

А. А. КИРСАНОВ, К. Л. ЛИПИЯЙНЕН, М. Ю. СМИРНОВ,
Г. А. КИРСАНОВ, И. О. СМирНОВА, В. О. ПАВЛОВА (ВСЕГЕИ)

Выявление площадей, перспективных на золотое оруденение, на основе результатов обработки аэро- и космических гиперспектральных данных

Изложены основные этапы технологии обработки и анализа гиперспектральных данных при поисках полезных ископаемых. Приведены примеры использования гиперспектральных данных (аэро- и космических) для выявления зон гидротермально-метасоматических изменений горных пород, перспективных на золотое оруденение на Суеткинской (Республика Алтай) и Многовершинной площадях (Амурская область).

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

A. A. KIRSANOV, K. L. LIPIYAYNEN, M. YU. SMIRNOV,
G. A. KIRSANOV, I. O. SMIRNOVA, V. O. PAVLOVA (VSEGEI)

Identification of areas perspective for gold mineralization based on results of airborne and satellite hyperspectral data processing

Main stages of technology of processing and analysis of hyperspectral data for mineral exploration are described. Examples of hyperspectral data (airborne and satellite) application to identify zones of hydrothermal-metasomatic alterations of rocks, perspective for gold mineralization in the Suetkinskaya area (Altai Republic) and Mnogovershinnaya area (Amur region) are given.

Keywords: hyperspectral data, ASTER, indicator minerals, hydrothermal alteration of rocks, gold mineralization.

Как цитировать эту статью: Кирсанов А. А. Выявление площадей, перспективных на золотое оруденение, на основе результатов обработки аэро- и космических гиперспектральных данных / А. А. Кирсанов, К. Л. Липияйнен, М. Ю. Смирнов, Г. А. Кирсанов, И. О. Смирнова, В. О. Павлова // Регион. геология и металлогения. — 2019. — № 78. — С. 82–90.

Введение. В России в условиях труднодоступности большей части территории суши требуется применение новых передовых технологий с использованием современных данных дистанционного зондирования Земли. Одним из перспективных направлений повышения эффективности прогнозно-поисковых работ на твердые полезные ископаемые (золото, серебро, платина, медь, уран, полиметаллы и др.) является применение инновационных технологий — материалов космо- и аэрогиперспектральной съемки. В настоящее время наиболее доступны японские космические данные ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer), характеристики которых приведены в таблице.

Основы использования гиперспектральных данных для картирования минералов. Технологии основаны на построении изображений

земной поверхности в каждом из узких интервалов (около 10 нм), регистрируемого спектра электромагнитных волн как отраженного, так и собственного теплового излучения природных объектов. Гиперспектральные изображения используются для определения и картирования минералов по их спектрам, которые показывают отражение материала вдоль амплитуды волны. Многие минералы имеют уникальный спектр отражения и поглощения в различных спектральных диапазонах и могут быть выделены по этим спектрам (рис. 1, 2). При этом на изображении регистрируется смешанный сигнал от всех минералов, входящих в каждый пиксел. Спектры минералов отличаются большим разнообразием и определяются химическим составом и структурой минерала — типом кристаллической решетки. Использование материалов гиперспектральных съемок при прогнозно-поисковых работах заключается

Спектральные диапазоны данных ASTER

Система	Номер канала	Спектральный диапазон, мкм	Цвет	Пространственное разрешение, м
VNIR (видимые и БИК)	1	0,52–0,60	Зеленый	15
	2	0,63–0,69	Красный	
	3	0,76–0,86	Ближний ИК	
SWIR (ИК)	4	1,60–1,70	Средний ИК	30
	5	2,145–2,185		
	6	2,185–2,225		
	7	2,235–2,285		
	8	2,295–2,365		
TIR (тепловой)	9	2,36–2,43	Дальний ИК	90
	10	8,125–8,475		
	11	8,475–8,825		
	12	8,925–9,275		
	13	10,25–10,95		
14	10,95–11,65			

в возможностях диагностики по спектральным характеристикам отдельных индикаторных минералов или минеральных ассоциаций для выявления большинства рудных объектов.

