

ПРИМЕНЕНИЕ КОСМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОМ АНАЛИЗЕ ТЕРРИТОРИИ АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ

А. В. Волков, А. Л. Галямов, П. Е. Белоусов, А. А. Вольфсон

ФГБУН Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН
(Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 8 апреля 2020 г.

Сегодня космонавтика – это прежде всего исследования в фундаментальной науке, которые, в свою очередь, создают прикладные технологии. В статье рассмотрены космические технологии, нашедшие применение в металлогеническом анализе. Выделено несколько направлений: многозональная космическая съемка (ASTER, Landsat и др.), развитие глобальных моделей глубинного строения земной коры и верхней мантии (на основе GOCE), визуализация металлогенических данных. Авторы полагают, что космические технологии крайне важны для металлогенического анализа. Их применение имеет большое значение и для прогнозирования новых месторождений стратегических металлов в отдаленных слабоизученных районах Арктической зоны России.

Ключевые слова: Арктическая зона, космические технологии, дистанционное зондирование, гравиметрическая космическая съемка, модель, земная кора, верхняя мантия, металлогенический анализ.

Введение

В последние годы наблюдается переход космонавтики к коммерческому этапу развития. По прогнозам экспертов космическая экономика к 2040 г. вырастет более чем втрое, а прибыли превысят триллион долларов [1]. С другой стороны, космонавтика сегодня — это прежде всего развитие исследований в фундаментальной науке, в результате которых создаются новые прикладные технологии. Последние направлены на решение многих важнейших практических задач, одна из них — металлогенический анализ, главная цель которого — прогноз и выявление месторождений полезных ископаемых. В результате создаются прогнозно-металлогенические карты, задающие направление геолого-разведочных работ, открываются новые месторождения.

Следует отметить, что в системе геологической службы России применение материалов космических съемок стало обязательным при проведении геолого-съёмочных работ и создании госгеолкарт нового поколения [2]. Однако в отечественной металлогении результаты дистанционного зондирования Земли из космоса применяются пока недостаточно по сравнению с зарубежным опытом.

Вместе с тем космические технологии крайне важны для металлогенического анализа, особенно удаленных слабо освоенных территорий. Ниже рассмотрено несколько направлений использования космических технологий на современном этапе: (1) многозональная космическая съемка (ASTER, Landsat и др.), (2) развитие глобальных моделей глубинного строения земной коры и верхней мантии (на основе гравиметрических данных GOCE — Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer), (3)

визуализация металлогенических данных. Особое внимание в статье уделено второму из перечисленных направлений.

Современные прогнозно-металлогенические построения на основе космических технологий невозможны без подготовки ГИС-проекта, сочетающего материалы дистанционного зондирования Земли и базу данных месторождений полезных ископаемых. При ГИС-анализе применяются известные методические приемы, заложенные в аналитический аппарат ARCMAP, MAPINFO и других картографических математико-аналитических систем, а также разработанные авторами новые методические подходы. Наиболее эффективными показали себя устоявшиеся методы выявления и оценки пространственных связей (растровой алгебры, нечеткой логики, вероятностного анализа и др.).

Настоящая публикация продолжает серию статей, посвященных минеральным ресурсам Арктики и подготовленных в ходе проведения исследований в Институте геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН).

Многозональная космическая съемка

Программа «Landsat» — продолжительный проект по дистанционному зондированию Земли из космоса (с 1972 г. по настоящее время). Последний из спутников программы Landsat 8 выведен на орбиту 11 февраля 2013 г. Спутники Landsat сделали огромное количество снимков поверхности Земли, которые лежат в основе многих научных исследований, в том числе и в области геологии и металлогении. На основе компьютерной обработки и анализа данных космических съемок (Landsat и др.) производится дешифрирование структурных элементов земной поверхности, которые представлены линейными, дугowymi, кольцевыми, зонально-концентрическими линеаментами первого (11—35 км), второго (5—10 км) и третьего (менее 5 км) рангов [3]. Из опубликованных прогнозно-поисковых моделей выбираются структурные элементы (прогнозно-поисковые признаки), контролирующее размещение месторождений различных геолого-промышленных типов. Сочетание благоприятных прогнозно-поисковых признаков, выявленных при дешифрировании многозональных космических снимков, позволяет наметить перспективные площади для поисков новых месторождений.

С 2001 г. для выбора перспективных площадей в труднодоступных, удаленных и пустынных районах Западной Африки, Южной и Центральной Америки, Восточной Африки, Канады, Австралии, Средней Азии успешно применяется космическая съемочная система TERRA (платформа ASTER). Платформа ASTER — результат сотрудничества между американским Национальным управлением по аэронавтике и исследованию космического пространства (NASA) и японским Министерством экономики и тор-

говли (METI). ASTER — представитель нового поколения космических аппаратов для дистанционного зондирования, обеспечивающий стереоскопические возможности для создания трехмерных карт земной поверхности.

