

А. А. КИРСАНОВ, М. Ю. СМИРНОВ, К. Л. ЛИПИЯЙНЕН,
Г. А. КИРСАНОВ (ВСЕГЕИ)

Новый метод выявления околорудных гидротермально измененных пород по космическим гиперспектральным данным на примере Ломамского потенциально золоторудного района, Республика Саха (Якутия)

Изложены основные результаты обработки и анализа гиперспектральных данных при прогнозно-поисковых работах в Ломамском потенциальном золоторудном районе (Республика Саха, Якутия) для выявления зон гидротермально-метасоматических изменений горных пород, благоприятных для локализации золотого оруденения. Применение разработанной технологии позволяет на предварительном этапе поисковых работ определять участки локализации оруденения. Сопоставление результатов обработки и анализа космических гиперспектральных данных и наземных геохимических изысканий показывает, что спектрометрические ореолы гидротермально-метасоматических изменений совпадают на большинстве участков с повышенными и высокими значениями содержаний элементов первичных геохимических ореолов рассеяния золота и серебра. Выявлены комплексные спектроскопические ореолы околорудных гидротермально-метасоматических изменений пород, сопровождающих благороднометалльное оруденение, для перспективных Билибинской и Эхюндинской площадей.

Ключевые слова: гиперспектральные данные, ASTER, минералы-индикаторы, гидротермальные изменения пород, золотое оруденение.

A. A. KIRSANOV, M. YU. SMIRNOV, K. L. LIPIYAYNEN,
G. A. KIRSANOV (VSEGEI)

A new method of identification of hydrothermally altered wallrock based on satellite hyperspectral data: example of the Lomamsky potential gold ore field, Republic of Sakha (Yakutia)

The paper presents main results of processing and analysis of hyperspectral data during forecasting and exploration in the Lomamsky potential gold ore field (The Republic of Sakha, Yakutia) for identifying hydrothermal-metasomatic rock alteration zones favorable for gold ore localization. The application of the developed technology allows identifying mineral localization areas at the preliminary stage of exploration. Comparison of the results of processing and analysis of space hyperspectral data and terrestrial geochemical surveys shows that spectrometric halos of hydrothermal-metasomatic alterations coincide in most of the areas with elevated and high content of elements of gold and silver primary geochemical dispersion halos. Complex spectroscopic haloes of the hydrothermal-metasomatic alterations of wallrock accompanying precious metal mineralization for promising Bilibinsky and Ekhundinsky areas, were detected.

Keywords: hyperspectral data, ASTER, indicator minerals, hydrothermal rock alterations, gold mineralization.

Для цитирования: Кирсанов А. А. Новый метод выявления околорудных гидротермально измененных пород по космическим гиперспектральным данным на примере Ломамского потенциально золоторудного района, Республика Саха (Якутия) / А. А. Кирсанов, М. Ю. Смирнов, К. Л. Липияйнен, Г. А. Кирсанов // Региональная геология и металлогения. – 2021. – № 86. – С. 97–106. DOI: 10.52349/0869-7892_2021_86_97-106

Введение. В связи с расширением региональных работ по ГДП-200 и необходимостью повышения их прогнозной эффективности важной задачей является выделение локальных перспективных площадей на обнаружение месторождений, в частности золотого оруденения. В ее решении существенная роль принадлежит анализу данных дистанционного зондирования Земли, среди которых использование гиперспектральных снимков ASTER при прогнозировании и поисках полезных ископаемых обладает возрастающим

значением, о чем свидетельствует зарубежный опыт [11].

Космические гиперспектральные данные ASTER получают в 14 спектральных каналах в трех диапазонах: в видимом и ближнем инфракрасном, в коротковолновом инфракрасном и тепловом инфракрасном с пространственным разрешением 15–30 м.

Технологии получения гиперспектральных данных основаны на построении изображений земной поверхности в каждом из узких

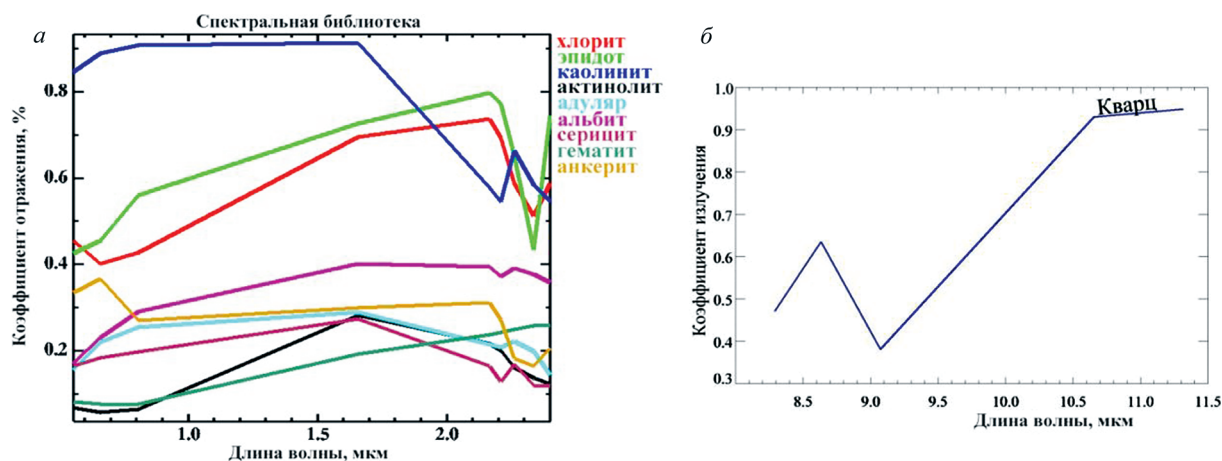


Рис. 1. Спектры минералов-индикаторов в диапазонах VNIR и SWIR (а) и TIR (б)

интервалов (нанометры) регистрируемого спектра электромагнитных волн как отраженного, так и собственного теплового излучения природных и антропогенных объектов. Гиперспектральные изображения используются для определения и картирования минералов и горных пород по их спектрам, которые показывают отражение материала вдоль амплитуды волны. Многие минералы и горные породы имеют уникальный спектр отражения и поглощения и могут быть выделены по этим спектрам. Спектры минералов и горных пород отличаются большим разнообразием и определяются химическим составом, типом кристаллической решетки минералов, размером зерен минералов. В качестве примера спектры минералов-индикаторов в видимом и ближнем инфракрасном (VNIR) и среднем инфракрасном диапазонах (SWIR) представлены на рис. 1, а. Кварц в 1–9 каналах данных ASTER не имеет значительных спектральных особенностей, и поэтому для его обнаружения лучше использовать тепловые каналы (TIR) (рис. 1, б).

Принимая во внимание то, что рудные компоненты во многих типах месторождений составляют лишь незначительные проценты общей массы, индикаторами рудных тел являются околорудные изменения рудовмещающих пород, которые могут быть зафиксированы на материалах гиперспектральных съемок. Эти изменения связаны с процессами грейзенизации, скарнирования, пропилитизации, листвинитизации, окварцевания, серицитизации, хлоритизации, серпентинизации, карбонатизации и т. д. [2; 8]. Поэтому основная задача работ — выявление зон гидротермально измененных пород как индикаторов полезных ископаемых.

Исследования по изучению возможностей использования гиперспектральных данных для решения прогнозных задач на объектах ГДП-200 проводятся во ВСЕГЕИ по заданию Роснедра более 10 лет. Были разработаны методики обработки гиперспектральных данных и геологической интерпретации полученных материалов, которые позволили создавать гиперспектральные

дистанционные основы (ГДО) и схемы минералов-индикаторов геологических обстановок, перспективных на полезные ископаемые. Результаты проведенных работ докладывались на российских и международных конференциях и конгрессах [1; 3–7; 9; 10; 12].