Околорудные изменения рудовмещающих пород. Принимая во внимание то, что рудные компоненты во многих типах месторождений составляют лишь незначительные проценты общей массы, индикаторами рудных тел также являются околорудные изменения рудовмещающих пород, которые могут быть зафиксированы на материалах гиперспектральных съемок. Тесная генетическая связь рудообразования с гидротермально-метасоматическими процессами установлена многими исследованиями и отражена в многочисленных публикациях. В последний период наиболее полно и обстоятельно эти вопросы рассмотрены в монографии Е. В. Плющева, В. В. Шатова и С. В. Кашина «Металлогения гидротермально-метасоматических образований» [6]. О значимости околорудных изменений еще в середине XX в. писали Н. Н. Курек и Н. И. Наконник, отмечая, что горные породы, метасоматически измененные в результате магматогенных рудоотлагающих процессов, составляют особую группу минеральных образований, имеющую важное поисковое значение [2]. Процессы, вызывающие появление этих пород, носят названия, соответствующие образующимся породам (грейзенизация, скарнирование, пропилизация, березитизация, листвинитизация) или развивающимся в породах характерным минералам (окварцевание, серицитизация,

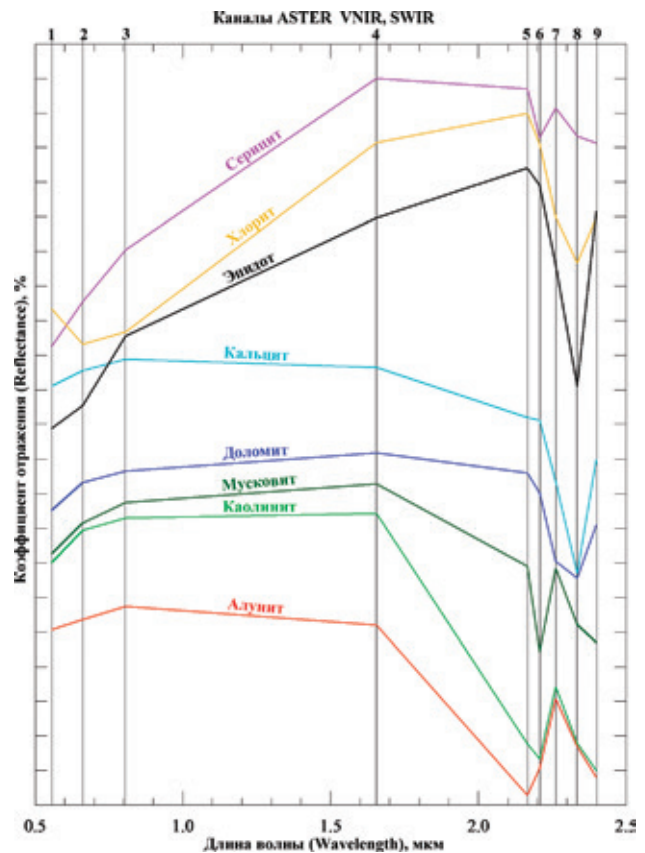


Рис. 1. Спектры минералов алузит, доломит, кальцит, каолинит, мусковит, серицит, хлорит и эпидот в соответствии с VNIR и SWIR каналами КС ASTER

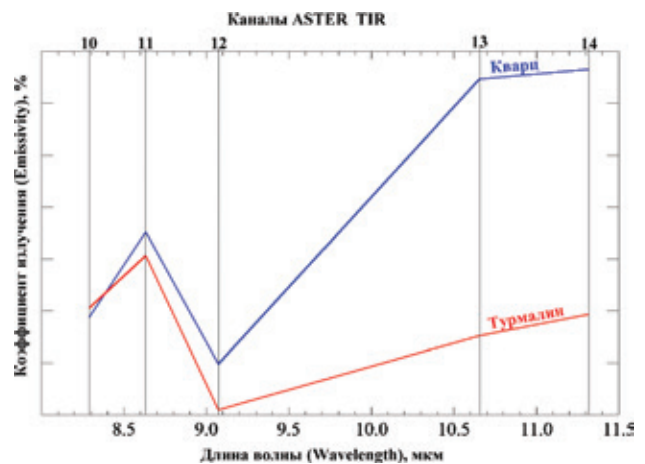


Рис. 2. Спектры минералов кварца и турмалина в соответствии с TIR каналами КС ASTER

хлоритизация, серпентинизация, карбонатизация, баритизация, каолинизация и проч.). Метасоматически измененные породы относятся к признакам, наиболее тесно связанным с эндогенными минеральными месторождениями. Они прежде всего являются продуктами постмагматических пневматолитовых или гидротермальных процессов, которые могут как сопровождать формирование промышленных месторождений, так

и протекать без образования последних. С другой стороны, можно утверждать, что всякое эндогенное месторождение минерального сырья сопровождается метасоматическими изменениями вмещающих пород [2, 6]. К минералам-индикаторам околорудных изменений рудовмещающих пород, которые фиксируются на гиперспектральных изображениях, относятся альбит, алунит, барит, гипс, карбонаты, каолинит, монтмориллонит, кварц, окислы и гидроокислы железа, сульфиды, серицит, хлорит, эпидот и ряд других минералов.