Съемка земной поверхности из космоса производится при помощи прибора ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer — усовершенствованный термально-оптический радиометр космического базирования), который наряду с четырьмя другими устройствами установлен на борту американского спутника Terra. Основное преимущество — широкий спектральный диапазон и возможность стереосъемки. ASTER производит изображения с использованием инфракрасного (ИК), красного и зеленого диапазонов длин волн света и обеспечивает высокое спектральное разрешение в 14 диапазонах с пространственным разрешением соответственно 15, 30 и 90 м и размером кадра 60×60 км.

Одна из главных областей применения ASTER — поиск и обоснование перспективных площадей под геолого-разведочные работы на рудные и нерудные полезные ископаемые. Этот спутник повысил точность дистанционных прогнозных карт как за счет пространственного разрешения, так и с точки зрения разнообразия минералов, которые могут быть на них нанесены. Средний ИК диапазон оптимален для распознавания минералов, в особенности гидратированных минералов в глинистых почвах, а коротковолновые ИК диапазоны — для идентификации оксидов железа, глин, слюд, железомagneвых силикатов. Создание трехмерных изображений реализовано посредством получения стереопар — снимков одних и тех же участков поверхности в видимом и инфракрасном диапазонах с небольшим сдвигом. Поскольку данные спутника охватывают 99% земной суши, он стал востребован для оценки геологии и металлогении отдаленных районов.

Рудный район Куприт (США, штат Невада) был выбран в качестве эталона для проверки ASTER. На основании спектрозональных снимков этого спутника была составлена карта (рис. 1) распределения мусковита, кальцита, алунита, опала и других минералов [4]. Эта карта была заверена полевыми работами, которые подтвердили ее достоверность. С помощью ASTER в 2003 г. был выявлен рудный район Сар Чесмен в Центральном Иранском вулканическом поясе [5], а в 2005 г. — золоторудный район Лос Меникос в Аргентине [6], а также гигантское медно-порфировое месторождение Рекодик в Пакистане [7]. С помощью этой системы были обнаружены новые золоторудные площади в Иране [8]. Однако коротковолновые инфракрасные каналы ASTER прекратили работу в апреле 2008 г. из-за отказа криокулера. В последние годы исследователи комбинируют данные ASTER с данными Landsat 8 (OLI/TIRS), что позволяет получить более информативные карты минеральной зональности [9].