Для повышения качества результатов исследований во ВСЕГЕИ постоянно разрабатываются новые методические подходы к прогнозной интерпретации получаемых материалов обработки ГДО. На сегодняшний день создана методика вероятностной диагностики минералов-индикаторов оруденения, включающая комплекс рудных компонентов и минеральные ассоциации гидротермально-метасоматических изменений рудовмещающих пород.

Ломамский потенциальный золоторудный район.

Этот район привлекал внимание геологов на предмет его золотоносности по аналогии с расположенным севернее Тыркандинским с довоенного времени, однако первые изыскания Р. В. Нифонтова (1928–1929 гг.), Ф. К. Корнилова (1941–1942 гг.) и других геологов имели несистематический характер и дали отрицательный результат. Положительные результаты были получены после проведения трестом «Якутзолото» на левобережье р. Учур в 1940–1943 гг. маршрутно-рекогносцировочных работ (м-ба 1 : 200 000) под руководством А. И. Кукса, а также установлена связь золотого оруденения с интрузиями мезозойских сиенитов. Последующими специализированными исследованиями второй половины XX в. (работы Н. С. Телега, 1967, 1979; В. Г. Амарского, 1974; И. Т. Сидорова, 1976; М. В. Каменцева, 1997) была обоснована высокая перспективность Ломамского района на промышленное золотое оруденение, связанное с низкотемпературными гидротермально-метасоматическими процессами (аргиллизацией, березитизацией, пропицитизацией, гумбеитизацией). В последние годы площадь обследовалась специалистами ВСЕГЕИ в процессе работ по ГДП-200. В результате работ

выделены прогнозные участки, описание которых приведено ниже.

Рассматриваемая территория располагается в восточной части Алданского щита. В геологии района определяющая роль принадлежит сложнодислоцированным архейским породам, перекрытым карбонатными отложениями платформенного чехла венда – нижнего кембрия и терригенными породами юры (рис. 2). Магматические образования мезозойского возраста представлены дайками, силлами и массивами центрального типа монзонит-сиенитовой, лейцит-щелочно-сиенитовой и монзонит-гранодиоритовой формаций. К узлам магматической деятельности пространственно приурочены проявления золоторудной минерализации (более 50 рудопроявлений и пунктов минерализации).

В пределах *Ломамского потенциального золоторудного района* золотое оруденение локализовано в карбонатных породах венда – нижнего кембрия, в магматических породах мезозоя и в меньшей степени в породах архейского фундамента. В магматических и осадочных породах широко развиты низкотемпературные гидротермально-метасоматические образования. В мезозойских интрузивных породах отмечаются аргиллизиты, березиты и пропициты, а в карбонатных – скарнирование, березитизация и гумбеитизация; юрские терригенные отложения также зачастую гумбеитизированы. В 2020 г. во ВСЕГЕИ под редакцией А. В. Молчанова авторами Д. С. Артемьевым, Д. С. Козловым, Д. С. Ашихминым и др. были подготовлены, но не опубликованы Государственная геологическая карта масштаба 1 : 200 000/2, издание второе, лист О-52-XXVII (р. Олдог), серия Алданская: Геологическая карта, Карта полезных ископаемых и закономерностей их размещения, Объяснительная записка. Далее по тексту – лист О-52-XXVII (р. Олдог), Геологическая карта, Карта полезных ископаемых и закономерностей их размещения, Объяснительная записка.

Морфологически рудные тела представлены маломощными жилами, залежами с раздувами и ответвлениями в карбонатных породах и протяженными крутопадающими минерализованными зонами. Состав руд в карбонатных породах преимущественно пирит-кварцевый, кварц-сульфидно-карбонатный. Кроме пирита в составе руд часто встречаются магнетит, псевдоморфозы гематита по пириту, халькопирит, галенит, сфалерит, пирротин, арсенопирит. Преобладают окисленные кварц-сульфидные руды, превращенные в массивные и пористые лимонит-кварц-анкеритовые руды и шляпы. В толще венд-кембрийских пород оруденелые зоны характеризуются мощностью от первых десятков сантиметров до 10 м, по протяженности прослеживаются на 0,5–1,5 км.

Обработка и анализ космических гиперспектральных данных. Для исследований территории Ломамской площади была создана ГДО по

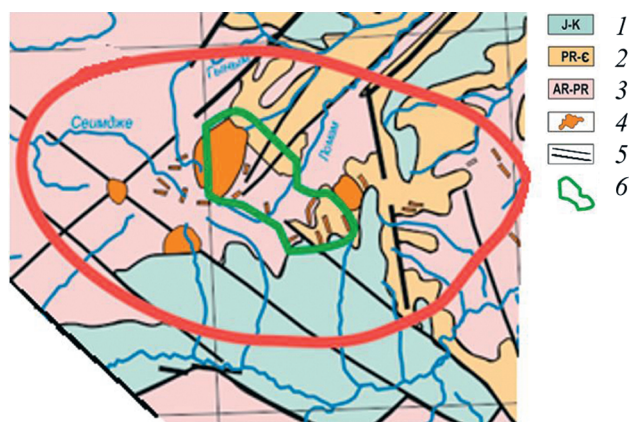


Рис. 2. Фрагмент схемы рудно-россыпных районов Южной Якутии (красный контур – Ломамский рудный россыпной район)

1 – терригенные, отчасти вулканогенные и угленосные, осадочные отложения юры и нижнего мела; 2 – терригенно-карбонатные осадочные образования венда и нижнего кембрия; 3 – метаморфические, в различной степени гранитизированные, сложнодислоцированные образования фундамента; 4 – мезозойские щелочные и субщелочные интрузивные комплексы; 5 – дизъюнктивы разного ранга; 6 – площадь, предлагаемая для постановки поисковых работ

космическим снимкам ASTER и проведен дальнейший спектральный анализ, который позволяет определять вероятностное распределение минералов-индикаторов околорудных изменений для выявления перспективных площадей. Маска территорий, пригодных для спектрального анализа, построена суммированием масок густой растительности и облаков.

По результатам изучения геологических и минералогических материалов в качестве минералов-индикаторов оруденения и сопутствующих гидротермально-метасоматических образований выбраны: кварц, щелочные полевые шпаты (альбит, адуляр), серицит, каолинит, карбонаты (доломит, анкерит), эпидот, хлорит, актинолит; рудные: окислы и гидроокислы железа (гематит, лимонит), сульфиды (пирит, арсенопирит, галенит, сфалерит) и соединения меди (халькопирит, халькозин, ковеллин, малахит). Поскольку в составе продуктивных залежей часто встречаются магнетит, псевдоморфозы гематита по пириту и преобладают окисленные кварц-сульфидные руды, превращенные в массивные и пористые лимонит-кварц-анкеритовые руды и шляпы, было целесообразно определить индекс оксида железа.

Спектральный анализ ГДО позволил создать схему распределения фигуративных точек (отражают химический состав (или состояние) горной породы (минерала, фазы) на схемах/диаграммах) минералов-индикаторов и их ассоциаций, образующих локальные скопления, и на основании их изучения оконтурить перспективные участки (рис. 3, а).