Задача картирования минералов-индикаторов по данным спектрометрии состоит в определении ассоциации минералов, т. е. минерального состава горных пород по их спектральным характеристикам или, в терминах обработки изображений, построения такого выходного результирующего изображения, в котором яркости каждого пикселя соответствует значение картируемого признака.

Основные этапы технологии обработки и анализа гиперспектральных данных для выявления зон гидротермально-метасоматических изменений горных пород. Опытные-методические работы по использованию аэро- и космических гиперспектральных данных с целью выявления зон околорудных изменений горных пород, перспективных на золотое оруденение, проведены на Суеткинской площади (Республика Алтай) по договору с ООО «Горно-Алтайская экспедиция». В исследованиях использованы гиперспектральные космические данные ASTER и аэрогиперспектральные снимки, которые были получены видеоспектрометром «Фрегат», в 128 спектральных каналах в диапазоне 0,4–1,0 мкм; со спектральным разрешением – 3,6 нм. Во время полевых работ проведены маршрутные наблюдения, в ходе которых с использованием спектрометра FieldSpec 3 проводилось спектрометрирование горных пород, в том числе с участками околорудных изменений. В результате работ в 53 точках наблюдения по данным полевого спектрометрирования получен 141 спектр горных пород, на базе которых создавалась библиотека спектров минералов и горных пород.

Исследования проводились в соответствии с технологией обработки аэро-космических гиперспектральных данных, разработанной в центре дистанционных методов природоресурсных исследований ВСЕГЕИ, на основе программного продукта ENVI с использованием библиотеки спектров минералов и горных пород, полученных в полевых условиях или в лаборатории.

Процесс исследований включал ряд последовательных технологических операций: создание гиперспектральной дистанционной основы (ГДО); анализ карт (геологической,

геохимической, полезных ископаемых), а также объяснительной записки к ним и других источников информации с целью получения сведений о геологическом строении изучаемой площади и имеющихся и прогнозируемых полезных ископаемых в ее пределах; выбор наиболее информативных минералов-индикаторов рудных зон и околорудных изменений горных пород; подбор из библиотек спектров минералов-индикаторов; выбор методов обработки ГДО видимого, ближнего инфракрасного и инфракрасного теплового диапазонов; обработка ГДО в информативных спектральных каналах; создание схем пространственного распределения минералов-индикаторов; выявление площадей, перспективных на поиски полезных ископаемых, с использованием карт геологического содержания.

Разработанная технология обработки ГДО позволяет получить *вероятностную* схему распространения индикаторных минералов рудных залежей и ассоциированных с ними околорудных изменений, благоприятных для локализации оруденения на исследуемой территории. Фигуративные точки минералов-индикаторов, как правило, неравномерно рассеяны по площади, образуя комплексные ореолы и локальные группировки в различных сочетаниях – *комплексные спектрометрические аномалии*¹. Исследования показали, что в поле фигуративных точек какого-либо минерала-индикатора возможны ложные «аномалии», появление которых может быть связано, например, с наличием техногенных объектов. Такие «аномалии» выбраковываются при дальнейших построениях.

Также необходимо отметить, что применение данной технологии имеет определенные ограничения в районах со сплошным растительным покровом, который является маскирующим фактором, в той или иной степени влияющим на характер интегральной спектральной кривой каждого пикселя гиперспектрального изображения (снимка) и, как следствие, снижающим достоверность результата.

Примеры использования технологии обработки и анализа гиперспектральных данных для выявления площадей, перспективных на золотое оруденение. Во ВСЕГЕИ по заданию Роснедра проводятся работы в рамках ГДП-200 в различных регионах России по картированию на основе данных ASTER минералов-индикаторов оруденения на территориях, перспективных для какого-либо вида или комплекса полезных ископаемых.