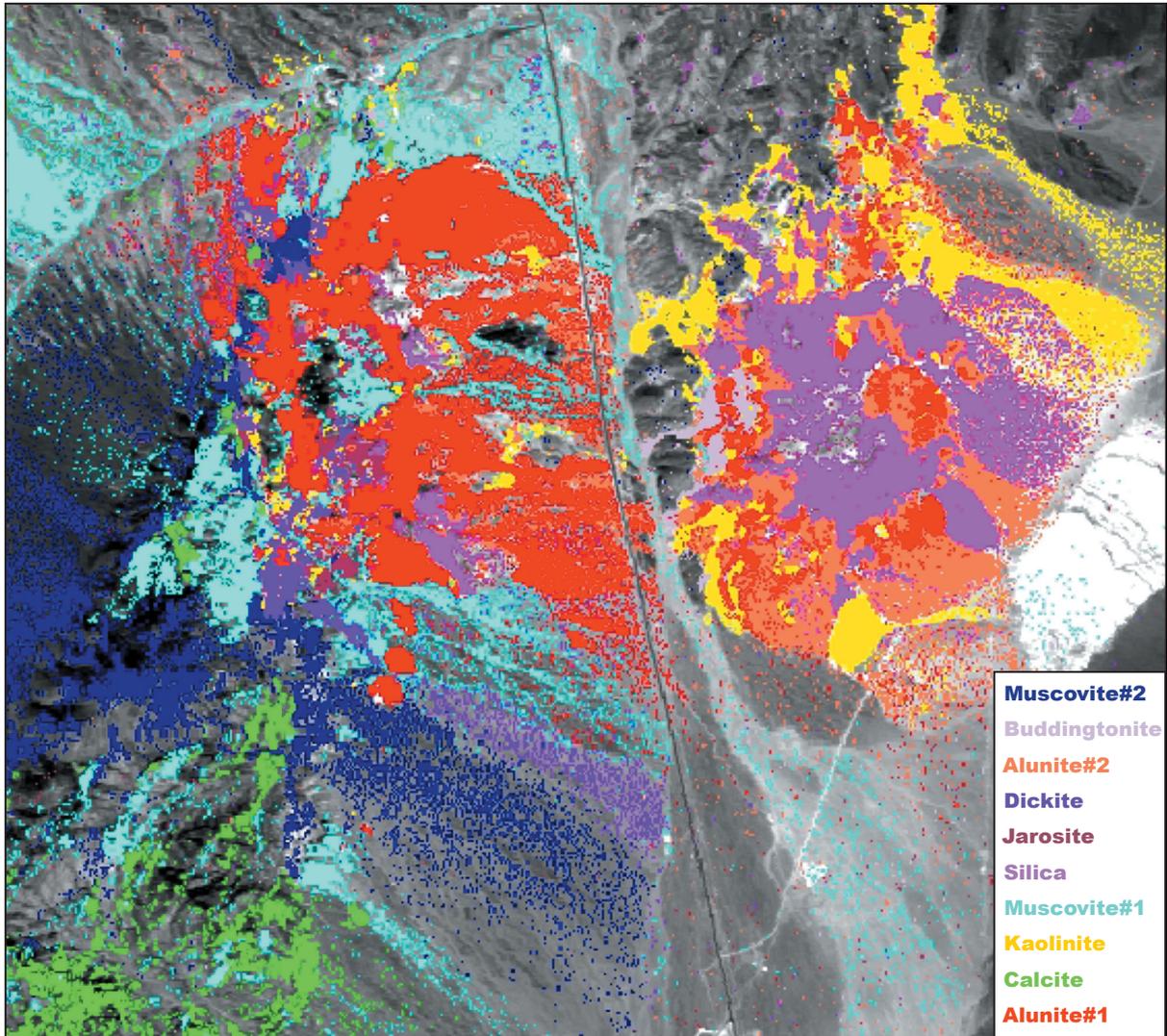


Рис. 1. Фрагмент минералогической карты рудного района Куприт (США, штат Невада) на основе космического снимка АСТЕР [4], пространственное разрешение 15 м. Цвет названий минералов соответствует их полям на карте

Fig. 1. A fragment of the Cuprite ore region (USA, Nevada), based on the ASTER satellite image [4], spatial resolution 15 m. The color of the mineral names corresponds to their fields on the map

Согласно договоренности между США и Японией весь архив данных (любые сцены и производные продукты), полученных системой ASTER, с 1 апреля 2016 г. находится в бесплатном доступе для всех желающих (<http://asterweb.jpl.nasa.gov/data.asp>).

Новая эра наступила в 2014 г. с вводом в эксплуатацию многоспектрального спутника высокого разрешения WorldView-3, который обеспечивает высокое спектральное разрешение в 16 диапазонах и позволяет точнее идентифицировать более широкий диапазон минералов (по сравнению с ASTER), особенно в метасоматитах, связанных с минерализованными рудообразующими системами [10]. Пространственное разрешение от 1,25 до 3,7 м для анализа минералов — главное преимущество этого спутника. Для получения максимальной отдачи от снимков WorldView-3 компания «Effigis» разрабо-

тала инновационный подход, объединяющий обработку спутниковых снимков с анализом имеющихся геологических, геофизических и геохимических баз данных. «Effigis» провела исследование минералов, полученных на основе спектрального анализа данных WorldView-3 в том же районе Куприт, где проверялись данные ASTER [10]. В результате были с высокой точностью определены следующие минералы: кальцит, мусковит, каолинит, дикит, алунит и опал. Минеральные зоны, установленные спутником, были заверены в полевых геологических маршрутах. Коэффициент корреляции превысил 80% [10].

В пределах вулканических поднятий (Кайэнмываамского, Пепенвеемского и др.) внутренней и восточной фланговых зон чукотской части позднемелового окраинно-континентального Охотско-Чукотского вулканического пояса (ОЧВП) выявлены



Рис. 2. Аргиллизитовые «шляпы» рудопроявления Комплексное. Вид с вертолета
Fig. 2. Argillite “hats” of the Kompleksnoye ore occurrence. The view from the helicopter

многочисленные изометричные (овальные) в плане аргиллизитовые «шляпы» диаметром от 200 до 900 м, сложенные красными и светло-серыми глинистыми образованиями (рис. 2). В современном рельефе аргиллизитовые «шляпы» выражены пологими куполами и венчают субвулканические тела гранитоидов и эксплозивных брекчий. Серия аргиллизитовых «шляп» обрамляется вытянутыми линзовидными телами вторичных кварцитов, образующих крупные кольцевые вулканоструктуры (см. рис. 2). Минеральный состав аргиллизитов: иллит-сметтит (смешаннослойное образование), каолинит, мусковит, ярозит, кварц и рутил. В известной прогнозно-поисковой модели аргиллизитовые «шляпы» обычно развиты на верхнем близповерхностном (до 300 м) слабо эродированном уровне порфирово-эпитептермальной минералообразующей системы [11; 12]. Аргиллизитовые «шляпы» — важный прогнозный критерий двух типов оруденения: на близповерхностном уровне — эпитептермального Au-Ag, а на более глубинном — Cu-Mo-Au-порфирового [11; 12]. Многозональная космическая съемка, в частности ASTER, позволит не только выявить новые аргиллизитовые «шляпы» на площади ОЧВП, но и определить их состав и зональность. Следует отметить благоприятные условия для космической съемки — отсутствие густой древесной растительности (тайги).

