



Опыт и возможности применения космических систем дистанционного зондирования Земли для прогнозирования золоторудного оруденения на труднодоступных территориях на примере Полярного Урала

Ю.Н. Иванова

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии Российской академии наук, Российская Федерация, 119017, Москва, Старомонетный пер., 35
Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6

К.С. Иванов, М.К. Бондарева, В.А. Ермолаев

Главный испытательный космический центр Министерства обороны Российской Федерации имени Г.С. Титова, Российская Федерация, 141090, Московская область, Краснознаменск, ул. Октябрьская, 3

А.О. Жуков

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Российская Федерация, 119234, Москва, Университетский пр-т, 13

История статьи:

Поступила в редакцию: 05 марта 2019

Доработана: 16 мая 2019

Принята к публикации: 23 мая 2019

Ключевые слова:

дистанционное зондирование Земли; космический аппарат; дешифрирование; прогнозирование; золоторудное оруденение; Полярный Урал

В представленной статье рассматриваются вопросы применения отечественных и иностранных космических аппаратов (КА), а также их аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для поиска и прогнозирования золоторудного оруденения на труднодоступных территориях. Приведен пример решения этой задачи на перспективных территориях Полярного и Северного Урала. По материалам многозональной космической съемки аппаратом Landsat 7 выявлены крупные кольцевые, дуговые и радиальные структуры, определяющие позицию золоторудного оруденения Тоупул-Ханмейшорского (Новогодненское рудное поле, Полярный Урал) и Турьинско-Ауэрбаховского (Ауэрбаховское рудное поле, Северный Урал) рудных районов. Проведен сравнительный анализ существующих КА ДЗЗ, целевая информация о которых имеется в открытом доступе. Показано, что бортовая аппаратура, установленная на отечественных КА, и получаемая с ее помощью информация отвечают существующим требованиям, предъявляемым к ним для решения задачи поиска и прогнозирования оруденения. При этом возможности развернутой отечественной орбитальной группировки КА ДЗЗ превосходят возможности КА ДЗЗ Landsat 7. Рассматривается возможность получения геопространственной информации с использованием нового вида летательных аппаратов – псевдокосмических аппаратов (ПКА), обладающих рядом преимуществ как перед КА, так и перед беспилотными летательными аппаратами (БПЛА).

Введение

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) в последнее время находит все большее применение

Иванова Юлия Николаевна – научный сотрудник лаборатории геологии рудных месторождений ИГЕМ РАН; доцент департамента недропользования и нефтегазового дела Инженерной академии РУДН, кандидат геолого-минералогических наук; jnivanova@yandex.ru

Иванов Кирилл Сергеевич – начальник 101 научно-испытательной лаборатории, заместитель начальника 10 научно-испытательного отдела, кандидат технических наук.

Бондарева Марина Константиновна – ведущий научный сотрудник 11 научно-испытательного отдела, доктор технических наук, доцент.

Ермолаев Владимир Андреевич – старший научный сотрудник 101 научно-испытательной лаборатории.

Жуков Александр Олегович – ведущий научный сотрудник Государственного астрономического института имени П.К. Штенберга, доктор технических наук, доцент.

© Иванова Ю.Н., Иванов К.С., Бондарева М.К., Ермолаев В.А., Жуков А.О., 2019

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

International License

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

фологических и прогнозно-поисковых исследований, а также для разработки общих представлений по динамике металлогенических процессов; помогает получить информацию для труднодоступных и малоизученных северных площадей с мощным чехлом Mz-Kz отложений, суровым климатом и плохой транспортной инфраструктурой. При этом часто данные КС ДЗЗ не могут быть получены никакими другими способами.

Использование КС ДЗЗ в интересах геоинформационного обеспечения, как показывает мировой опыт [2], позволяет примерно в три раза сократить затраты времени и средств на поиск и освоение новых месторождений [3]. Высокопроизводительная вычислительная техника и многофункциональное специальное программное обеспечение (СПО) обработки, анализа и представления целевой информации КС ДЗЗ открывают качественно новые возможности по применению многоспектральных космических изображений при решении прогнозно-поисковых задач [2; 4–11].

На сегодняшний день в интересах укрепления национальной безопасности Российской Федерацией реализуется социально-экономическая политика, направленная на создание стратегических резервов минерально-сырьевых ресурсов, достаточных для гарантированного обеспечения потребностей экономики страны на долгосрочную перспективу¹. Обеспечить выполнение этой задачи возможно, в том числе благодаря поддержке исследований Крайнего Севера с целью его последующего освоения, а также совершенствования на основе современных достижений науки и техники методов поисковых и геологоразведочных работ, особенно с использованием материалов КС ДЗЗ.

Полярный Урал, входящий в арктическую территорию России, остается все еще слабо изученным из-за своей труднодоступности. На этой территории высока вероятность выявления месторождений благородных (Au, Ag), цветных (Cu, Mo, Zn, Pb) и особо дефицитных черных (Cr, Mn) металлов.

Данная площадь в ближайшем будущем может стать одним из новых золотодобывающих центров Российской Арктики, что актуально, так как в последние годы на мировом рынке отме-

чаются дефицит этого полезного ископаемого и, соответственно, высокий спрос на него, а также прогнозируется заметное увеличение цены на этот драгоценный металл.

В то же время освоение указанной территории затруднено рядом социально-экономических факторов: экстремальные природно-климатические условия, включая постоянный ледовый покров; очаговый характер промышленно-хозяйственного освоения территорий и низкая плотность населения; удаленность от основных промышленных центров, высокая ресурсоемкость и зависимость от своевременных поставок необходимых для деятельности и жизнеобеспечения средств².

Развитие методов ДЗЗ в геологии началось в 70–80-х годах XX в. с появлением многоспектральных изображений земной поверхности. На сегодняшний день использование данных космических съемок возрастает из-за существенного снижения стоимости и повышения оперативности (в масштабе времени близком к реальному) их получения, повышения их пространственного и спектрального разрешения, относительной простоты обнаружения и картирования приповерхностных объектов, которые слабо проявляются на поверхности и могут быть пропущены во время геолого-съемочных и поисковых работ.