¹ Под *комплексными спектрометрическими аномалиями* понимаются участки локализации (или компактные ореолы) фигуративных точек минералов-индикаторов (рудных и нерудных), слагающих залежи полезных ископаемых и околорудных изменений или их ассоциаций в различных сочетаниях, которые позволяют получить *вероятностную* картину распространения рудных объектов на территории.

На 90 площадях в различных регионах России с применением разработанной технологии диагностики минералов-индикаторов оруденения по комплексу признаков намечены прогнозные участки, перспективные на выявление различных рудных полезных ископаемых. Результаты исследований были представлены на международных и российских конгрессах и конференциях [1, 4, 5, 7].

Примером использования технологии применения аэро- и космических гиперспектральных данных являются работы на Суеткинской площади, в пределах которой развит в основном холмисто-грядовый рельеф и находятся значительные участки, лишенные растительности или с редкой травянистой растительностью и закрытые сельскохозяйственными угодьями

Для Суеткинской площади были определены следующие минералы-индикаторы: кварц, кальцит, пирит, серицит, адуляр, гидрокарбонаты меди (азурит, малахит) и ассоциации: кварц-лимонит-гематит, березитовая (кварц-серицит-пирит), сульфидная.

По материалам обработки ГДО (по данным ASTER) была составлена схема минералов-индикаторов зон гидротермально-метасоматически измененных горных пород м-ба 1 : 50 000. В результате ее анализа были намечены площади для проведения работ с использованием материалов проведенной гиперспектральной аэросъемки в 128 спектральных каналах. Обработка ГДО (по данным аэросъемки) проводилась с использованием спектральной библиотеки, созданной по материалам полевого спектрометрирования.

Результатом работ явилась карта-схема минералов-индикаторов зон гидротермально-метасоматически измененных горных пород, перспективных на золотое оруденение, с выделением 18 площадей, рекомендуемых для постановки поисковых работ, м-ба 1 : 10 000 (рис. 3). Прогнозные участки выделялись по комплексу признаков и на основании анализа: схемы зон околорудных изменений горных пород, составленной по результатам обработки ГДО м-ба 1 : 10 000; карты аномалий золота во вторичных ореолах рассеяния (м-ба 1 : 50 000); карты аномалий меди, свинца и цинка во вторичных ореолах рассеяния (м-ба 1 : 50 000); карты аномалий серебра, мышьяка и сурьмы во вторичных ореолах рассеяния (м-ба 1 : 50 000).

По результатам анализа были выделены три группы:

1. Участки 1-й очередности по совпадению площадей с зонами околорудных изменений горных пород; участков повышенных концентраций золота; полиметаллов; серебра, мышьяка и сурьмы.

2. Участки 2-й очередности по совпадению площадей с зонами околорудных изменений

горных пород; участков повышенных концентраций золота.

3. Участки 3-й очередности намечены только на площадях, отобранных по результатам обработки аэрогиперспектральных данных и отображенных на схеме зон околорудных изменений горных пород.

Достоверность прогноза нуждалась в заверке традиционными наземными поисковыми методами и была подтверждена в ходе поисковых работ ООО «Горно-Алтайская экспедиция».

В качестве примера также приведены результаты исследований территории на севере Нижнего Приамурья (площадь Многовершинная) от южной оконечности хр. Мавечан и горных массивов Многовершинный и Орел на севере до холмисто-увалистых предгорий и оз. Орель на юге, которая является важной составной частью Нижнеамурского золотоносного района [3]. К настоящему времени здесь известны несколько промышленленных россыпей золота и одно коренное месторождение, а также около 20 проявлений. Кроме того, установлены проявления медных, медно-молибденовых и свинцовых руд. Все коренные месторождения золота по генезису – гидротермальные и гидротермально-метасоматические и относятся к золото-кварцевой формации. Пространственно они тесно связаны с выходами магматических пород, разрывными нарушениями и зонами гидротермальных изменений. Вмещающие породы прорваны дайками, сложенными породами пестрого петрографического состава (андезиты, гранит-порфиры и т. п.). Они подвергнуты гидротермальным изменениям – окварцеванию, серицитизации, пропилитизации (ассоциация эпидот + хлорит + серицит + кварц +/- рудные минералы в различных сочетаниях), грейзенизации (ассоциация кварц + слюда + турмалин +/- рудные минералы) и проч. Гидротермально измененные породы приурочены к разрывам и образуют рудные зоны. Осевое положение этих зон занимают жильные тела кварца и кварц-серицитовых пород, которые несут основную золотую минерализацию. Кроме того, в составе рудных тел присутствуют серебро, пирит, блеклые руды, арсенопирит, халькопирит, пирротин, сфалерит, галенит, молибденит и другие соединения. Таким образом, основными минералами-индикаторами коренной золотоносности являются кварц, серицит, турмалин, сульфиды, эпидот и хлорит.