Глобальные модели глубинного строения земной коры и верхней мантии

Космический аппарат GOCE (массой 1 т) был выведен с российского космодрома Плесецк ракетой-носителем «Рокот» на низкую солнечно-синхронную

орбиту 17 марта 2009 г. GOCE — спутник Европейского космического агентства (ESA), сочетающий гравиразведку и GPS-трекинг для определения среднего гравитационного поля Земли с беспрецедентными точностью и пространственным разрешением [13]. Для обеспечения максимально возможной точности измерений была выбрана весьма низкая орбита — 260 км над поверхностью Земли (приблизительно на 500 км ниже, чем орбиты других научных спутников, в частности ASTER). В результате миссии GOCE (2009—2013 гг.) составлена новая сверхточная гравитационная карта Земли [14]. Кроме того, более точно определена форма планеты, измерены сила тяготения в различных регионах и плотность земной коры. Создаваемые модели земной коры на основе сейсмических данных и разрезов были согласованы с наблюдаемым GOCE гравитационным полем. Проект GEMMA, также финансируемый ESA, выполнил оценку границы между земной корой и мантией (Мохо) на основе полученных GOCE данных [14].

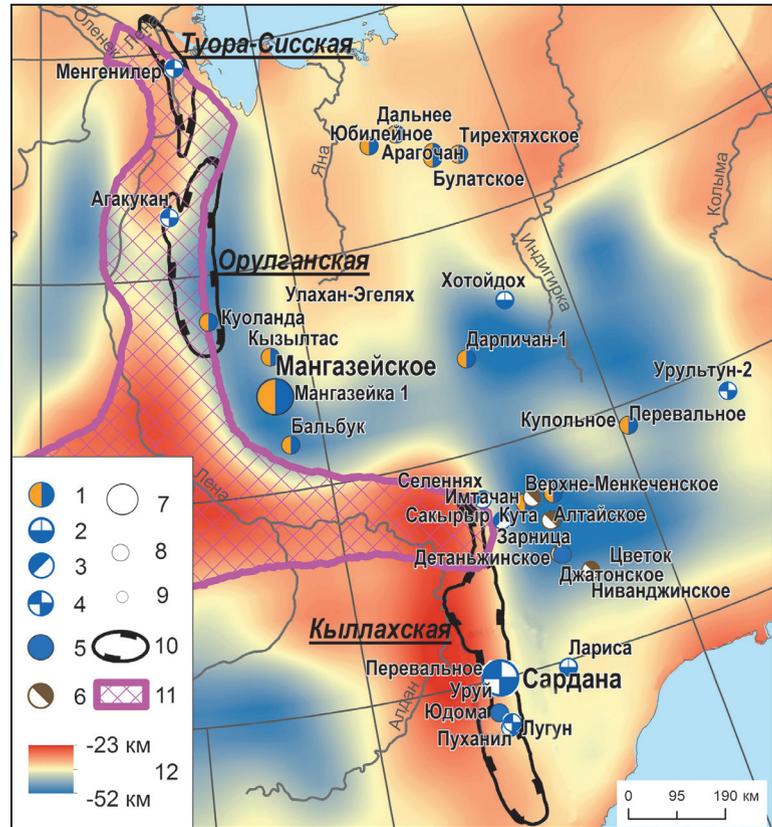
Для объяснения закономерностей размещения и особенностей формирования месторождений различных формационных типов нами применены современные глобальные модели глубинного строения земной коры: модели глубины поверхности Мохо, мощности и строения осадочного чехла, модель CRUST1.0, унаследованная из модели CRUST2.0 [15; 16], модель плотности и термального режима верхней мантии [17; 18]. Типы коры определялись в зависимости от возраста фундамента или тектонических условий [17]. Данные осадочных слоев в основном соответствует модели [19]. В преде-

Рис. 3. Позиция Pb-Zn и Ag-полиметаллических месторождений северо-востока России в структуре поверхности Мохо (составлена с использованием материалов [17]).

Месторождения: 1 – Ag-полиметаллические, 2 – колчеданно-полиметаллические в терригенных породах, 3 – колчеданно-полиметаллические в вулканогенно-карбонатных породах, 4 – стратиформные Pb-Zn в карбонатных породах, 5 – полиметаллические жильные, 6 – Sn-Ag-полиметаллические жильные. Масштаб месторождений: 7 – крупные, 8 – средние-мелкие, 9 – рудопроявления, 10 – контуры металлогенических зон MVT месторождений, 11 – Лено-Вилуйская нефтегазовая провинция; 12 – глубина до поверхности Мохо

Fig. 3. The position of the Pb-Zn and Ag-polymetallic deposits in the North-East of Russia in the structure of the Moho surface (using [17]).

Deposits: 1 – Ag-polymetallic, 2 – pyrite-polymetallic in terrigenous rocks, 3 – pyrite-polymetallic in volcanic-carbonate rocks, 4 – stratiform Pb-Zn in carbonate rocks, 5 – polymetallic veins, 6 – Sn-Ag-polymetallic veins. The scale of deposits: 7 – large, 8 – medium-small, 9 – occurrences, 10 – contours of metallogenic zones of MVT deposits, 11 – Leno-Vilyui oil and gas province; 12 – the depth of the Moho surface



лах осадочного слоя при его мощности около 20 км отмечаются сравнительно низкие сейсмические скорости. Поскольку сейсмическая скорость изменяется скачками с глубиной, в осадочном слое были выделены три горизонта (сверху вниз): мощностью 2 км, 5 км и третий, наиболее мощный, расположенный ниже 7 км [15; 16].