В настоящее время космические аппараты (КА) со съемочными системами нового поколения позволяют получать снимки со сверхвысоким (например, до 41 см у КА GeoEye-1) пространственным разрешением, имеют обзорный режим наблюдения для обеспечения выполнения задач глобального мониторинга. КА ДЗЗ обладают преимуществами и особенностями по сравнению с другими видовыми средствами наблюдения, в том числе беспилотными летательными аппаратами (БПЛА), снабженными оптическими и инфракрасными датчиками. Это связано с возможностью получения радиолокационной информации об объектах, которые невидимы в оптическом или инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра, в том числе путем подповерхностного зондирования. Такие изображения могут быть получены в любое время суток и в различных метеоусловиях с высокой точной навигационной точностью.

¹ Указ Президента РФ от 31.12.2015 г. № 683 «О стратегии национальной безопасности Российской Федерации». СЗ РФ. 2016. № 1. Ч. II. Ст. 212. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_191669

² Указ Президента РФ от 18.09.2008 № Пр-1969 «Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 года и дальнейшую перспективу». URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_119442

Существенным преимуществом современных КС ДЗЗ перед БПЛА являются удаленное получение, обработка и анализ целевой информации. Относительно прост процесс заказа геопространственных данных, получаемых с использованием КС ДЗЗ, через соответствующих операторов средств ДЗЗ или их геоинформационные порталы.

В представленной статье рассматриваются вопросы применения и использования отечественных и иностранных КА и аппаратуры ДЗЗ для поиска и прогнозирования золоторудного оруденения на территории Полярного Урала.

Цель статьи – показать возможности использования КА для решения задач поиска и прогнозирования золоторудного оруденения, а также провести сравнительный анализ существующих КА ДЗЗ, целевая информация о которых имеется в открытом (необременительном) доступе.

1. Опыт применения КА ДЗЗ Landsat 7 для обработки КС

С помощью иностранного КА Landsat 7 (США) на примере Тоупугол-Ханмейшорского рудного района (Ямало-Ненецкий автономный округ) были проанализированы геолого-структурные особенности локализации и уточнена региональная позиция золоторудных месторождений и проявлений этой территории с учетом выявленных при космодешифрировании линеаментов и концентрических структур. Площадь района также была сопоставлена со старопромышленным Турьинско-Ауэрбаховским рудным районом (Северный Урал) для определения закономерностей размещения месторождений и рудопроявлений на изучаемых территориях [12].

Турьинско-Ауэрбаховский рудный район находится в восточной части Ауэрбаховского вулканоплутонического пояса (D_{1-2}). Этот пояс сформировался в режиме активной континентальной окраины в результате столкновения Тагильской островной дуги с Восточно-Уральским микроконтинентом [13]. В этом районе локализована одноименная вулканотектоническая депрессия, представленная грабен-синклиналью. Она сложена вулканогенно-осадочными и вулканогенными породами краснотурьинской свиты. В ее восточной части находится Ауэрбаховский интрузивный массив габбро-диорит-гранодиоритовой формации (D_{1-2}), комагматичный стратифицированным породам андезитовой формации и сложенный гранитами, гранодиоритами, кварцевыми диоритами, диори-

тами, а также подчиненными габбро и габбро-диоритами. Мелкие тела интрузивных пород имеют средний, реже кислый состав. На контакте карбонатных пород краснотурьинской свиты с Ауэрбаховской интрузией и ее сателлитами развиты многочисленные скарновые, магнетитовые и медномагнетитовые месторождения, характеризующиеся повышенной золотоносностью. В пределах рудного района известно крупное золоторудное месторождение Воронцовское и ряд рудопроявлений золото-сульфидно-кварцевого и золото-кварцевого типов [14].

Тоупугол-Ханмейшорский рудный район представляет собой также крупную вулканотектоническую депрессию и расположен в северо-восточном окончании Малоуральской структурно-формационной зоны (СФЗ) Тагило-Магнитогорской мегазоны на границе с Харбейским кристаллическим выступом. Малоуральская СФЗ сформировалась в среднем палеозое (S_2-C_1). Территория рудного района сложена разнообразными вулканогенно-осадочными породами базальт-андезитобазальтовой формации, характеризующимися переслаиванием обломочных вулканогенно-осадочных пород алевропелитовой, песчанистой и гравийной размерности с потоками базальтов и андезитобазальтов. Вулканогенно-осадочные породы прорываются разновозрастными образованиями собского, конгорского и малоханмейского интрузивных комплексов. В пределах рудного района известны два крупных объекта – месторождения Новогоднее-Монто (Fe-Au-скарновое) и Петропавловское (золото-порфировое), а также ряд рудопроявлений Fe-Au-скарнового и золото-кварцевого/порфирового типов [15].

В процессе дешифрирования была использована трехканальная мозаика, составленная из сцен Landsat 7/ETM+ при комбинации каналов 7–4–2 в растровом формате MrSID. Разрешение на местности ~30 м, площадь около 35 000 м². Дешифрирование проводилась в программе ArcGis. При обработке многоспектральных космических снимков Полярного Урала основное внимание уделялось выявлению дизъюнктивных нарушений (линейных, дуговых, кольцевых и радиально-концентрических). Наиболее четко линеаменты выражаются при каналах раstra RGB = 1:2:2 по резкой границе фототона и рисунку речной сети. Для реконструкции региональных палеовулканических сооружений применялся комплексный подход, основанный на дешифрировании космоснимков,

палеофациальном и морфоструктурном анализе и включающий снятие информативных структурных показателей рельефа и гидрографической сети с различных изображений земной поверхности; выявлялись главнейшие морфоструктурные элементы в региональном масштабе 1:50000; проводилось сопоставление с имеющимися геологическими картами и картографическим материалом. Кроме того, были использованы данные геофизических работ – карта расположений аномалий низкого сопротивления (НС) и вызванной поляризации (ВП) для Тоупугол-Ханмейшорского рудного района – с целью выявления связи дешифрируемых морфоструктур с глубинным строением территории.

