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. doi 10.1134/S0001433819090226
- Johnson M.C., Rutherford M.J. Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks // *Geology*. 1989. V. 17. № 9. P. 837–841. doi 10.1130/0091-7613(1989)017
- Kenig V.V., Butakov K.V. Mestorozhdeniya rudnogo zolota Novogodneye-Monto i Petropavlovskoye – novyy zolotorudnyy rayon na Polyarnom Urale [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).
- Kosmicheskaya informatsiya v geologii [Space information in geology] / Ed. A.V. Peyve. M.: Nauka, 1983. 536 p. (In Russian).
- Kremenetskiy A.A. Obosnovaniye pechati i poiskovo-revizionnykh rabot na rudnom mestorozhdenii zolota v predelakh Manyukoy-Varchatinskogo rudnogo uzla (Polyarnaya Nadezhda, Geokhimicheskoye i Blagodarnoye). Masshtab 1 : 10000 [Substantiation of prediction and revision work on gold within the Manyukuy-Varchatinskoe ore cluster (occurrences: Polyarnaya Nadezhda, Geochemical and Blagodarnoe). Scale 1 : 10000]. M.: FGUP IMGRE. 2012. 45 p. (in Russian).
- Kumar C., Chatterjee S., Oommen T. Mapping hydrothermal alteration minerals using high-resolution AVIRIS-NG hyperspectral data in the Hutti-Maski gold deposit area, India // *In-*

- ternational Journal of Remote Sensing. 2020. V. 41. № 2. P. 794–812. doi.org/10.1080/01431161.2019.1648906
- Kuprikov D.N., Vikentyev I.V.* Space decoding data in the study of ore-controlling structures of the Lebedinsky ore-placer cluster, South Yakutia // *Izvestiya Atmospheric and Oceanic Physics*. 2019. V. 55. № 9. P. 1395–1406. doi 10.1134/S000143381909024X
- Kuznetsov N.B., Romanyuk T.V.* Paleozoyskaya evolyutsiya Polyarnogo Urala: Voykarskiy basseyn s koroy okeanicheskogo tipa sushchestvoval ne meneye 65 mln let [Paleozoic evolution of the Polar Urals: Voikarsky basin with oceanic crust has existed for at least 65 Ma] // *Byull. MOIP, Otd. Geol.* 2014. V. 89. № 5. P. 56–70. (in Russian).
- Lyuchkin V.A., Tolokonnikov A.V., Vodovatov O.V. et al.* Zolotorudnyye mestorozhdeniya Novogodnenskogo rudnogo polya na Polyarnom Urale [Gold deposits of the Novogodnensky ore field at the Polar Urals] // *Almazy i blagorodnyye metally Timano-Ural'skogo regiona. Mat. konf. Syktyvkar*, 2006. P. 186–189. (in Russian).
- Nawaz A., Magiera J.*, Inzh. Remote sensing based geological mapping and mineral exploration of the area of North Waziristan // 15th SGA Biennial Meeting 2019 “Life with Ore Deposits on Earth”. Glasgow. UK. 2019. V. 3. P. 1378–1381.
- Pour B.A., Hashim M.* The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits // *Ore Geology Review*. 2012. V. 44. P. 1–9. doi 10.1016/j.oregeorev.2011.09.009
- Pryamonosov A.P., Stepanov A. Ye., Telegina T.V. et al.* Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 200 000 (2-e izdaniye). Seriya Polyarno-Ural'skaya. List Q-41-XII. Ob"yasitel'naya zapiska. Salekhard: Komitet prirodnikh resursov po Yamalo-Nenetskomu avtonomnomu okrugu [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 200 000 (2nd edition). The Polar Ural Series. Sheet Q-41-XII. Explanatory note]. St. Petersburg: VSEGEI, 2001. 231 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. doi 10.1007/s00410-009-0465-7
- Saibi H., Bersi M., Mia B.M. et al.* Applications of Remote Sensing in Geoscience // *Recent Advances and Applications in Remote Sensing*. 2018. doi 10.5772/intechopen.75995
- Sarapää O., Sarala P.* Rare earth element and gold exploration in glaciated terrain: example from the Mäkärä area, northern Finland // *Geochem. Explor. Environ. Anal.* 2013. V. 13(2). P. 131–143. doi 10.1144/geochem2012-136
- Shishkin V.A., Astapov A.P., Kabatovi N.V. et al.* Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 1000000 (3-e pokoleniye). Seriya Ural'skaya. List Q-41 – Vorkuta. Ob"yasitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (3rd generation). Series Ural. Sheet Q-41 – Vorkuta]. St. Petersburg: VSEGEI, 2007. 541 p. (in Russian).
- Sobolev I.D., Soboleva A.A., Udoratina O.V. et al.* Devonian island-arc magmatism of the Voikar zone in the Polar Urals // *Geotectonics*. 2018. V. 52. № 5. P. 531–563. doi 10.1134/S0016852118050060
- Sobolev I.D., Vikentyev I.V., Travin A.V., Bortnikov N.S.* Carboniferous magmatism of the Polar Urals // *Doklady Earth Science*. 2020. V. 494. No. 2. P. 1–6.
- 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 // *Mineral. Deposita*. 2013. V. 48(5). P. 603–627. doi 10.1007/s00126-012-0449-9
- Vaganov V.I., Ivankin P.F., Kropotkin P.N. et al.* Vzryvnyye kol'tsevyye struktury shchitov i platform [Explosive ring structures of shields and platforms]. M.: Nauka, 1985. 200 p.
- Vikentyev I.V., Mansurov R.Kh., Ivanova Yu.N., et al.* Porphyry-style Petropavlovskoe gold deposit, the Polar Urals: geological position, mineralogy, and formation Conditions // *Geology of Ore Deposits*. 2017. V. 59. № 6. P. 482–520. doi 10.1134/S1075701517060058
- Yazeva R.G., Bochkarev V.V.* Voykarskiy vulkano-plutonicheskii po yas (Polyarnyy Ural) [Voikarsky volcanic-plutonic belt (Polar Urals)]. Sverdlovsk: UNTs AN SSSR, 1984. 156 p. (in Russian).
- Yousefi T., Aliyari F., Abedini A., Calagari A.A.* Integrating geologic and Landsat-8 and ASTER remote sensing data for gold exploration: a case study from Zarshuran Carlin-type gold deposit, NW Iran // *Arabian J. Geoscience*. 2018. 11:482. doi.org/10.1007/s12517-018-3822-x
- Zylyova L.I., Kononov A.L., Kazak A.P., Zhdanov A.V. et al.* Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1 : 1000000 (tret'ye pokoleniye). Seriya Zapadno-Sibirskaya. List Q-42 – Salekhard: Ob"yasitel'naya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1 : 1000000 (third generation). Series West Siberian. Sheet Q-42 – Salekhard: Explanatory note]. SPb.: VSEGEI, 2014. 396 p. (in Russian).