На основе моделей глубинного строения земной коры (рассмотренных выше) в последние годы нами были получены следующие результаты.

На восточной окраине Сибирской платформы пространственное размещение месторождений миссисипского типа (Mississippi Valley-type — MVT) совпадает с поднятиями (астеносферными) поверхности МОХО (рис. 3). Районы распространения месторождений MVT расположены на флангах крупной Лено-Вилуйской газонефтеносной провинции. В результате этих исследований выявлены новые региональные прогнозно-поисковые признаки месторождений MVT и может быть предложено направление поисковых геолого-разведочных работ в Арктической зоне России.

В результате сравнительного металлогенического анализа закономерностей размещения месторождений золота карлинского типа (МЗКТ) Верхоянской, Невадийской и Южно-Китайской металлогенических провинций [20] было выявлено сходство геодинамических обстановок невадийских и сакындин-

ских МЗКТ и подтверждены высокие перспективы открытия крупных месторождений данного типа в этом арктическом районе Якутии. Новые рудные районы с МЗКТ прогнозируются на всем протяжении Черско-Полосуненского покровно-складчатого пояса (Колымской петли) [20].

Визуализация металлогенических данных

Космические технологии успешно применяются для визуализации металлогенических данных (ВМД), так как обеспечивают большую обзорность и объективность. ВМД — важная составная часть металлогенического анализа, ориентированного на обработку больших объемов разноплановой картографической информации и цифровых баз данных. Особенно важна визуализация конечных результатов металлогенического анализа — составление качественных прогнозных карт. В металлогеническом анализе наиболее часто используется гибридная презентационно-исследовательская форма визуализации данных, направленная на одновременное отображение большого числа разнотипных данных. Кроме того, она может быть связана с инфографикой, которая представляет собой комбинацию иллюстраций, рисунков, таблиц и текста.

Продемонстрируем возможности гибридной ВМД на примере Арктики. Представленная на рис. 3 карта, составленная на основе данных GOCE [18], пока-