В результате было установлено, что Тоупугол-Ханмейшорский рудный район характеризуется широким развитием линейных и кольцевых структур, отчетливо проявляющихся на космоснимках (рисунок, а). Исследуемая территория отвечает крупной кольцевой структуре 2-го порядка диаметром около 10 км. Месторождения Ауэрбаховского рудного поля также локализованы внутри крупной кольцевой структуры (диаметром 18–20 км) телескопированного строения [18] (рисунок, б), указывающего на многоэтапное ее развитие: полученная траектория фокусов демонстрирует, что в целом со временем положение последовательно формировавшихся очагов смещалось с юго-востока на северо-запад.

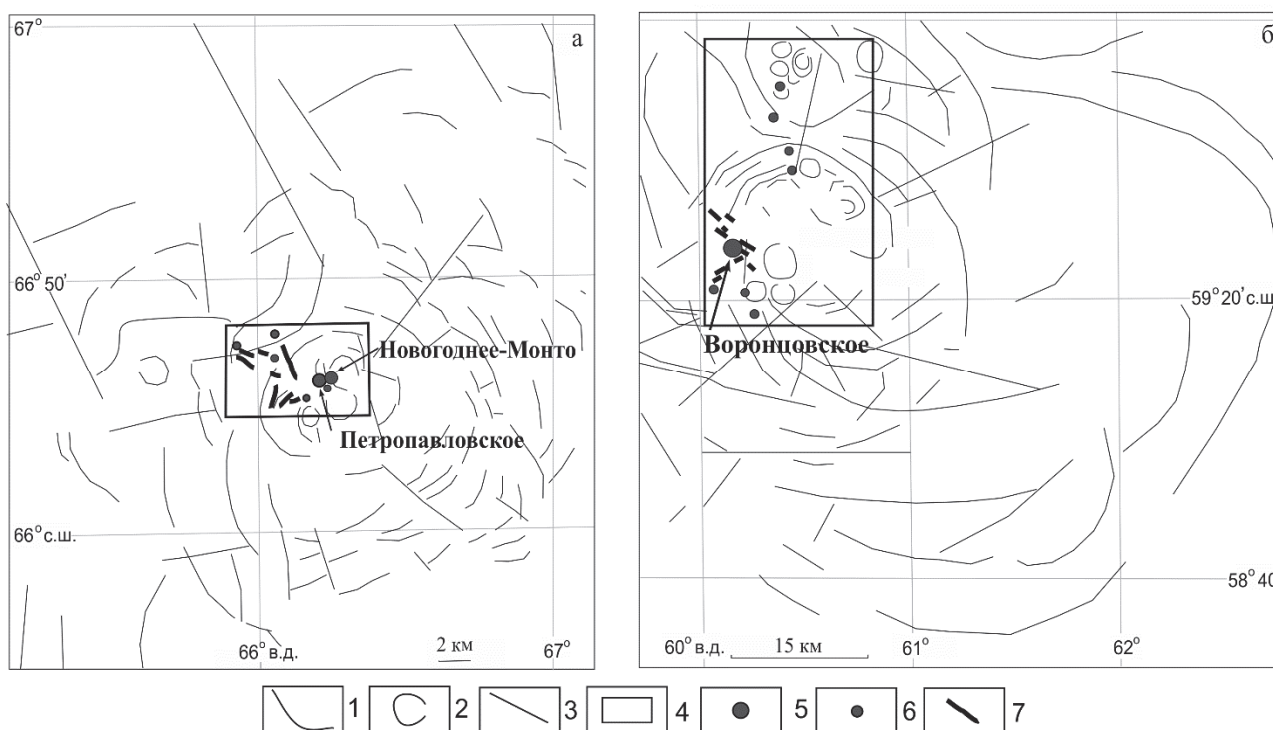


Рисунок. Дешифрирование космоснимков Тоупугол-Ханмейшорского (а) и Турьинско-Ауэрбаховского рудных районов (б):
1–3 – линеаменты: 1 – концентрические морфоструктуры 1 и 2-го порядков, 2 – морфоструктуры центрального типа 3-го порядка, 3 – радиальные морфоструктуры; 4 – контуры рудных районов; 5 – золоторудные месторождения;
6 – золотопроявления; 7 – внемасштабные субвулканические тела порфириновых диоритов

[Figure. Decoding of space imagery of the Toupuogol-Khanmeyshorsky (a) and the Turyinsko-Auerbakhovskiy (b) ore districts:
1–3 – lineaments: 1 – concentric morphostructurals of the 1st and 2nd orders; 2 – morphostructurals of the central type, the 3rd order; 3 – radial morphostructurals; 4 – contours of ore districts; 5 – gold deposits; 6 – gold occurrences;
7 – out-of-scale subvolcanic bodies of porphyrite diorites]

Глубина магматических очагов для Новогодненской структуры составляла порядка 3,5 км, а Ауэрбаховской – около 20 км. Внутреннее строение кольцевых морфоструктур осложнялось пересечением концентрических и/или дуговых разломов радиальными разрывными нарушениями северо-

восточного и северо-западного простирания различных рангов, а также участками сосредоточения мелких кольцевых структур.

Основанный на космодешифрировании комплексный подход позволил выявить приуроченность зон золоторудной минерализации (место-

рождения и рудопроявления) севера Урала к сложно построенной системе кольцевых и радиальных структур. Представляется, что первостепенное значение в рудолокализации играют крупные кольцевые морфоструктуры, реконструированные в качестве корневых частей длительно развивавшихся стратовулканов с глубокофокусными (Ауэрбаховское рудное поле) и относительно мелкофокусными (Новогодненское рудное поле) магматическими очагами. Эти крупные кольцевые структуры осложнены, с одной стороны, радиально ориентированными линеаменами, а с другой – кольцевыми, дугообразными и овальными элементами более высоких порядков.

Таким образом, аналогичные задачи (например, дешифрирование, анализ геолого-структурных особенностей локализации, прогнозирование золоторудной минерализации) могут решаться с использованием не только иностранных КС ДЗЗ, но и отечественных, доступ к информации которых регулируется нормативно-правовыми актами Российской Федерации.