На рис. 3, б показано распределение фигуративных точек минералов железа, скопления

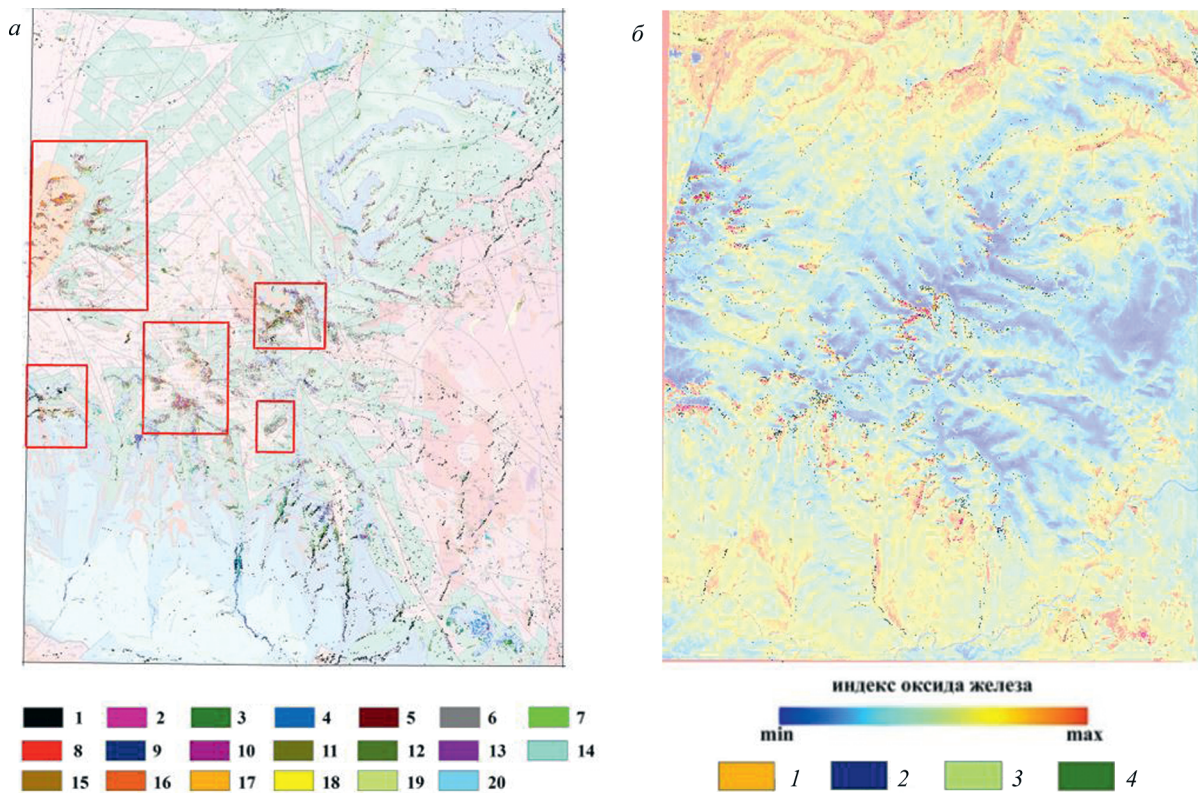


Рис. 3. Схема распределения фигуративных точек минералов-индикаторов на геологической карте (а) (красные контуры – перспективные участки по спектрометрическим параметрам) и минералов железа на изображении индекса оксида железа (б)

а: минералы-индикаторы: 1 – кварц; 2 – ковеллин; 3 – халькопирит; 4 – серицит; 5 – адуляр; 6 – каолинит; 7 – хлорит; 8 – доломит; 9 – арсенопирит; 10 – галенит; 11 – сфалерит; 12 – гематит; 13 – альбит; 14 – эпидот; 15 – анкерит; 16 – халькозин; 17 – пирит; 18 – малахит; 19 – лимонит; 20 – актинолит.

б: 1 – пирит; 2 – арсенопирит; 3 – лимонит; 4 – гематит

которых локализуются в максимальных значениях индекса оксида железа.

В дальнейшем был разработан и применен новый методический подход, в результате которого индикаторные минералы были формально объединены в ассоциации, соответствующие тем или иным околорудным гидротермалитам-метасоматитам:

– ассоциация *кварц + серицит +/- карбонат (анкерит, доломит, кальцит), пирит, гематит, (+/- хлорит)* соответствует березитам;

– ассоциация *кварц + щелочной полевошпат (адуляр, альбит) + серицит +/- карбонат, гематит (и гидроокислы железа) +/- пирит, хлорит* – гумбеитам;

– присутствие ассоциации *карбоната, эпидота, хлорита, серицита +/- амфибол (актинолит) и кварц* указывает на процесс пропилитизации;

– присутствие *каолинита и гидросерицита* свидетельствует об аргиллизации.

По этим ассоциациям были получены спектрометрические ореолы гидротермально-метасоматических изменений (для их отображения применена низкочастотная фильтрация – «размытие» по Гауссу с заданным радиусом) – участки локализации фигуративных точек индикаторных минералов (минеральных ассоциаций)

в различных сочетаниях, сопровождающих благороднометалльное оруденение: аргиллизацию, березитизацию, пропилитизацию и распространение гумбеитов.

Сопоставление результатов обработки и анализа космических гиперспектральных данных с результатами наземных геохимических изысканий. Такое сравнение позволило сделать вывод, что спектрометрические ореолы гидротермально-метасоматических изменений (рис. 4, в) пространственно совпадают на большинстве участков с повышенными и высокими значениями интенсивности (*содержаний элементов*) в первичных геохимических ореолах рассеяния золота и серебра (рис. 4, а, б). К ним же приурочены скопления фигуративных точек окислов и гидроокислов железа, пирита и арсенопирита – минералов из состава рудных тел с благороднометалльным оруденением (рис. 4, в).

Дальнейший анализ показал положительные корреляции результатов специализированных обработок ГДО, позволяющих выявить вероятностное распределение спектрометрических ореолов околорудных изменений пород на перспективных площадях, с материалами проведенных наземных изысканий (лист О-52-XXVII