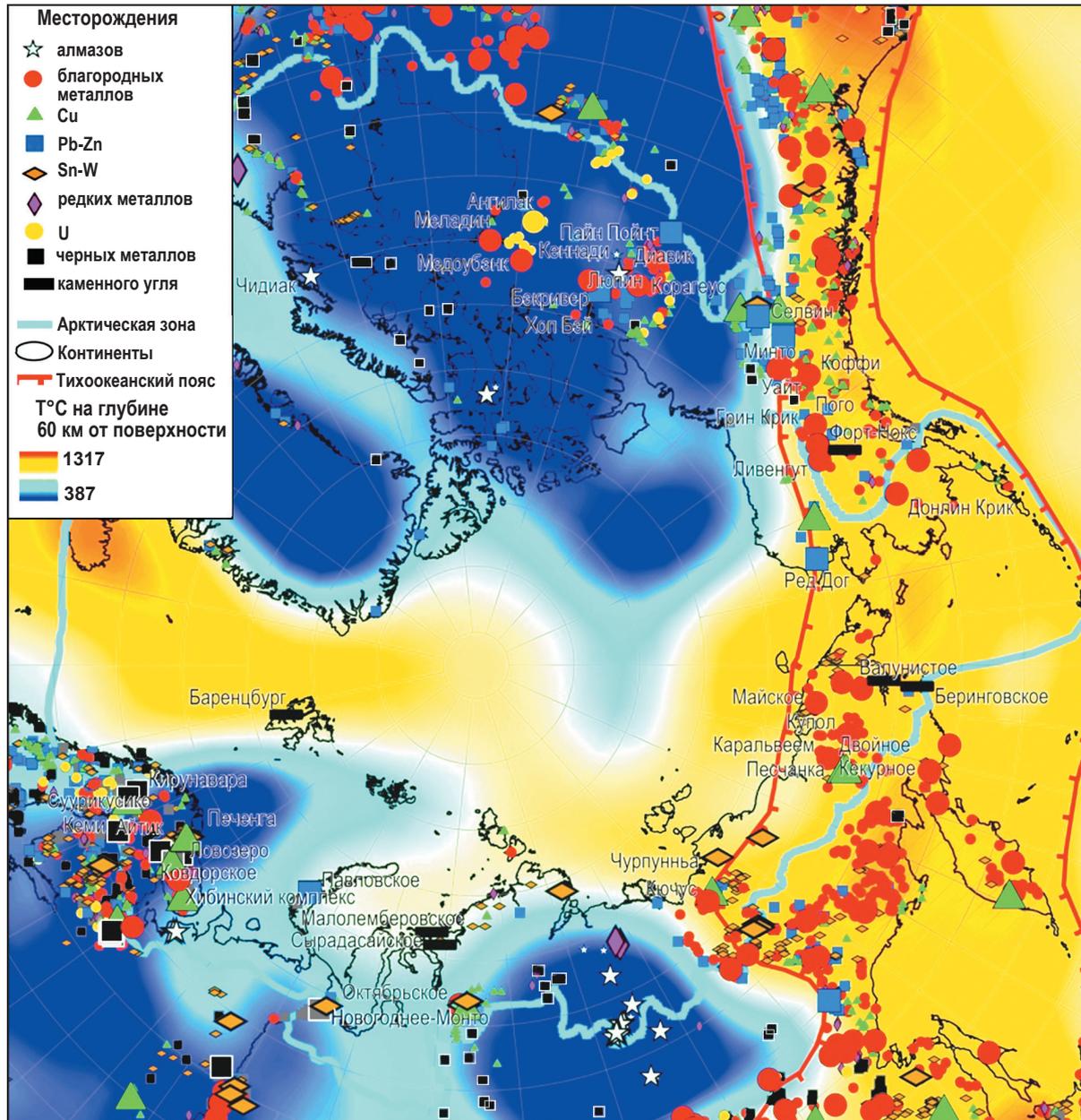


Рис. 4. Карта температуры верхней мантии на глубине 60 км и распределение основных месторождений и перспективных рудопроявлений стратегических металлов в Арктике (составлена с использованием материалов [18])
 Fig. 4. Map of the upper mantle temperature at a depth of 60 km and the distribution of the main deposits and prospective ore occurrences of strategic metals in the Arctic (using [18])

зывает, что западная и восточная части российской Арктики, как и Циркумарктического пояса, в целом отчетливо различаются в термальных полях верхней мантии на глубине 60 км. Восточная (меньшая) часть находится в высокотемпературной области мантии, а западная — в низкотемпературной (рис. 4). Следует также отметить однородность термального поля в каждой из арктических частей.

Таким образом, рассмотренная карта визуализирует глобальные особенности распространения месторождений стратегических металлов в Арктике.

Карта наглядно демонстрирует, что месторождения стратегических металлов восточной части Арктики принадлежат к Тихоокеанскому рудному поясу. Концепция глобальной металлогенической однородности Тихоокеанского рудного пояса [21] предполагает широкое развитие аналогов североамериканских месторождений в его чукотском сегменте. Поэтому полоса золоторудных и медно-порфировых месторождений, широко развитых на Аляске и в Британской Колумбии, практически без изменений продолжается и на территории Чукотки (см. рис. 4). Гра-

ницы Тихоокеанского рудного пояса в Арктике получили дополнительное обоснование в термальной модели верхней мантии. Необходимо отметить, что металлогения западной части Арктики по обе стороны Северного Ледовитого океана характеризуется большой однородностью, что обусловлено сходными геодинамическими обстановками формирования месторождений [22].

Таким образом, ВМД способна демонстрировать относительные размеры металлогенических таксонов (зон, поясов, районов), их схожесть и различия, а также обеспечивает спланированный подход к поиску нужной информации и позволяет идентифицировать закономерности размещения месторождений.

Заключение

Анализ показал состояние применения на современном этапе космических технологий в металлогеническом анализе.

Рассмотрено несколько направлений использования космических технологий: (1) многозональная космическая съемка (ASTER, Landsat и др.), (2) развитие глобальных моделей глубинного строения земной коры и верхней мантии (на основе гравиметрических данных GOCE), (3) визуализация металлогенических данных.

Одна из главных областей применения многозональной космической съемки — поиск и обоснование перспективных площадей под геолого-разведочные работы на рудные и нерудные полезные ископаемые. Сочетание благоприятных прогнозно-поисковых признаков, выявленные при дешифрировании многозональных космических снимков, позволяет наметить перспективные площади для поисков новых месторождений. Можно рекомендовать применение многозональной космической съемки на региональном этапе прогнозирования месторождений цветных и благородных металлов, производных порфирово-эпитермальной минералообразующей системы в Арктической зоне России.

Полученные космическим аппаратом GOCE гравиметрические данные стимулировали развитие глобальных моделей глубинного строения земной коры и верхней мантии, способствовавших пониманию металлогенической специализации рудных районов. На основе применения этих моделей выявлены закономерности размещения и особенностей формирования месторождений различных формационных типов, что позволяет оконтурить перспективные площади для постановки геолого-разведочных работ.

Визуализация металлогенических данных способна демонстрировать относительные размеры металлогенических таксонов (зон, поясов, районов), их схожесть и отличия, обеспечивает спланированный подход к поиску нужной информации, а также позволяет идентифицировать закономерности размещения месторождений.

Применение космических технологий имеет большое значение и для прогнозирования новых месторождений стратегических металлов в отдаленных слабо изученных районах Арктической зоны России.

Работа выполнена в рамках темы Госзадания ИГЕМ РАН «Металлогения рудных районов вулканоплутоногенных и складчатых орогенных поясов Северо-Востока России».