2. Возможности применения отечественных и зарубежных КС ДЗЗ

В настоящее время основными КС ДЗЗ являются системы оптико-электронного (ОЭН) и радиолокационного (РЛН) наблюдения и землеобзора. КС РЛН на сегодняшний день находятся на этапе формулирования задач, которые могут решаться ими в глобальной аэрокосмической сфере. К таким задачам относятся исследования природных ресурсов за счет глобального мониторинга земной поверхности и поиск залежей полезных ископаемых методом подповерхностного зондирования [16]. Основой же существующей системы ДЗЗ являются КС ОЭН.

Использование КА ДЗЗ для получения фото- и радиолокационных изображений подстилающей поверхности сопряжено с некоторыми особенностями: зависимостью периодичности наблюдения определенных районов от баллистического построения орбитальной группировки КА ДЗЗ, а также повышенными требованиями к массогабаритным характеристикам устанавливаемой на борт КА ДЗЗ аппаратуры. Причем как в части обособленного элемента аппаратуры (конкретный оптико- или радиоэлектронный комплекс), так и относительно набора этих элементов: ограниченная номенклатура оптико- или радиоэлектрон-

ных комплексов (ОЭК, РЭК), устанавливаемых на борт одного КА ДЗЗ.

Первая особенность в рамках задач, рассматриваемых в данной статье, нивелируется либо полным отсутствием требований к периодичности наблюдений и оперативности доставки целевой информации, либо несоизмеримо низкой динамикой изменений наблюдаемых объектов и относительно высокой периодичностью наблюдений, проводимых КА ДЗЗ. Вторая – напрямую влияет на разнообразие получаемой целевой информации с борта одного КА ДЗЗ, то есть за счет снижения массогабаритных характеристик каждого отдельного ОЭК или РЭК возможна установка дополнительных разновидностей целевой аппаратуры.

Например, КА Landsat 7 характеризуется небольшим разнообразием целевой аппаратуры и способен осуществлять 8-канальную мультиспектральную (гиперспектральную) съемку с полосой захвата 185 км, с разрешением от 30 до 60 м, а также панхроматическую съемку с аналогичной полосой захвата и разрешением до 15 м (аппаратура ЕТМ+).

К приближенным отечественным аналогам такой аппаратуры можно отнести:

- многозональное оптико-электронное сканирующее устройство (МСУ), разработанное Российским научно-исследовательским институтом космического приборостроения, обеспечивающее съемки в среднем и дальнем ИК-диапазоне, однако обладающее меньшей полосой захвата;

- МСУ среднего разрешения, разработанное Научно-исследовательским и технологическим институтом оптического материаловедения Всероссийского научного центра «Государственный оптический институт имени С.И. Вавилова», обладающее меньшей полосой захвата и более внушительными массогабаритными характеристиками, но при этом имеющее более высокое пространственное разрешение, чем аппаратура ЕТМ+.

- МСУ-100 и МСУ-50, совместно разработанные Институтом космических исследований РАН и АНО «Космос-НТ», характеризующиеся полосой захвата 480 и 940 км и пространственным разрешением 58 и 116 м соответственно. На борт КА устанавливаются МСУ-100 в двух экземплярах для увеличения полосы захвата аппаратуры КА ДЗЗ без потери качества снимков.

Был проведен сравнительный анализ технических характеристик различных съемочных устройств,

устанавливаемых на борт КА ДЗЗ (см. таблицу). Установлено, что снимки, полученные при помощи аппаратуры ETM+ (КА Landsat 7, запущен в 1999 г.), не отвечают современным требованиям по пространственному разрешению, несмотря на то, что для решения задач информационного обеспечения поиска месторождений полезных ископаемых его можно считать достаточным. Аппаратура современных отечественных КА ДЗЗ отвечает большинству существующих требований к качеству получаемых с борта снимков как в части диапазонов наблюдаемого спектра и пространственного разрешения, так и относительно точности их привязки.

В РФ целевое применение отечественных КС ДЗЗ осуществляется Научным центром оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ), являющимся оператором российских космических средств ДЗЗ. НЦ ОМЗ реализует полный цикл работ по

планированию съемки, сбору, стандартной и тематической обработки данных и передаче снимков конечному потребителю [14].

В настоящее время отечественная орбитальная группировка ДЗЗ состоит из 6 действующих КА («Электро-Л» № 2, «Метеор-М» № 2, «Ресурс-П» № 1, № 2, № 3, «Канопус-В» № 1), дополнительно может быть представлена архивная информация еще с 3 КА («Электро-Л» № 1, «Метеор-М» № 1, «Ресурс-ДК» № 1), в дальнейшем планируется увеличение числа действующих КА ДЗЗ за счет запусков КА «Метеор-М» и перспективных разрабатываемых КА «Электро-М», «Арктика-М» и «Метеор-МП». Проведение съемки или предоставление архивной информации осуществляется по заявкам от федеральных и региональных органов исполнительной власти в Госкорпорацию «Роскосмос» [4; 20].

Таблица

Сравнительный анализ технических характеристик отечественных и зарубежных съемочных устройств, устанавливаемых на борт КА ДЗЗ
[Table. Comparative analysis of the technical characteristics of domestic and foreign imaging devices that surveying onboard of SC of ERS]