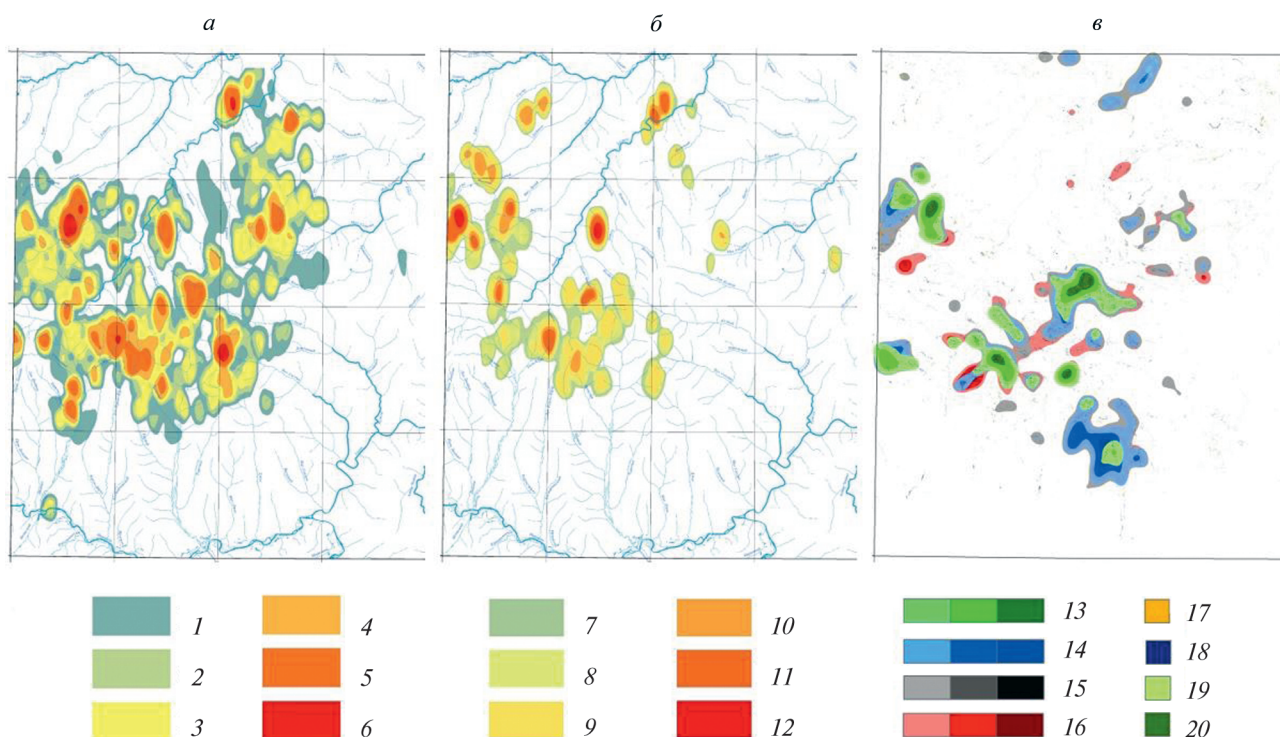


Рис. 4. Первичные геохимические ореолы рассеяния: Au (а) и Ag (б), спектрометрические комплексные ореолы гидротермалитов-метасоматитов с фигуративными точками гематита, лимонита, пирита и арсенопирита (в)

1–6 – аномалии Au (ед. фона): 1 – 1–5, 2 – 5–10, 3 – 10–30, 4 – 30–100, 5 – 100–1500, 6 – 1500–70 754; 7–12 – аномалии Ag (ед. фона): 7 – 1–5, 8 – 5–10, 9 – 10–50, 10 – 50–100, 11 – 100–500, 12 – 500–22 026; 13–20 – спектрометрические комплексные ореолы: 13 – пропилитизация, 14 – гумбеитизация, 15 – березитизация, 16 – аргиллизация, 17 – пирит, 18 – арсенопирит, 19 – лимонт, 20 – гематит.

Для рис. 4–6 и 8, 9 использовались материалы листа О-52-XXVII (р. Олдое), Объяснительная записка

(р. Олдое), Карта полезных ископаемых и закономерностей их размещения, Объяснительная записка).

Выделенные комплексные спектрометрические ореолы околорудных гидротермально-метасоматических изменений, сопровождающих благороднометалльное и полиметаллическое оруденение, совпадают с высокими и средними значениями интенсивности мультимпликативных геохимических ореолов (рис. 5) и коррелируются с рудогенными геохимическими аномалиями по первичным ореолам рассеяния (рис. 6). Кроме того, комплексные спектрометрические ореолы гидротермально-метасоматических изменений отмечаются на участке в истоках ручьев Горелый, Мал. Джюс и Валунный, который сложен кембрийскими и юрскими породами, прорванными малыми интрузиями кварцевых порфиров. На этом участке отсутствуют наземные геохимические данные.

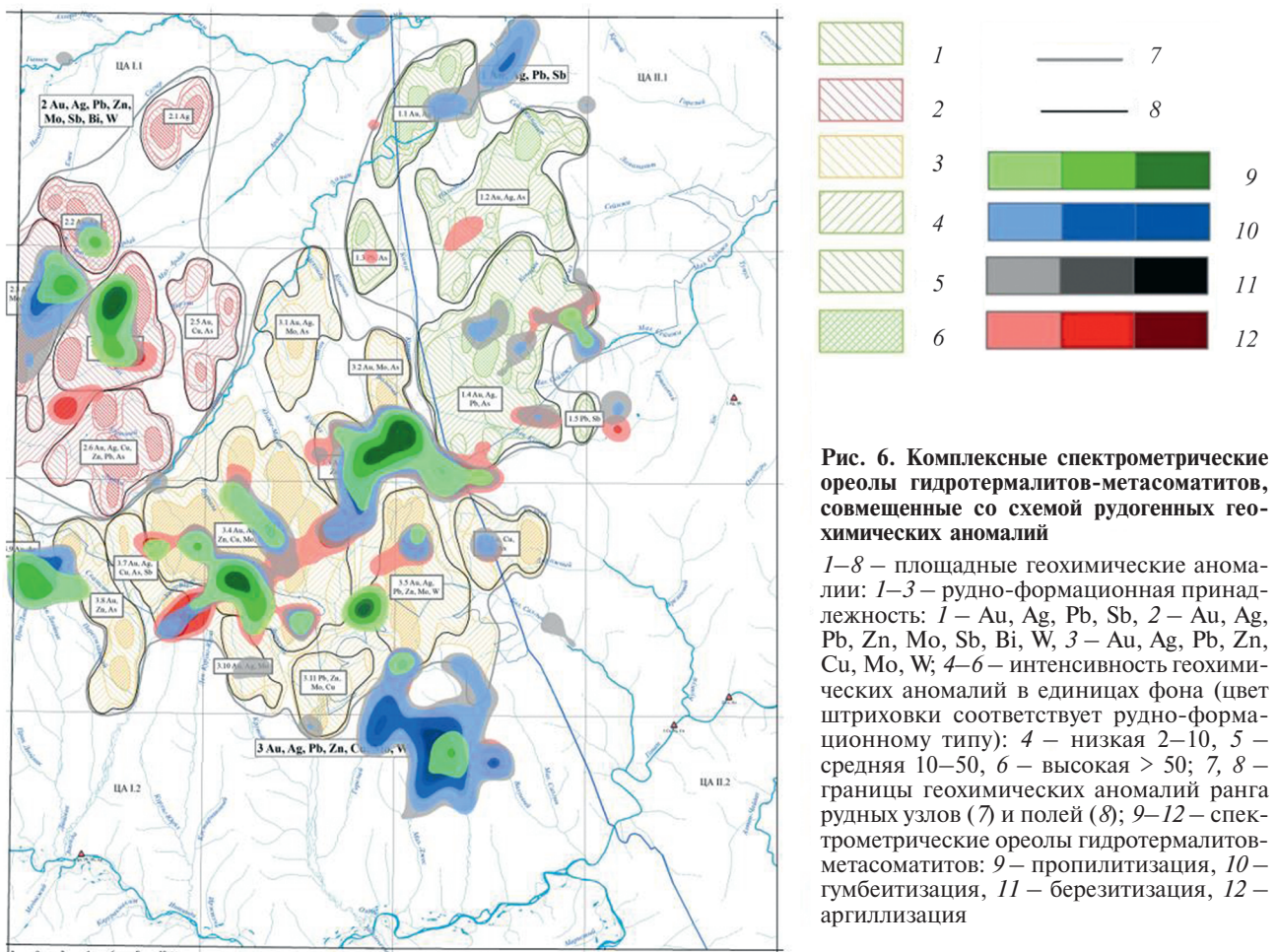
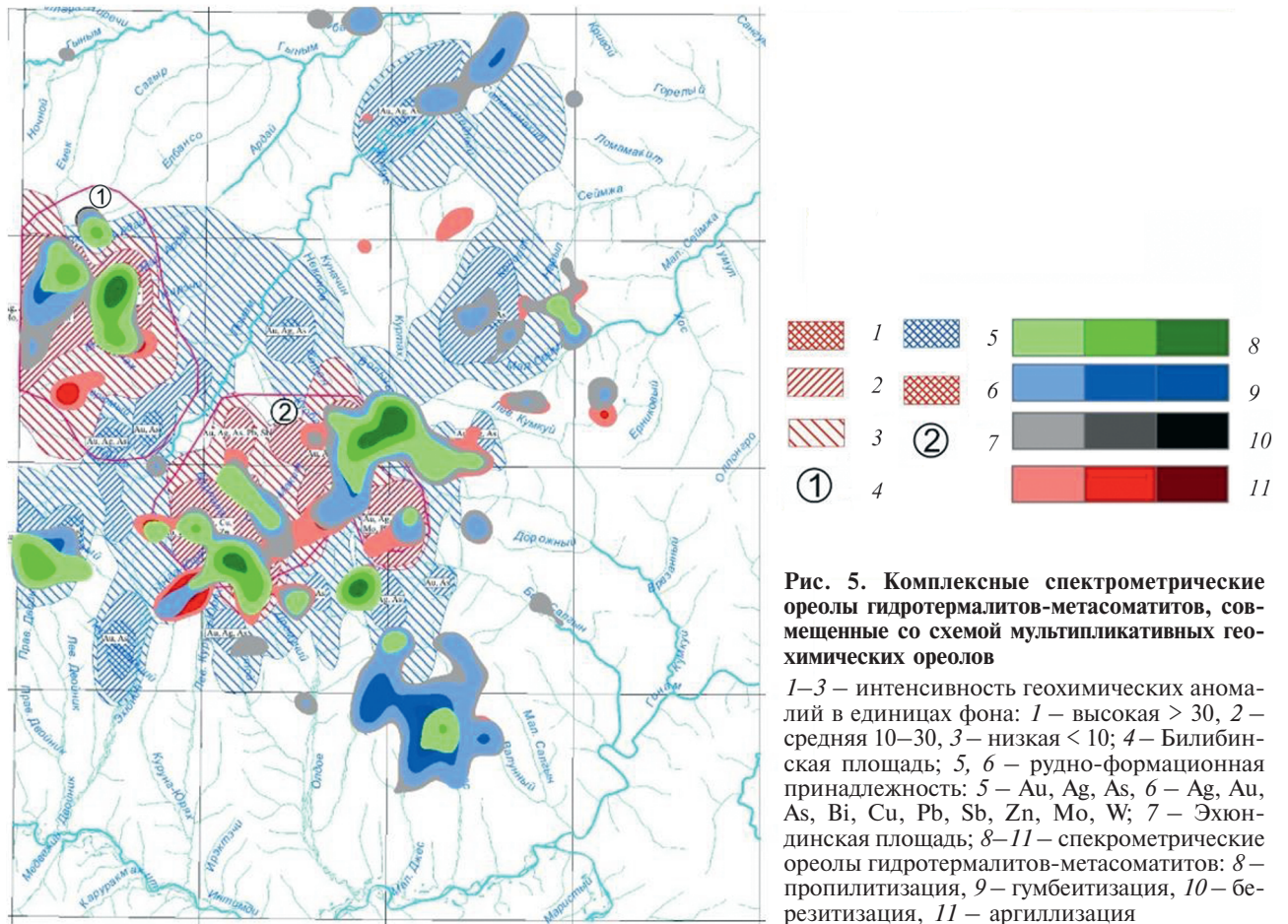
Работы по ГДП-200 в Ломамском потенциальном районе, проведенные сотрудниками ВСЕГЕИ, выявили в его пределах Билибинскую и Эхюндинскую перспективные площади с потенциальными рудными узлами (рис. 7–9). Сравнение результатов наземных (рис. 7) и дистанционных (рис. 3, а) исследований показывает сопоставимость прогнозных построений, полученных этими методами для Билибинской