Литература/References

1. *Jonas A., Sinkevicius A., Flannery S. et al.* Space: Investment Implications of the Final Frontier. New York, Morgan Stanley Research, 2017, 59 p.
2. *Корсаков А. К., Корчутанова Н. И.* От курса «дистанционные методы геологического картирования» к специализации «космическая геология» // Изв. вузов. Геология и разведка. — 2012. — № 5. — С. 73—75.
3. *Korsakov A. K., Korchutanova N. I.* Ot kursa “distantionnye metody geologicheskogo kartirovaniya” k spetsializatsii “kosmicheskaya geologiya”. [From the course “remote methods of geological mapping” to the specialization “space Geology”]. *Izv. vuzov. Geologiya i razvedka*, 2012, no. 5, pp. 73—75. (In Russian).
4. *Миловский Г. А., Макаров В. П., Троицкий В. В. и др.* Применение результатов дистанционного зондирования для выявления закономерностей локализации золотого оруденения в центральной части Аян-Юряхского антиклинория Магаданской области // Исследование Земли из космоса. — 2018. — № 5. — С. 23—30. — DOI: 10.31857/S020596140003234-8.
5. *Milovsky G. A., Makarov V. P., Troitsky V. V. et al.* Primenenie rezul'tatov distantionnogo zondirovaniya dlya vyavleniya zakonomernostey lokalizatsii zolotogo orudneniya v tsentral'noy chasti Ayan-Yuryakhskogo antiklinoriya Magadanskoy oblasti. [Application of Remote-Sensing Observations for Detecting Patterns of Localization of Gold Mineralization in Central Part of Ayan-Yuryakhsky Anticlinorium of the Magadan Region]. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, no. 5, pp. 23—30. DOI: 10.31857/S020596140003234-8. (In Russian).
6. *Kruse F. A., Taranik J. V., Coolbaugh M. et al.* Effect of Reduced Spatial Resolution on Mineral Mapping Using Imaging Spectrometry—Examples Using Hyperspectral Infrared Imager (HyspIRI)—Simulated Data. *Remote Sens.*, 2011, no. 3, pp. 1584—1602. DOI: 10.3390/rs3081584.
7. *Ranjbar H., Honarmand M., Moezifar Z.* Application of the Crosta technique for porphyry copper alteration mapping, using ETM+ data in the southern part of the Iranian volcanic sedimentary belt. *J. Asian Earth Sci.*, 2004, vol. 24, pp. 237—243.
8. *Ducart D. F., Crósta A. P., Souza-Filho C. R.* Alteration Mineralogy at the Cerro La Mina Epithermal Prospect, Patagonia, Argentina: Field Mapping, Short-Wave Infrared Spectroscopy, and ASTER Images. *Econ. Geol.*, 2006, vol. 101, pp. 981—996.

7. Rowan L. C., Robert G. S., John C. Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Rem. Sen. Environ.*, 2006, vol. 104, pp. 74—87.
8. Pour A., Hashim M. Spectral transformation of ASTER data and the discrimination of hydrothermal alteration minerals in a semi-arid region, SE Iran. *Intern. J. of the Physical Sciences*, 2011, vol. 6(8), pp. 2037—2059.
9. Zhang T., Yi G., Li H. et al. Integrating Data of ASTER and Landsat-8 OLI (AO) for Hydrothermal Alteration Mineral Mapping in Duolong Porphyry Cu-Au Deposit, Tibetan Plateau, China. *Remote Sens.*, 2016, vol. 8, 890. DOI: 10.3390/rs8110890 www.mdpi.com/journal/remote-sensing.
10. Bigot L., Geo P., Legros L. New era in geological mapping. Available at: <https://effgis.com/en/new-era-geological-mapping-multispectral-satellites-advanced-data-processing/>.
11. Cook D. R., Hollings P., Walshe J. L. Giant Porphyry Deposits: Characteristics, Distribution, and Tectonic Controls. *Econ. Geol.*, 2005, vol. 100, pp. 801—818.
12. Sillitoe R. H. Porphyry Copper Systems. *Econ. Geol.*, 2010, vol. 105, pp. 3—41.
13. Ключиков А. А. Новая эра в изучении гравитационного поля Земли // Науч. тр. Ин-та астрономии РАН. — 2018. — Т. 2. — С. 20—25. — DOI: 10.26087/INASAN.2018.2.2.003.
- Kluykov A. A. Novaya era v izuchenii gravitatsionnogo polya Zemli. [New era in studies of gravity field of Earth]. *Nauch. tr. In-ta astronomii RAN*, 2018, vol. 2, pp. 20—25. DOI: 10.26087/INASAN.2018.2.2.003. (In Russian).
14. Reguzzoni M., Sampietro D. GEMMA: An Earth crustal model based on GOCE satellite data. *Intern. J. Appl. Earth Obs. Geoinform.*, 2015, vol. 35, pp. 31—43.
15. Bassin C., Laske G., Masters G. The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America. *EOS Trans AGU*, 81, F897, 2000. Available at: <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust2.html>.
16. Laske G., Masters G., Reif C. CRUST 2.0: A new global crustal model at 2×2 degrees. Available at: <http://igppweb.ucsd.edu/~gabi/rem.html>.
17. Bouman J., Ebbing J., Meekes S., Abdul Fattah R. et al. GOCE gravity gradient data for lithospheric modeling. *Intern. J. Appl. Earth Obs. Geoinform.*, 2015, vol. 35, pp. 16—30.
18. Cammarano F., Guerri M. Global thermal models of the lithosphere. *Geophys. J. Intern.*, 2017, vol. 210, pp. 56—72.
19. Pasyanos M. E., Masters T. G., Laske G. et al. LITHO1.0: an updated crust and lithospheric model of Earth. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2014, vol. 119, no. 3, pp. 2153—2173.
20. Волков А. В., Галямов А. Л. Геофизическая модель земной коры, геодинамические обстановки и перспективы открытия месторождений золота карлинского типа в арктической зоне Республики Саха (Якутия) // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 1 (37). — С. 82—94. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-82-94.
- Volkov A. V., Galyamov A. L. Geofizicheskaya model' zemnoy kory, geodinamicheskie obstanovki i perspektivy otkrytiya mestorozhdeniy zolota karlinskogo tipa v arkticheskoy zone Respubliki Sakha (Yakutiya). [Geophysical model of the Earth's crust, geodynamic conditions and prospects for discovering Carlin-type ore deposits in the Arctic zone of the Republic of Sakha (Yakutia)]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2020, no. 1 (37), pp. 82—94. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-82-94. (In Russian).
21. Sidorov A. A., Volkov A. V., Galyamov A. L. On the Metallogeny at the Pacific Volcanic Belts. *J. of Volcanology and Seismology*, 2019, vol. 13, no. 6, pp. 363—375.
22. Волков А. В., Галямов А. Л., Лобанов К. В. Геодинамические обстановки формирования месторождений стратегических металлов в Арктической зоне России // Арктика: экология и экономика. — 2019. — № 2 (34). — С. 109—119. — DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-109-119.
- Volkov A. V., Galyamov A. L., Lobanov K. V. Geodinamicheskie obstanovki formirovaniya mestorozhdeniy strategicheskikh metallov v Arkticheskoy zone Rossii. [Geodynamic formation setting of the strategic metal deposits in the Russian Arctic zone]. *Arktika: ekologiya i ekonomika*, 2019, no. 2 (34), pp. 109—119. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-2-109-119. (In Russian).