Съемочные устройства [Surveying equipment]	Landsat 7	Ресурс-П [Resurs-P]				Метеор-М [Meteor-M]			Ресурс-ДК [Resurs-DK]	Канопус-В [Kanopus-V]
		MBA [MHDE]	ШМКВР [HDWMC]	ШМКСР [WRMCMR]	ГСА [HIE]	МСУ-МР [HIE-LR]	КМСС			
Параметры [Parameters]							МСУ-50 [HIE-50]	МСУ-100 [HIE-100, binary]		
Диапазон съемки, мкм [Shooting range, mm]	панхр. [panch.] 0,52–0,9 синий [blue] 0,45–0,52 зеленый [green] 0,53–0,61 красный [red] 0,63–0,69 БИК [NIR] 0,78–0,9 1,55–1,75 2,09–2,35 СИК [MWIR] 10,4–12,5	панхр. [panch.] 0,52–0,9 синий [blue] 0,48–0,52 зеленый [green] 0,54–0,6 красный [red] 0,62–0,68 БИК [NIR] 0,72–0,8 0,8–0,9 СИК [MWIR] н/д	панхр. [panch.] 0,43–0,9 синий [blue] 0,43–0,51 зеленый [green] 0,51–0,58 красный [red] 0,6–0,7 БИК [NIR] 0,7–0,9 СИК [MWIR] н/д	панхр. [panch.] 0,43–0,90 синий [blue] 0,43–0,51 зеленый [green] 0,51–0,58 красный [red] 0,6–0,7 БИК [NIR] 0,7–0,9 СИК [MWIR] н/д	0,4–1,1 (96 каналов) [96 channels]	красный [red] 0,5–0,7 БИК [NIR] 0,7–1,1 1,6–1,8 СИК [MWIR] 3,5–4,1 10,5–11,1 11,5–12,5	зеле- ный [green] 0,37– 0,45 крас- ный [red] 0,45– 0,51 БИК [NIR] 0,58– 0,69 СИК [MWIR] н/д	зеле- ный [green] 0,535– 0,575 крас- ный [red] 0,63– 0,68 БИК [NIR] 0,76– 0,9 СИК [MWIR] н/д	панхр. [panch.] 0,58–0,8 зеленый [green] 0,5–0,6 красный [red] 0,6–0,7 БИК [NIR] 0,7–0,8 СИК [MWIR] н/д	панхр. [panch.] 0,58–0,86 синий [blue] 0,45–0,52 зеленый [green] 0,51–0,6 красный [red] 0,61–0,69 БИК [NIR] 0,75–0,84 СИК [MWIR] н/д
Полоса захвата, км [Field of view, km]	185	185	441	97	25	2800	940	480 (960)	448	20
Пространственное разрешение, м [Spatial resolution, m]	15 (панхр.) [panch.] 30 (БИК) [NIR] 60 (СИК) [MWIR]	1 (панхр.) [panch.] 2–3 (MCP) 120 (MSM)	60 (панхр.) [panch.] 120 (MCP) 24 (MSM)	12 (панхр.) [panch.] 24 (MCP) 24 (MSM)	30 (MCP) [MSM]	около [approximately] 1000	120	60	1 (панхр.) [panch.] 2–3 (MCP) 12 (MSM)	2,5 (панхр.) [panch.] 12 (MCP) 12 (MSM)

Окончание табл. [Table ending]

Съемочные устройства [Surveying equipment]	Landsat 8	SPOT 6 и 7	Sentinel-2A	Sentinel-2B	Pléiades 1	Superview-1-5, Gaojing-1-5	KOMPSAT-3/3A
Диапазон съемки, мкм [Shooting range, mkm]	панхр. [panch.] 0,5–0,68 синий [blue] 0,45–0,51 зеленый [green] 0,53–0,59 красный [red] 0,63–0,67 БИК [NIR] 0,85–0,88 1,57–1,65 2,11–2,29 СИК [MWIR] 10,6–11,2 11,5–12,5	панхр. [panch.] 0,45–0,745 синий [blue] 0,45–0,52 зеленый [green] 0,53–0,59 красный [red] 0,625–0,695 БИК [NIR] 0,76–0,89 СИК [MWIR] н/д	0,44–2,2 (12 каналов) [12 channels]	0,43–2,1 (12 каналов) [12 channels]	панхр. [panch.] 0,47–0,83 синий [blue] 0,43–0,55 зеленый [green] 0,5–0,62 красный [red] 0,590–0,710 БИК [NIR] 0,74–0,94 СИК [MWIR] н/д	панхр. [panch.] 0,45–0,89 синий [blue] 0,45–0,52 зеленый [green] 0,52–0,59 красный [red] 0,63–0,69 БИК [NIR] 0,77–0,89 СИК [MWIR] н/д	панхр. [panch.] 0,45–0,9 синий [blue] 0,45–0,52 зеленый [green] 0,52–0,60 красный [red] 0,63–0,69 БИК [NIR] 0,76–0,9 СИК [MWIR] н/д
Полоса захвата, км [Spatial resolution, km]	185	60	100	100	20	12	1
Пространственное разрешение, м [Spatial resolution, m]	15 (панхр.) [panch.] 30 (БИК) [NIR] 100 (СИК) [MWIR]	10–35	60 (панхр.) [panch.] 10 (MCP) [MSM]	60 (панхр.) [panch.] 10 (MCP) [MSM]	0,7 (панхр.) [panch.] 2,8 (MCP) [MSM]	0,5 (панхр.) [panch.] 2 (MCP) [MSM]	0,6 (панхр.) [panch.] 2/5 (MCP) [MSM]

Условные обозначения: БИК – ближний ИК-диапазон; СИК – средний ИК-диапазон; КМСС – комплекс многозональной спутниковой съемки; МВА – многозональная высокодетальная аппаратура; ШМКВР – широкозахватная мультиспектральная камера высокого разрешения; ШМКСР – широкозахватная мультиспектральная камера среднего разрешения; ГСА – гиперспектральная съемочная аппаратура; МСУ – многозональное съемочное устройство; МР – малое разрешение; MCP – мультиспектральный режим, панхр. – панхроматический

[Legend: NIR – near infrared range; MWIR – medium wave infrared range; MSIC – multispectral satellite imagery complex; MHDE – multi-zone highly detailed equipment; HDWMC – high definition wide-angle multispectral camera; WRMCMR – wide-resolution multispectral camera of medium resolution; HIE – hyperspectral imaging equipment; MID – multi-zone imaging device; LR – little resolution; MSM – multispectral mode; panch. – panchromatic]

Примечание: технические характеристики съемочных устройств приведены с сайтов [18; 19].

[Note: technical characteristics of the shooting devices available from [18; 19].]