(участки Емэк, Высокогорный, Гигантеус, Рудный и Угрюм) и Эхюндинской (участки Бурпала, Водораздельный, Дорожный и Куобах) площадей.

В пределах Билибинской площади (рис. 9) выделены Билибинский (Высокогорный участок) и Ардайский (объединяет участки Емэк, Гигантеус, Рудный и Угрюм) потенциальные золоторудные узлы (ПРУ), представляющие первоочередной интерес. В магматических и осадочных породах широко развиты гидротермально-метасоматические образования. В мезозойских интрузивных породах отмечаются аргиллизиты, березиты и пропилиты, а в карбонатных – скарнирование, березитизация и гумбеитизация; юрские песчаники зачастую гумбеитизированы.

Билибинский ПРУ. Все разновидности пород массива Голец Билибина в той или иной степени претерпели гидротермально-метасоматические изменения, выражающиеся в березитизации и аргиллизации. В северной части интрузии преобладают аргиллизиты, а березиты распространены в южной половине и тяготеют к центру массива.

Ардайский ПРУ. Во вмещающих интрузивных породах широко развиты гидротермально-метасоматические изменения, парагенетически связанные с производными мезозойской тектономагматической активизации. Архейские гнейсы повсеместно окварцованы и гематитизированы;



в доломитах венд-нижнекембрийского возраста отмечены карбонатизация, сульфидизация и окварцевание; юрские аркозовые песчаники содержат новообразования адуляра, кварца и сульфидов. В мезозойских интрузивных породах развита гематитизация, сульфидизация, каолинизация, а также производные процессов гипергенеза и представленные кавернозными образованиями, покрытыми пленками гидроокислов железа и марганца, иногда образующие прожилки массивные жилы, напоминающие железные шляпы. В нижней части разреза юрских отложений проявлены процессы гумбеитизации, впоследствии сменявшиеся кислым метасоматозом с замещением калиевого полевого шпата кварцем. Для песчаников и конгломератов характерно наложенное окварцевание и сульфидизация с последующим окислением. Воздействие кислых растворов на песчаники и конгломераты приводит к их березитизации с образованием кварца, карбоната, серицита. Распространение фигуративных точек минералов-индикаторов гематитизации и сульфидизации сопоставимо с индексами оксида железа для этих участков (рис. 3, б).

Выделенные комплексные спектрометрические ореолы окolorудных гидротермально-метасоматических изменений, сопровождающих благороднометалльное и полиметаллическое оруденение, совпадают с высокими и средними значениями интенсивности мультипликативных геохимических ореолов Билибинского и Ардайского ПРУ и коррелируются с рудогенными геохимическими аномалиями по первичным ореолам рассеяния на этих участках (рис. 8).

На Эхюндинской площади во вмещающих интрузивы породах широко распространены гидротермально-метасоматические изменения, парагенетически связанные с производными мезозойской тектоно-магматической активизации. В архейских гнейсах развита калишпатизация, окварцевание и гематитизация; доломиты венд-нижнекембрийского возраста березитизированы и гумбеитизированы; юрские аркозовые песчаники содержат новообразования адуляра, кварца и сульфидов. Оруденелые породы представлены гумбеитизированными юрскими песчаниками и конгломератами с весьма редкими вкраплениями сульфидов, а также окварцованными доломитами с гематит-лимонитовыми прожилками и вкраплениями, кварц-кальцит-гематитовыми гнездами. В мезозойских интрузивных породах развита гематитизация, березитизация и пропилизация (лист О-52-XXVII (р. Олдое), Карта полезных ископаемых и закономерностей их размещения, Объяснительная записка).

В рамках этой площади выделены участки Бурпала и Водораздельный, представляющие первоочередной интерес (рис. 9).