Специализированная компьютерная обработка ГДО позволяет получить вероятностную схему распределения минералов-индикаторов рудных тел и ассоциированных с ними околорудных изменений, благоприятных для золоторудной минерализации на площади Многовершинная. Фигуративные точки минералов образуют на ряде участков комплексные

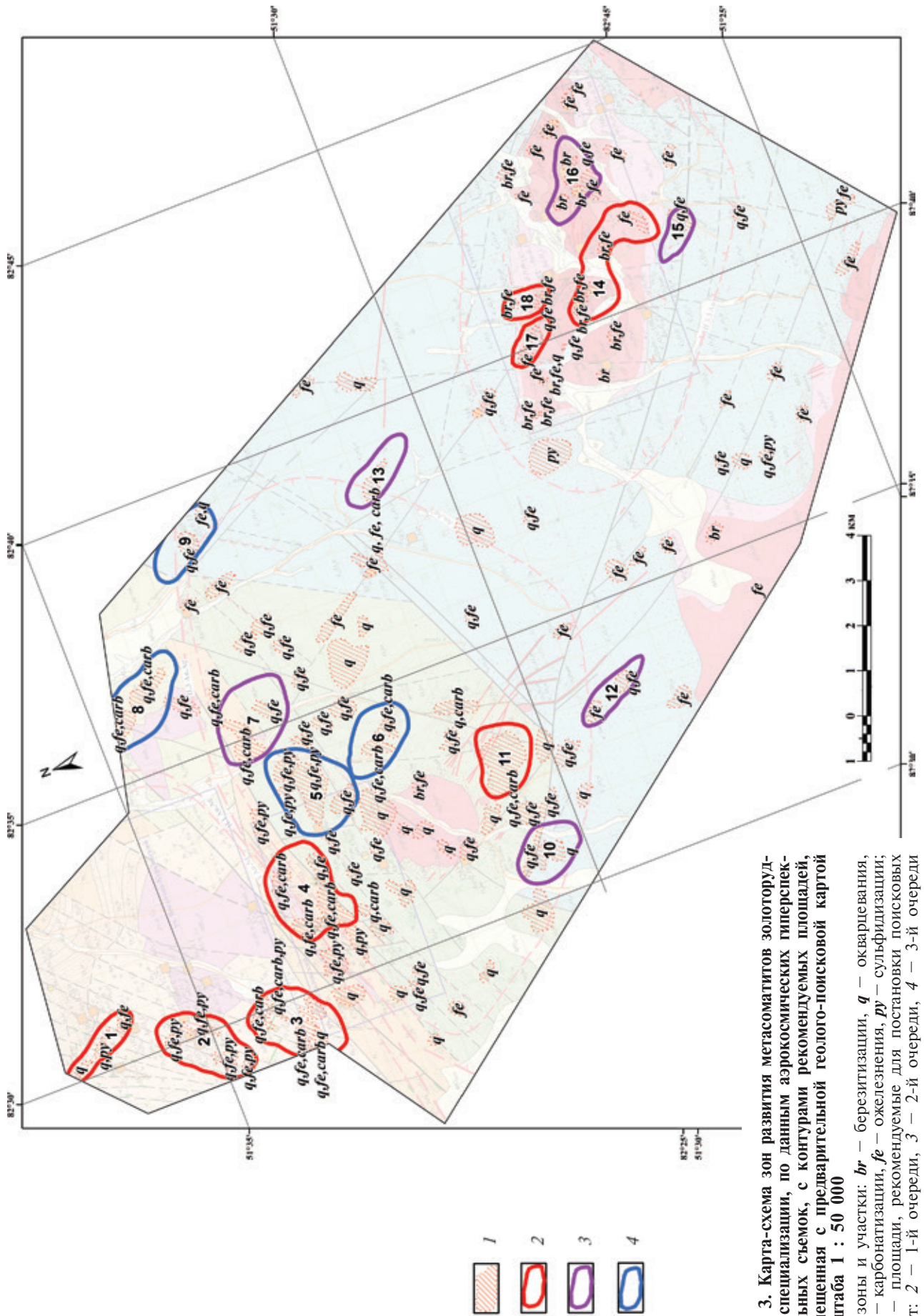


Рис. 3. Карта-схема зон развития метасоматитов золоторудной специализации, по данным аэрокосмических гиперспектральных съемок, с контурами рекомендуемых площадей, совмещенная с предварительной геолого-поисковой картой масштаба 1 : 50 000