Отдельно стоит упомянуть о разрабатываемых сегодня так называемых псевдокосмических аппаратах (ПКА). К ним относятся стратосферные летательные аппараты, функционирующие на высотах 18–30 км, имеющие самолетную компоновочную схему и способные осуществлять долговременное (до 5 лет) беспосадочное барражирование над участками земной поверхности. Основным источником энергии для ПКА являются аккумуляторные батареи, питаемые за счет фотоэлектронных элементов солнечных батарей. Они имеют ряд преимуществ как перед КА, так и пе-

ред традиционными БПЛА [21]. Основные достоинства перед КА – более высокое разрешение оптико-электронных систем, способность барражировать над заданными участком земной поверхности, существенно более низкая стоимость, связанная с отсутствием пусковых услуг космодромов. Главные достоинства перед БПЛА – большая зона обзора, существенно меньшие средства на обслуживание ПКА, более широкие возможности по реализации ретрансляционного способа управления. На сегодняшний день рынок потребителей услуг ПКА в российском сегменте не-

достаточно развит. Интервалы беспосадочного полета ПКА существенно зависят от широтности его географического применения, что связано с особенностями энергообеспечения ПКА.

Разработки и успешные летные испытания ПКА проводились в основном в США в рамках программ HALSOL и ERAST. Разработаны опытные образцы ПКА проектов Pathfinder (высота полета – до 22 500 м, масса полезной нагрузки – до 45 кг), Centurion (высота полета – до 24 000 м, масса полезной нагрузки – до 270 кг), Helios HP01 (высота полета до 29 600 м, масса полезной нагрузки – до 329 кг), серийные образцы ПКА Zephyr/Mercator (высота полета – до 19 000 м, масса полезной нагрузки – до 20 кг, возможность управления через КА-ретранслятор), Global Observer (высота полета – до 20 000 м, масса полезной нагрузки – до 453 кг).

Разрабатываемые иностранные ПКА специального назначения (созданы в рамках программы Vulture) позволяют вести непрерывное наблюдение за территориями на протяжении 5 лет беспосадочного полета на высотах до 27 000 м и с массой полезной нагрузки до 450 кг.

В РФ вопросами разработки ПКА занимается АО «Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина» (ПКА серии «ЛА»). По некоторым оценкам, в нашей стране возможно создание ПКА, способного к беспосадочному полету до 18 месяцев на высотах до 25 000 м с массой полезной нагрузки до 200 кг [21].

Необходимо отметить, что использование ПКА для решения задач в Арктическом регионе (с учетом его климатических особенностей) может потребовать разработки отдельных научно-технических и конструкторских решений в части системы его энергообеспечения.

Заключение

Применение информации КС ДЗЗ для районов Полярного Урала, а также для аналогичных объектов на других труднодоступных территориях России со схожими геолого-структурными условиями локализации и составом слагающих их комплексов, даст возможность получить морфоструктурный план территории в виде упорядоченных систем (кольцевых, дуговых и радиальных структур, к которым приурочена золоторудная минерализация).

Это повысит уверенность в выборе перспективных площадей и поможет оптимизировать даль-

нейшие поисково-оценочные работы, предполетные и полетные этапы геологоразведочных работ. В целом это позволит уменьшить время проведения и стоимость прогнозно-поисковых работ, что немаловажно в экстремальных природно-климатических условиях Крайнего Севера.

Анализ существующих КС ДЗЗ показал, что бортовая аппаратура, установленная на отечественных КА, и получаемая с ее помощью информация отвечают существующим требованиям, предъявляемым к ним для решения задач поиска и прогнозирования оруденения. При этом возможности развернутой отечественной орбитальной группировки КА ДЗЗ превосходят возможности КА ДЗЗ Landsat 7, зарекомендовавшего себя при практическом применении для решения задач поиска и прогнозирования. Учитывая, что информация ДЗЗ иностранных КА находится в ограниченном доступе, целесообразен переход к отечественному оператору ДЗЗ для обеспечения беспрепятственного доступа к геопространственной информации. В перспективе может рассматриваться возможность получения геопространственной информации с использованием ПКА, что должно учитываться заказчиком и разработчиком на стадиях проектирования их специальной аппаратуры.

Список литературы

1. *Киренский А.С., Корчагин В.П., Кузьменко Р.Г.* Опыт тектонического районирования с использованием космических снимков // *Методы дистанционных исследований для решения природоведческих задач*. 1986. С. 54–62.
2. *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 // *Economic Geology*. 2018. Vol. 113 (2). Pp. 489–510. doi:10.5382/econgeo.2018.4559
3. *Меньшиков В.А., Перминов А.Н., Рембеза А.И. и др.* Основы анализа и проектирования космических систем мониторинга и прогнозирования природных и техногенных катастроф. М.: Машиностроение, 2014. 736 с.
4. *Nezampour M.H., Rassa I.* Using remote sensing technology for the determination of mineralization in the Kal-e-Kafi porphyritic deposit, Anarak, Iran // *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. 2005. Pp. 565–567. doi.org/10.1007/3-540-27946-6_145
5. *Зверев А.Т., Малинников В.А., Ареллано-Баэса А.* Прогноз месторождений рудных полезных ископаемых на территории Чили на основе линейного анализа космических изображений // *Известия высших учебных*

заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2005. № 6. С. 62–69.

6. *Tommaso I.D., Rubinstein N.* Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina // *Ore Geology Reviews*. 2007. Vol. 32. Issue 1–2. Pp. 275–290. doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.05.004

7. *Zhang X., Pazner M., Duke N.* Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) // *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2007. Vol. 62. Issue 4. Pp. 271–282. doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.04.004

8. *Миловский Г.А., Рудаков В.В., Лебедев В.В. и др.* Применение космической съемки для прогноза золоторудного оруденения в зонах глубинных разломов на Северо-Востоке России // *Исследование Земли из космоса*. 2010. № 3. С. 30–34.

9. *Зверев А.Т., Гаврилова В.В.* Разработка теории и методов оценки и прогноза состояния природных ресурсов с использованием космических снимков // *Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка*. 2012. № 5. С. 44–47. doi.org/10.24057/2414-9179-2017-3-23-178-194

10. *Vural A., Corumluoglu Ö., Asri I.* Remote sensing technique for capturing and exploration of mineral deposit sites in Gumushane metallogenic province, NE Turkey // *Journal Geology Society of India*. 2017. Vol. 90. Issue 5. Pp. 628–633. doi.org/10.1007/s12594-017-0762-0

11. *Yousefi T., Aliyari F., Abedini A., Asghar Calagari 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 Journal of Geosciences*. 2018. Vol. 11. Pp. 1–19. doi.org/10.1007/s12517-018-3822-x

12. *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 (в печати).