Бурпалинский ПРУ. Рудные зоны представлены доломитами разной степени окварцованности с большим количеством гематит-лимонитовых прожилков и гнезд с вкрапленностью мелких сульфидов, концентрирующихся

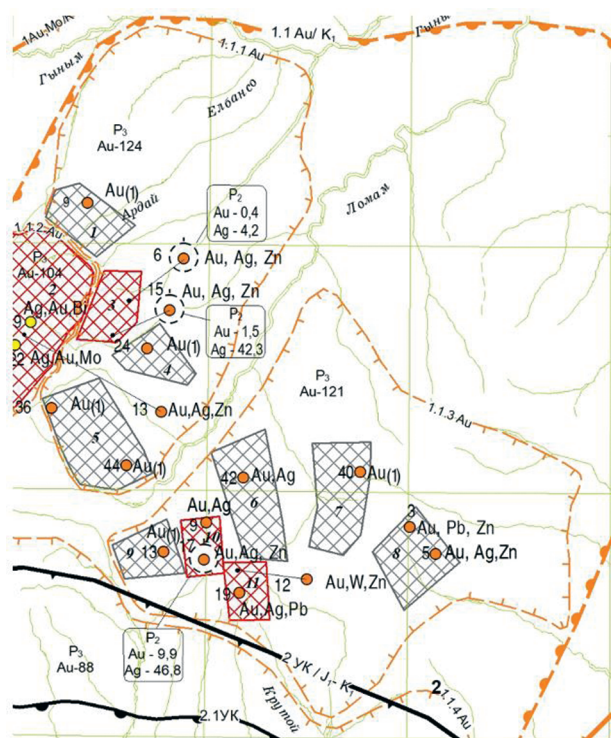


Рис. 7. Ломамский потенциальный золоторудный район, схема минерагенического районирования (лист О-52-XXVII (р. Олдое), Карта полезных ископаемых и закономерностей их размещения) с перспективными участками 1-й и 2-й очередности

1 – Емэк, 2 – Высокогорный, 3 – Гигантеус, 4 – Рудный, 5 – Утрюм, 6 – Дорожный, 7 – Куобах, 8 – Салгын, 9 – Эхюнда, 10 – Бурпала, 11 – Водораздельный

в кварц-карбонатных прожилках. Также были обнаружены березитизированные интрузивные породы. Рудные образования сложены березитами пирит-кварц-карбонатного, сульфидно-кварцевого составов, лимонит-гематитовыми породами и сульфидизированными гнейсами. Главные минералы этих руд – пирит, халькопирит, сфалерит, лимонит и гематит.

Водораздельный ПРУ. Рудные образования выражены пирит-кварц-карбонатными, пирит-кварцевыми метасоматитами и лимонит-гематитовыми породами. Главные минералы этих руд – пирит, галенит, лимонит и гематит.

Положение фигуративных точек минералов-индикаторов оруденения коррелируется с индексом оксида железа на этих участках. Выделенные комплексные спектрометрические ореолы окolorудных гидротермально-метасоматических изменений, сопровождающих золото-серебряное оруденение, сопоставимы с высокими и средними значениями интенсивности мультипликативных геохимических ореолов, выделенных ПРУ, и коррелируются с рудогенными геохимическими аномалиями по первичным ореолам рассеяния на этих участках (рис. 5, 6).

Пространственное распространение вероятностных комплексных ореолов гидротермально-метасоматических изменений, сопровождающих

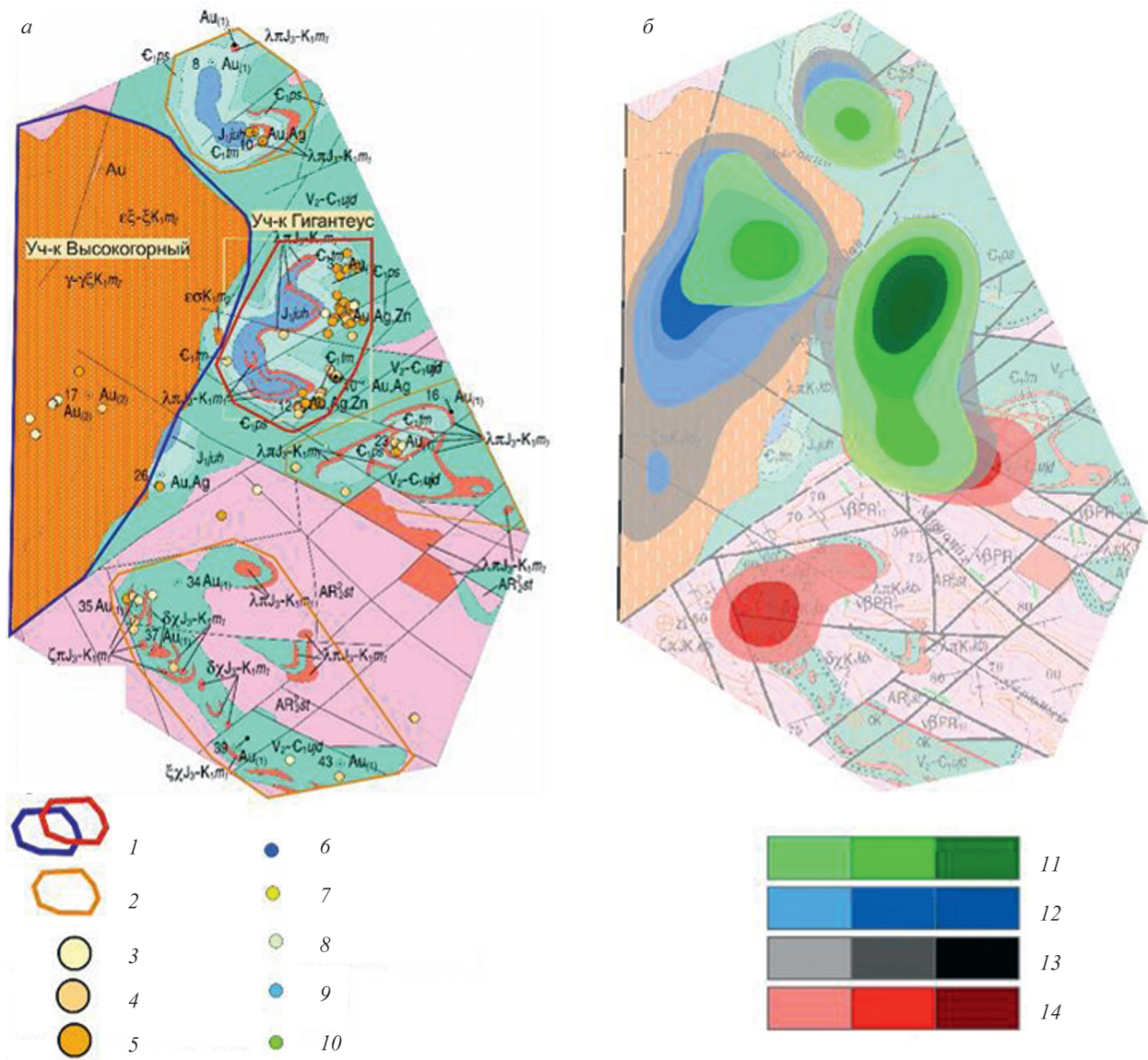


Рис. 8. Билибинская перспективная площадь с участками 1-й и 2-й очередности (с севера на юг) Емэк, Высокогорный, Гигантеус, Угрюм (а); она же с комплексными спектрометрическими ореолами гидротермалитов-метасоматитов (б)
 1, 2 – перспективные поисковые площади 1-й (1) и 2-й (2) очереди; 3–10 – содержание (г/т): 3 – Au 0,1–0,49, 4 – Au 0,49–1,0, 5 – Au > 1, 6 – Pb > 5000, 7 – Ag > 10, 8 – As > 800, 9 – Zn > 5000, 10 – Cu, Zn, Pb > 5000; 11–14 – спектрометрические ореолы гидротермалитов-метасоматитов: 11 – пропилизитация, 12 – гумбеитизация, 13 – березитизация, 14 – аргиллизация