1 – зоны и участки: *br* – березитизации, *q* – окварцевания, *carb* – карбонатизации, *fe* – ожелезнения, *py* – сульфидизации; 2–4 – площади, рекомендуемые для постановки поисковых работ: 2 – 1-й очереди, 3 – 2-й очереди, 4 – 3-й очереди

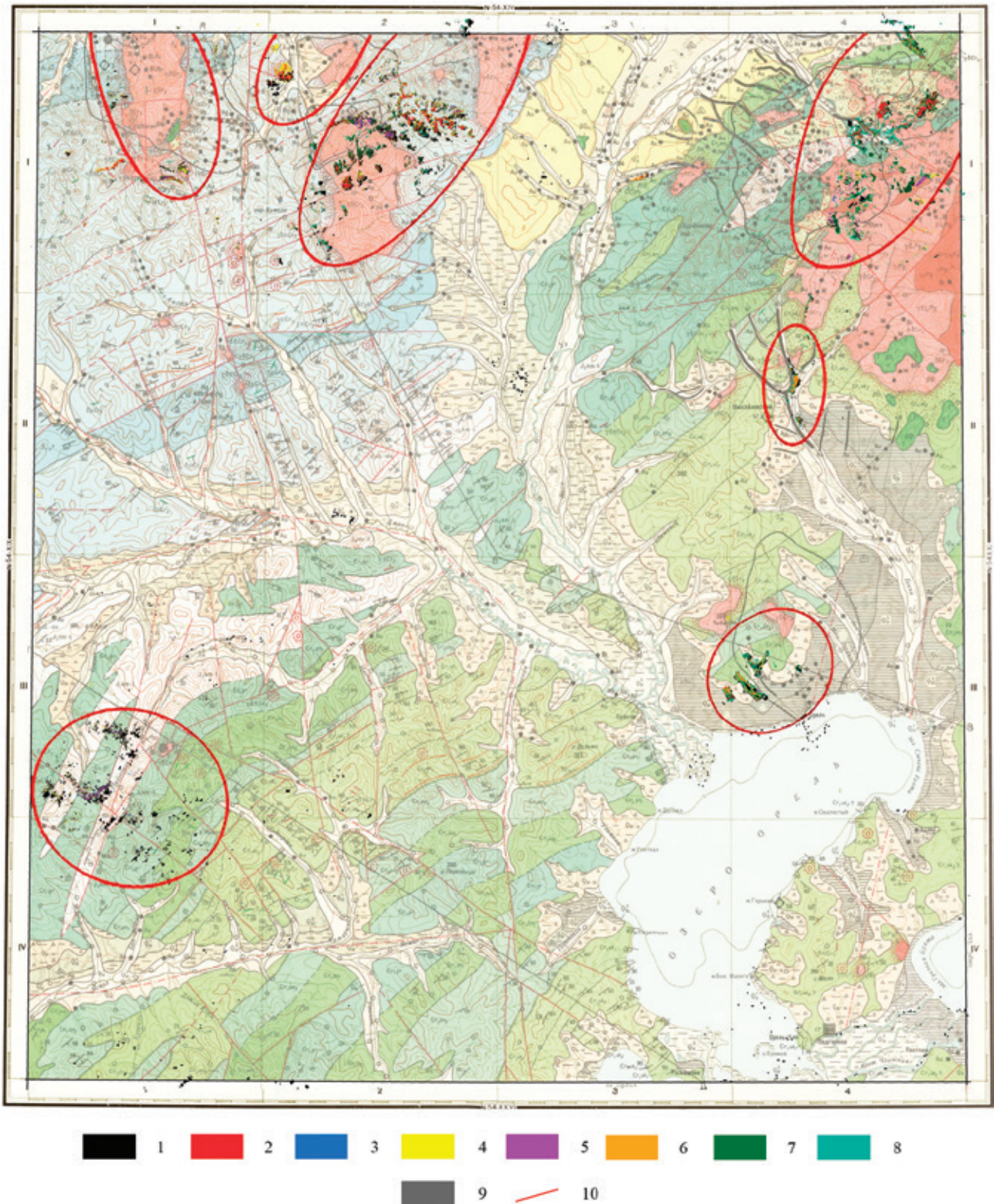


Рис. 4. Схема прогнозных площадей, перспективных на выявление месторождений полезных ископаемых, совмещенная с картой полезных ископаемых масштаба 1 : 200 000 [3]