13. *Язева Р.Г., Бочкарев В.В.* Войкарский вулканоплутонический пояс (Полярный Урал). Свердловск: УНЦ АН СССР, 1984. 156 с.

14. *Викентьев И.В., Мурзин В.В., Тюкова Е.Э. и др.* Воронцовское золоторудное месторождение. Геология,

формы золота, генезис. Екатеринбург: Форт Диалог-Исеть, 2016. 204 с.

15. *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.

16. *Выхристенко Р.И.* Палеовулканические постройки Турьинско-Ауэрбаховского и Валенторского рудных районов и связанные с ними месторождения золота и меди // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2014. № 4. С. 122–128.

17. *Верба В.С., Неронский Л.Б., Осипов И.Г., Туррук В.Э.* Радиолокационные системы землеобзора космического базирования / под ред. В.С. Вербы. М.: Радиотехника, 2010. 680 с.

18. Сайт Научного центра оперативного мониторинга Земли. URL: http://www.ntsomz.ru/ks_dzz/satellites

19. Характеристики съемочных устройств. URL: <https://eos.com>

20. *Емельянова Ю.Г., Хачумов В.М., Ватутин В.М. и др.* Анализ баз данных решения задач мониторинга Арктической зоны // *Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий: сборник трудов VIII Всероссийской научно-технической конференции, 1–3 июня 2016 г. М.: АО «РКС», 2016.*

21. *Клименко Н.Н.* Псевдокосмические аппараты для длительного непрерывного наблюдения локальных районов // *Вестник НПО имени С.А. Лавочкина*. 2017. № 4 (38). С. 122–134.

Для цитирования

Иванова Ю.Н., Иванов К.С., Бондарева М.К., Ермолаев В.А., Жуков А.О. Опыт и возможности применения космических систем дистанционного зондирования Земли для прогнозирования золоторудного оруденения на труднодоступных территориях на примере Полярного Урала // *Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования*. 2019. Т. 20. № 2. С. 123–133. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-123-133>

Experience and opportunities of space systems applications of Earth remote sensing to prediction gold mineralization on difficult to approach areas on the example of the Polar Urals

Julia N. Ivanova

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of Russian Academy of Sciences,
35 Staromonetny Lane, Moscow, 119017, Russian Federation
Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St., Moscow, 117198, Russian Federation

Kirill S. Ivanov, Marina K. Bondareva, Vladimir A. Ermolaev

Titov Main Test and Space Systems Control Centre, 3 Oktyabrskaya St., Krasnoznamensk, 141090, Russian Federation

Alexander O. Zhukov

Lomonosov Moscow State University, 13 Universitetsky Ave., Moscow, 119234, Russian Federation

Article history:

Received: March 05, 2019

Revised: May 16, 2019

Accepted: May 23, 2019

Keywords:

Earth remote sensing; spacecraft; spectrozonal satellite imagery; prediction; gold mineralization; the Polar Urals

The questions of the using of domestic and foreign spacecraft (SC), as well as Earth remote sensing (ERS) equipment for search and predication of gold mineralization on the example of the promising and difficult to approach areas of the Polar and the Northern Urals are discussed in the article. The solution of this problem is showed on the example of the prospective areas of the Arctic and the Northern Urals based on analysis of Landsat 7 multispectral images. Hidden structures (arc, annular, and radial) were detected with help of analyses of Landsat 7 imagery. Hidden structures determine the position of gold mineralization of the Toupugol-Hanmeyshorskogo (the Novogodnenskoe ore field, the Polar Urals) and the Turinsko-Auerbachovskogo (the Auerbachovskoe ore field, the Northern Urals) ore regions. The decision of this problem is given on the example of the promising territory of the Polar Urals with the use foreign SC the Landsat 7. Comparative analysis of the existing SC of ERS has been carried out, this target information has in the public domain. The onboard equipment installed on domestic spacecraft and the information obtained with use onboard equipment meets the existing requirements. These requirements are placed to onboard equipment to solve the problem of search and predication mineralization. At the same time, the capabilities of the deployed domestic orbital grouping of SC of ERS transcend the capabilities of SC of ERS the Landsat 7. Opportunity of obtaining geospatial information with the use of pseudospacecrafts is being considered. These have several advantages over SC and unmanned aerial vehicles.

References

1. Kirensky AS, Korchagin VP, Kuzmenko RG. Opyt tektonicheskogo rayonirovaniya s ispol'zovaniyem kosmicheskikh snimkov [Experience of tectonic zoning with the use of satellite imagery]. *Metody distantsionnykh issledovaniy dlya resheniya prirodovedcheskikh zadach*. 1986: 54–62. (In Russ.)
2. Graham GE, Kokaly RF, Kelley KD, et al. Application of imaging spectroscopy for mineral exploration in

Alaska: a study over porphyry Cu deposits in the Eastern Alaska Range. *Economic Geology*. 2018;11(2): 489–510.

3. Menshikov VA, Perminov AN, Rembeza AI, et al. Osnovy analiza i proyektirovaniya kosmicheskikh sistem monitoringa i prognozirovaniya prirodnykh i tekhnogenykh katastrof [*Base of analysis and design of space systems for monitoring and predication natural and man-made disasters*]. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 2014. (In Russ.)

4. Nezampour MH, Rassa I. Using remote sensing technology for the determination of mineralization in the Kal-e-Kafi porphyritic deposit, Anarak, Iran. *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. 2005: 565–567. Available from: doi.org/10.1007/3-540-27946-6_145

5. Zverev AT, Malinnikov VA, Arellano-Baeza A. Prognoz mestorozhdeniy rudnykh poleznykh iskopyemykh na territorii Chili na osnove lineamentnogo analiza

Julia N. Ivanova – researcher in Laboratory of Geology of Ore Deposits of IGEM RAS; Associate Professor of the Department of Geology, Mining and Oil and Gas Industry of Academy of Engineering, PhD; jnivanova@yandex.ru

Kirill S. Ivanov – head of the 101 Scientific Testing Laboratory, Deputy Head of the 10 Scientific Testing Department, PhD.