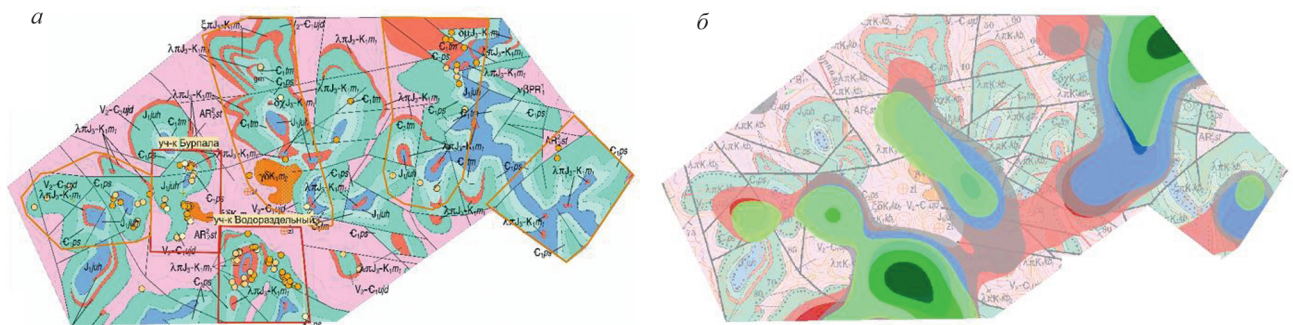


Рис. 9. Экхоюндинская перспективная площадь с выделенными Бурпалинским и Водораздельным ПРУ 1-й очереди, участками Дорожный, Куобах, Салгын, Экхоюнда 2-й очереди (а); она же с комплексными спектрометрическими ореолами гидротермалитов-метасоматитов (б)

Усл. обозн. см. на рис. 8

оруденение, и фигуративных точек их минералов-индикаторов на выделенных Бурпалинском и Водораздельном ПРУ демонстрируется на рис. 9.

Заключение. Разработанная технология специализированной компьютерной обработки ГДО для решения прогнозно-поисковых задач включает комплекс методик, составляющих технологическую цепочку проведения работ — от получения космических снимков до выделения перспективных площадей. Использование данных гиперспектральных съемок для решения задач геологического картографирования и прогнозно-поисковых работ наиболее эффективно на открытых и полузакрытых по геолого-ландшафтным условиям территориях, таких как горно-складчатые области и арктические районы России.

На примере Ломамского потенциального золоторудного района был использован новый методический подход к прогнозной интерпретации результатов спектрального анализа ГДО и выявлены комплексные спектроскопические ореолы околорудных гидротермально-метасоматических изменений пород, сопровождающих благороднометалльное оруденение, на участках Емэк, Высокогорный, Гигантеус, Угрюм Билибинской и Бурпалинский, Водораздельный, Эхюнда, Дорожный, Куобах, Эхюндинской площадей. Проведенное сравнение результатов обработки и спектрального анализа ГДО с материалами геологических и геохимических исследований показало их хорошую пространственную сопоставимость. Это позволило как наметить перспективные площади, совпадающие с геохимическими данными, так и определить еще на предварительном этапе поисковых работ новые участки локализации оруденения.

1. Выявление площадей, перспективных на поиски твердых полезных ископаемых, по данным обработки аэро- и космических гиперспектральных данных / А. А. Кирсанов, К. Л. Липияйнен, В. О. Павлова, Г. А. Кирсанов, М. Ю. Смирнов // Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений благородных, цветных металлов и алмазов: Сборник тезисов докл. науч.-практич. конф. — М.: ЦНИГРИ, 2017. — С. 23–24.

2. Измененные околорудные породы и их поисковое значение: Сборник статей / ред. Н. Н. Курек. — М.: Госгеолтехиздат, 1954. — 272 с.

3. Использование космических гиперспектральных и геохимических данных для выявления площадей, перспективных на золотое оруденение / А. А. Кирсанов, К. Л. Липияйнен, М. Ю. Смирнов, Г. А. Кирсанов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России: Тезисы докл. IX Всерос. науч.-практ. конф. — Якутск, 2019. — С. 35–39.

4. Кирсанов А. А., Липияйнен К. Л., Смирнов М. Ю. Возможности применения космических гиперспектральных снимков при прогнозно-поисковых работах на твердые полезные ископаемые // Геология, геофизика и минеральное сырье Сибири: Материалы 1-й науч.-практич. конф.: Сборник в 2 т. — Новосибирск: СНИИГГиМС, 2014. — Т. 1. — 55–56 с.

5. Опыт выявления зон гидротермально-метасоматических изменений горных пород на основе обработки данных гиперспектральных съемок / А. А. Кирсанов, К. Л. Липияйнен, В. О. Павлова, Г. А. Кирсанов, М. Ю. Смирнов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов): Тезисы докл. Тринадцатой Всерос. конф. — М.: ИКИ, 2015. — URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5360 (дата обращения: 15.05.2020).

6. Опыт использования аэро- и космических гиперспектральных данных при геологоразведочных работах на твердые полезные ископаемые / А. А. Кирсанов, О. В. Петров, К. Л. Липияйнен, М. Ю. Смирнов, В. О. Павлова // Научно-методические основы прогноза, поисков и оценки месторождений благородных и цветных металлов — состояние и перспективы: Материалы науч.-практич. конф. — М.: ЦНИГРИ, 2015. — С. 22–23.

7. Опыт применения аэро- и космических гиперспектральных данных при решении геологоразведочных задач / А. А. Кирсанов, К. Л. Липияйнен, М. Ю. Смирнов, В. О. Павлова // Новые технологии обработки и использования данных дистанционного зондирования Земли в геологоразведочных работах и при ведении мониторинга опасных геологических процессов: Тезисы докл. Междунар. конф. — СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. — С. 25–28.

8. Плющев Е. В., Шатов В. В., Кашин С. В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. — 560с. — (Труды ВСЕГЕИ, нов. серия, т. 354).

9. Применение аэро- и космических гиперспектральных данных для решения прогнозно-поисковых работ / А. А. Кирсанов, К. Л. Липияйнен, М. Ю. Смирнов, Г. А. Кирсанов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России: Тезисы докл. VIII Всерос. науч.-практ. конф. — Якутск, 2018. — С. 61–64.

10. Прогнозирование площадей, перспективных на поиски золота на основе результатов обработки аэро- и космических гиперспектральных данных / А. А. Кирсанов, К. Л. Липияйнен, М. Ю. Смирнов, Г. А. Кирсанов // Цветные металлы и минералы: Сборник докл. IX Междунар. конгр. — Красноярск, 2017. — С. 889–897.

11. Смирнова И. О., Кирсанов А. А., Камышников Н. В. Обзор зарубежных достижений за последние пять лет в области использования мульти- и гиперспектральных спутниковых данных и современных методов их обработки в геологических исследованиях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов). — М.: ИКИ, 2020. — Т. 17, № 1. — С. 9–27.