1 – кварц, 2 – серицит, 3 – эпидот, 4 – хлорит, 5 – турмалин, 6 – пирит, 7 – халькопирит, 8 – арсенопирит, 9 – молибденит, 10 – прогнозные площади. Остальные усл. обозн. см. на Карте полезных ископаемых, лист N-54-XX, масштаб 1 : 200 000 (М.: ВАНПО «Аэрогеология», 1975)

ореолы и локальные группировки в различных комбинациях – комплексные спектральнометрические аномалии.

На исследуемой площади выделено семь таких ореолов (рис. 4). Четыре из них расположены на севере территории. Первый ореол приурочен к гранодиоровому массиву горы Чадаян (высота 971 м), второй расположен на правом и левом берегах р. Чадай, третий охватывает водораздел р. Чадай и долины р. Ул. Все три участка имеют схожее геологическое строение. Интрузии позднемеловых гранодиоритов

прорывают ниже-среднеюрские терригенные отложения, в их экзо- и эндоконтактных зонах отмечены золоторудные – кварцевые жилы с золотом (и медно-молибденовые – кварцевые жилы с сульфидами) проявления, участки гидротермально-метасоматических изменений пород – кварцевание, серицитизация, в первом и третьем ореолах отмечается грейзенизация и локальная пропилитизация, также имеются шлиховые ореолы золота и геохимический ореол меди. Четвертый ореол приурочен к горным массивам Многовершинный и Орел