Marina K. Bondareva – leading researcher of the 11th Scientific Testing Department, Doctor of Sciences, Associate Professor.

Vladimir A. Ermolaev – senior researcher, 101 Research Laboratory.

Alexander O. Zhukov – leading researcher of Sternberg Astronomical Institute, Doctor of Sciences, Associate Professor.

kosmicheskikh izobrazheniy [Forecast of mineral deposits in Chile based on lineament analysis of satellite images]. *Izvestiya vishchikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyemka [Proceedings of the Higher Educational Institutions. Geodesy and aerophotosurveying]*. 2005; 6: 62–69. (In Russ.)

6. Tommaso ID, Rubinstein N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiermillo porphyry deposit, Argentina. *Ore Geology Reviews*. 2007;32(1–2): 275–290.

7. Zhang X, Pazner M, Duke N. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California). *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2007;62(4): 271–282.

8. Milovsky GA, Rudakov VV, Lebedev VV, Koryuk MK, Shaibakova LA, Filippov DV. Primeneniye kosmicheskoy s"yemki dlya prognoza zolotogo orudneniya v zonakh glubinnykh razlomov na Severo-Vostoke Rossii [Application of space borne survey for forecasting of gold mineralization in deep fault zones in the North-East of Russia]. *Earth observation and remote sensing*. 2010;3: 30–34. (In Russ.)

9. Zverev AT, Gavrilova VV. Razrabotka teorii i metodov otsenki i prognoza sostoyaniya prirodnykh resursov s ispol'zovaniyem kosmicheskikh snimkov [Development of the theory and methods for assessing and prediction of natural resources state with use of satellite imagery]. *Izvestiya vishchikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosyemka [Proceedings of the Higher Educational Institutions. Geodesy and aerophotosurveying]*. 2012;5: 44–47. (In Russ.)

10. Vural A, Corumluoglu Ö, Asri I. Remote sensing technique for capturing and exploration of mineral deposit sites in Gumushane metallogenic province, NE Turkey. *Journal Geology Society of India*. 2017;90(5): 628–633. Available from: doi.org/10.1007/s12594-017-0762-0

11. Yousefi T, Aliyari F, Abedini A, Asghar Calagari 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 Journal of Geosciences*. 2018;11: 1–19.

12. Ivanova JN, Vyhristenko RI, Vikentyev IV. Geologicheskaya pozitsiya i strukturnyy kontrol' orudneniya Toupugol-Khanmeyshorskogo rayona (Polyarnyy Ural) po rezul'tatam distantsionnogo zondirovaniya [Geological position and structural control of ore mineralization of the Toupugol-Khanmeyshorsky district (the Polar Urals) as a result of remote sensing]. *Earth Observation and Remote Sensing*. 2019. (In press.) (In Russ.)

13. Yazeva RG, Bochkarev VV. *Voykarskiy vulkano-plutonicheskiy poyas (Polyarnyy Ural) [Voikarsky volcano-plutonic belt (the Polar Urals)]*. Sverdlovsk: USC of USSR Academy of Sciences; 1984. (In Russ.)

14. Vikentiev IV, Murzin VV, Tyukova EE, et al. Vorontsovskoye zolotorudnoye mestorozhdeniye. Geo-

logiya, formy zolota, genezis [*Vorontsovskoe gold deposit. Geology, forms of gold, genesis*]. Ekaterinburg: Fort Dialog-Iset Publ.; 2016. (In Russ.)

15. Vikentyev IV, Ivanova YN, Tyukova EE, et al. Zoloto-porfirovoye Petropavlovskoye mestorozhdeniye (Polyarnyy Ural): geologicheskaya pozitsiya, mineralogiya i usloviya obrazovaniya [Porphyry-Style Petropavlovskoe Gold Deposit, the Polar Urals: Geological Position, Mineralogy, and Formation Conditions]. *Geology of Ore Deposits*. 2017;59(6): 482–520. (In Russ.)

16. Vyhristenko RI. Paleovolcanicheskiye postroyki Tur'insko-Auerbakhovskogo i Valentorskogo rudnykh rayonov i svyazannyye s nimi mestorozhdeniya zolota i medi [Paleovolcanic structures of the Turiyinsko-Auerbakhovskiy and the Valentorskiy ore districts and the gold and copper deposits connected with them]. *Bulletin of Peoples' Friendship University of Russia. Series: Engineering researches*. 2014;4: 122–128. (In Russ.)

17. Verba VS. (ed.) *Radiolokatsionnyye sistemy zemleobzora kosmicheskogo bazirovaniya [Radiolocation system of ground view of space-based ground]*. Moscow: Radiotekhnika Publ.; 2010. (In Russ.)

18. The scientific center for operational Earth monitoring. Available from: http://www.ntsomz.ru/ks_dzz/satellites

19. Characteristic of the shooting devices. Available from: <https://eos.com>

20. Yemelyanova JG, Khachumov VM, Vatutin VM, et al. Analiz baz dannykh resheniya zadach monitoringa Arkticheskoy zony [Analysis of databases for solving problems of monitoring the Arctic zone]. *Aktual'nyye problemy raketno-kosmicheskogo priborostroyeniya i informatsionnykh tekhnologiy: Sbornik trudov VIII Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 1–3 iyunya 2016 [Actual problems of rocket and space instrument engineering and information technologies: Collection of works of the VIII All-Russian Scientific and Technical Conference, June 1–3, 2016]*. Moscow: AO "RKS"; 2016. (In Russ.)

21. Klimenko NN. Pseudokosmicheskiye apparaty dlya dlitel'nogo nepreryvnogo nablyudeniya lokal'nykh rayonov [Pseudo-spacecrafts for long-term continuous observation of local areas]. *Vestnik NPO imeni S.A. Lavochkina*. 2017;4(38): 122–134. (In Russ.)

For citation

Ivanova JuN, Ivanov KS, Bondareva MK, Ermolaev VA, Zhukov AO. Experience and opportunities of space systems applications of Earth remote sensing to prediction gold mineralization on difficult to approach areas on the example of the Polar Urals. *RUDN Journal of Engineering Researches*. 2019;20(2): 123–133. <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-2-123-133>. (In Russ.)