12. Utilization of ASTER hyperspectral data during prospecting for solid minerals / А. А. Kirsanov, O. V. Petrov, A. F. Morozov, K. L. Lipiyaynen, M. Yu. Smirnov // Proceedings of the 34th International Geological Congress. — Brisbane, Australia, 2012. URL: <http://www.34igc.org/scientific-themes-symposia.php> (дата обращения 21.01.2019).

1. Kirsanov A. A., Lipiyaynen K. L., Pavlova V. O., Kirsanov G. A., Smirnov M. Yu. Vyyavlenie ploshchadey, perspektivnykh na poiski tverdykh poleznykh iskopaemykh, po dannym obrabotki aero- i kosmicheskikh giperspektral'nykh dannyyh [Identification of areas promising for the search for solid minerals, according to the processing of aerial and space hyperspectral data]. *Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov i otsenki mestorozhdeniy blagorodnykh, tsvetnykh*

metallov ialmazov: Sbornik tezisov dokladov nauchno-prakticheskoy konferentsii. Moscow, TsNIGRI, 2017, pp. 23–24. (In Russian).

2. Izmenennye okolorudnye porodny i ikh poiskovoe znachenie: Sbornik statey [Modified near-ore rocks and their search value: Collection of articles]. Ed. by N. N. Kurek. Moscow, Gosgeoltekhizdat, 1954, 272 p.

3. Kirsanov A. A., Lipiyaynen K. L., Smirnov M. Yu., Kirsanov G. A. Ispol'zovanie kosmicheskikh giperspektral'nykh i geokhimicheskikh dannyykh dlya vyyavleniya ploshchadey, perspektivnykh na zolotoe orudnenie [Use of space hyperspectral and geochemical data to identify areas promising for gold mineralization]. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy severo-vostoka Rossii: Tezisy dokladov IX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Yakutsk, 2019, pp. 35–39. (In Russian).

4. Kirsanov A. A., Lipiyaynen K. L., Smirnov M. Yu. Vozmozhnosti primeneniya kosmicheskikh giperspektral'nykh snimkov pri prognozno-poiskovykh rabotakh na tverdye poleznye iskopaemye [Possibilities of using space hyperspectral images in forecasting and prospecting works for solid minerals]. *Geologiya, geofizika i mineral'noe syr'e Sibiri: Materialy 1-y nauchno-prakticheskoy konferentsii: sbornik v 2 tomakh*. Novosibirsk, SNIIGiMS, 2014, vol. 1, pp. 55–56. (In Russian).

5. Kirsanov A. A., Lipiyaynen K. L., Pavlova V. O., Kirsanov G. A., Smirnov M. Yu. Opyt vyyavleniya gidrotermal'no-metasomaticheskikh izmeneniy gornyykh porod na osnove obrabotki dannyykh giperspektral'nykh s"emok [Experience of detecting hydrothermal-metasomatic changes in rocks on the basis of hyperspectral survey data processing]. *Current problems in remote sensing of the Earth from space: Tezisy dokladov Trinadtsatoy Vserossiyskoy konferentsii*. Moscow, 2015, available at: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5360 (accessed 15 May 2020). (In Russian).

6. Kirsanov A. A., Petrov O. V., Lipiyaynen K. L., Smirnov M. Yu., Pavlova V. O. Opyt ispol'zovaniya aero- i kosmicheskikh giperspektral'nykh dannyykh pri geologorazvedochnykh rabotakh na tverdye poleznye iskopaemye [Experience of using aerial and space hyperspectral data in geological exploration for solid minerals]. *Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov i otsenki mestorozhdeniy blagorodnykh i tsvetnykh*

metallov – sostoyanie i perspektivy: Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Moscow, TsNIGRI, 2015, pp. 22–23. (In Russian).

7. Kirsanov A. A., Lipiyaynen K. L., Smirnov M. Yu., Pavlova V. O. Opyt primeneniya aero- i kosmicheskikh giperspektral'nykh dannyykh pri reshenii geologorazvedochnykh zadach [Experience in the use of aerial and space hyperspectral data in solving geological exploration problems]. *Novye tekhnologii obrabotki i ispol'zovaniya dannyykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli v geologorazvedochnykh rabotakh i pri vedenii monitoringa opasnykh geologicheskikh protsessov: Tezisy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii*. St. Petersburg, VSEGEI, 2014, pp. 25–28. (In Russian).

8. Plyushchev E. V., Shatov V. V., Kashin S. V. Metallogeniya gidrotermal'no-metasomaticheskikh obrazovaniy [Metallogeny of hydrothermal-metasomatic formations]. St. Petersburg, VSEGEI, 2012, 560 p.

9. Kirsanov A. A., Lipiyaynen K. L., Smirnov M. Yu., Kirsanov G. A. Primenenie aero- i kosmicheskikh giperspektral'nykh dannyykh dlya resheniya prognozno-poiskovykh rabot. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy severo-vostoka Rossii: Tezisy dokladov VIII Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Yakutsk, 2018, pp. 61–64. (In Russian).

10. Kirsanov A. A., Lipiyaynen K. L., Smirnov M. Yu., Kirsanov G. A. Prediction of areas prospective for gold based on results of processing aerial and satellite hyperspectral data. *Tsvetnye metally i mineraly: Sbornik dokladov IX Mezhdunarodnogo kongressa*. Krasnoyarsk, 2017, pp. 889–897. (In Russian).

11. Smirnova I. O., Kirsanov A. A., Kamyshnikova N. V. Obzor zarubezhnykh dostizheniy za poslednie pyat' let v oblasti ispol'zovaniya mul'ti- i giperspektral'nykh sputnikovykh dannyykh i sovremennykh metodov ikh obrabotki v geologicheskikh issledovaniyakh [Review of foreign achievements over the past five years in the use of multispectral and hyperspectral satellite data and modern methods of their processing in geological research]. *Current problems in remote sensing of the Earth from space*. Moscow, 2020, vol. 17, no. 7, pp. 9–27. (In Russian).

12. Kirsanov A. A., Petrov O. V., Morozov A. F., Lipiyaynen K. L., Smirnov M. Yu. Utilization of ASTER hyperspectral data during prospecting for solid minerals. *Proceedings of the 34th International Geological Congress*. Brisbane, Australia, 2012, available at: <http://www.34igc.org/scientific-themes-symposia.php> (accessed 21 January 2019).

Кирсанов Александр Андреевич – канд. географ. наук, директор, Центр дистанционных методов природоресурсных исследований ВСЕГЕИ¹ (ЦДМИ ВСЕГЕИ). <Aleksandr_Kirsanov@vsegei.ru>

Смирнов Михаил Юрьевич – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹. <Mikhail_Smirnov@vsegei.ru>

Липияйнен Константин Львович – зам. директора, ЦДМИ ВСЕГЕИ¹. <Konst_Lipiyaynen@vsegei.ru>

Кирсанов Георгий Александрович – зав. сектором, ЦДМИ ВСЕГЕИ¹. <Georgy_Kirsanov@vsegei.ru>

Kirsanov Alexandr Andreevich – Candidate of Geographical Sciences, Director, VSEGEI Centre for remote sensing methods of natural resource studies (VSEGEI CRSM)¹. <Aleksandr_Kirsanov@vsegei.ru>

Smirnov Mikhail Yuryevich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Senior Researcher, VSEGEI¹. <Mikhail_Smirnov@vsegei.ru>

Lipiyaynen Konstantin Lvovich – Deputy Director, VSEGEI CRSM¹. <Konst_Lipiyaynen@vsegei.ru>

Kirsanov Georgy Aleksandrovich – Head of Sector, VSEGEI CRSM¹. <Georgy_Kirsanov@vsegei.ru>

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia, 199106.