Информация об авторах

Волков Александр Владимирович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: tma2105@mail.ru.

Галямов Андрей Львович, кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: alg@igem.ru.

Белоусов Петр Евгеньевич, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: pitbl@mail.ru.

Вольфсон Александр Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (119017, Россия, Москва, Старомонетный пер., д. 35), e-mail: sanches27@list.ru.

Библиографическое описание данной статьи

Волков А. В., Галямов А. Л., Белоусов П. Е., Вольфсон А. А. Применение космических технологий в металлогеническом анализе территории Арктической зоны России // Арктика: экология и экономика. — 2020. — № 2 (38). — С. 77—85. — DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-77-85.

APPLICATION OF SPACE TECHNOLOGIES IN METALLOGENIC ANALYSIS OF THE RUSSIAN ARCTIC TERRITORY

Volkov A. V., Galyamov A. L., Belousov P. E., Wolfson A. A.

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS (Moscow, Russian Federation)

The article was received on April 8, 2020

Abstract

Today, cosmonautics is, first, research in fundamental science, which in turn creates applied technologies. This article discusses the space technologies applied in metallogenic analysis. The authors identify several areas: multispectral imagery (ASTER, Landsat, etc.), the development of global models of the deep structure of the Earth crust and upper mantle (based on GOCE); visualization of metallogenic data. The authors believe that space technologies are extremely important for metallogenic analysis. The use of space technologies is also important for forecasting new deposits of strategic metals in remote, poorly studied areas of the Russian Arctic.

Keywords: *Arctic zone, space technologies, remote sensing, gravimetric space survey, global model, the Earth crust, upper mantle, metallogenic analysis.*

The article was prepared in the framework of the IGEM RAS State Task: “Metallogeny of ore districts of volcanoplutonic and folded orogenic belts in the North-East of Russia”.

Information about the authors

Volkov Alexander Vladimirovich, Doctor of Geology and Mineralogy, Chief Researcher, Head of Laboratory, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetnyi per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: tma2105@mail.ru.

Galyamov Andrey Lvovich, PhD of Geology and Mineralogy, Senior Researcher, Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetnyi per., Moscow, Russia, 119017), e-mail: alg@igem.ru.

Belousov Peter Evgen'evich, PhD of Geology and Mineralogy, Researcher, Institute of ore Deposit Geology, petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetnyi per., Moscow, 119017, Russia), e-mail: pitbl@mail.ru.

Wolfson Alexander Alexandrovich, PhD of Geology and Mineralogy, Researcher, Institute of ore Deposit Geology, petrography, Mineralogy and Geochemistry of the Russian Academy of Sciences (35, Staromonetnyi per., Moscow, 119017, Russia), e-mail: sanches27@list.ru.

Bibliographic description

Volkov A. V., Galyamov A. L., Belousov P. E., Wolfson A. A. Application of space technologies in metallogenic analysis of the Russian Arctic territory. Arctic: Ecology and Economy, 2020, no. 2 (38), pp. 77—85. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-1-77-85. (In Russian).

© Volkov A. V., Galyamov A. L., Belousov P. E., Wolfson A. A., 2020