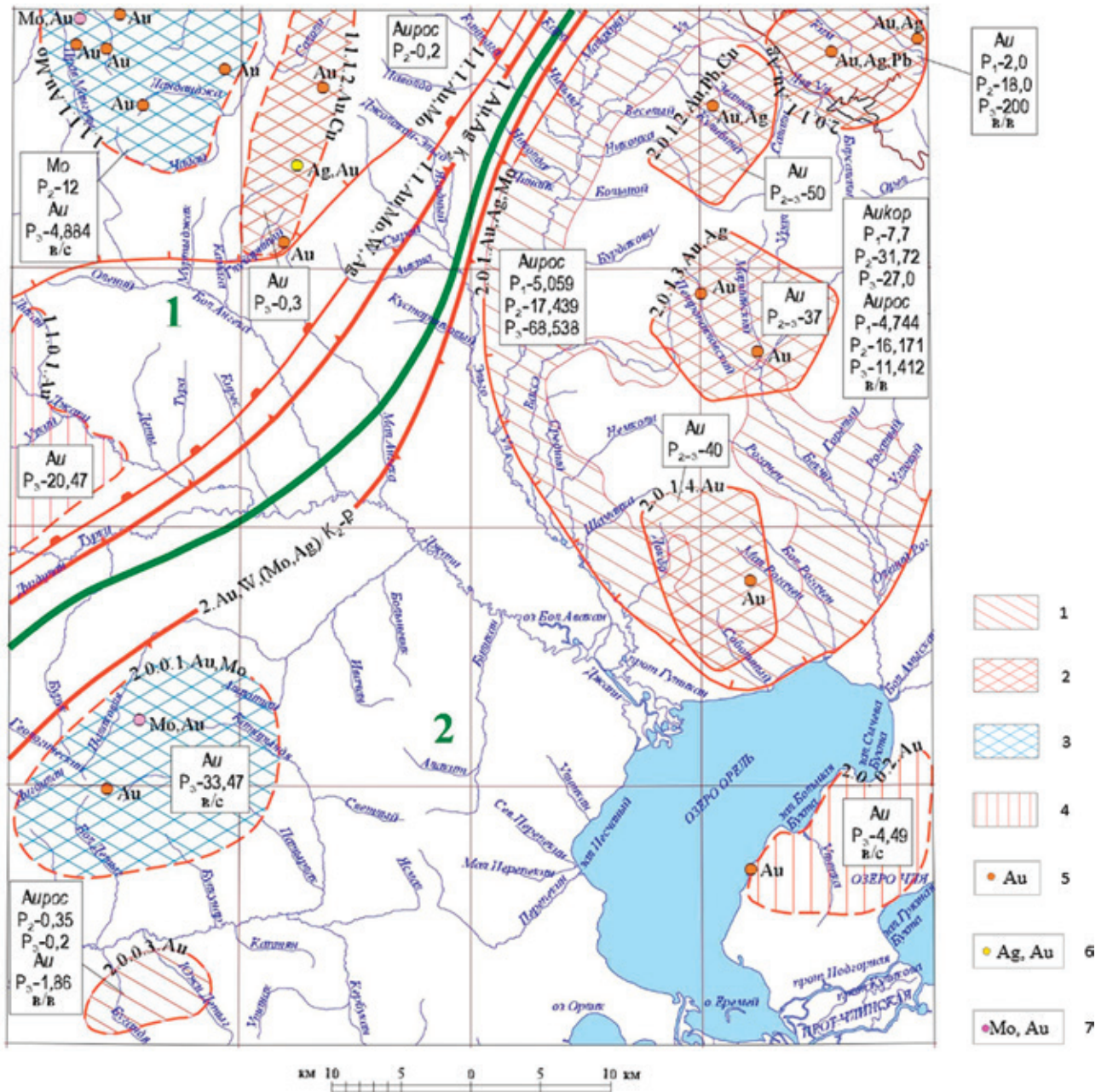


Рис. 5. Схема минерагенического районирования и прогноза полезных ископаемых

1–4 – рекомендуемые виды геологоразведочных работ, специализированные на выявлении: 1 – поисковые 1-й очереди – золотых близповерхностных и глубокозалегающих россыпей, 2 – поисковые и поисково-оценочные 1-й очереди – коренных месторождений золота и серебра, 3 – поисковые и поисково-оценочные 1-й очереди – коренных месторождений золота и молибдена, 4 – поисковые 2-й очереди – коренных месторождений золота; 5–7 – перспективные проявления: 5 – золота (Au), 6 – серебра, золота (Ag, Au), 7 – молибдена, золота (Mo, Au)

(высота 1097 м). Участок имеет сложное геологическое строение: гранитоидные тела и жильные образования пестрого петрографического состава позднемелового (и палеогенового) возраста прорывают толщи верхнеюрских и нижнемеловых терригенных отложений, верхнемеловых лав умеренно-кислого и среднего составов. Интенсивно проявлены разрывная тектоника и приуроченные к разрывам гидротермально-метасоматические изменения пород – окварцевание, серицитизация, пропилитизация, грейзенизация, сопровождающиеся сульфидной минерализацией, также отмечается образование вторичных кварцитов. Вулканогены, в разной степени затронутые процессами пропилитизации, превращены в эпидот-хлоритовые, хлорит-карбонатные, хлорит-карбонат-серицитовые, реже в кварц-серицитовые породы, терригенные отложения – в серицит-кварцевые и кварцитовидные (окварцованные или превращенные во вторичные кварциты), реже в кварц-турмалиновые породы или грейзенизированные. На этом участке расположено золоторудное месторождение Многовершинное с многочисленными кварцево-жильными рудопроявлениями и пунктами благороднометалльной минерализации, имеются золотые россыпи и геохимический и шлиховой ореолы. Пятый ореол расположен в верховьях р. Бекча и ее притоков. В геологическом отношении этот участок представляет собой шток и дайки гранодиоритов, прорывающие терригенные породы нижнего мела, здесь имеется крупные золотые россыпи и кварцево-жильное золоторудное (с сульфидами) проявление. Шестой ореол локализован на северном берегу оз. Орель (гора Амбарга, высота 323 м). По геологическому строению участок аналогичен предыдущему, имеются золотоносные россыпи и шлиховой ореол. Источник золота, вероятно, – сульфидно-кварцевые жилы. Последний седьмой ореол фигуративных точек кварц-сульфидной с молибденитом минерализации расположен у западной рамки площади в верховьях рек Палаковля и Бурук и приурочен к полю распространения верхнеюрских и нижнемеловых терригенных отложений, прорванных в северо-восточной части штоком гранодиоритов. Интенсивно выражена разрывная тектоника, отмечаются окварцевание пород и хлорит-кварцевые и кварц-турмалиновые жильные (?) образования с молибденитом. Золоторудное проявление локализовано в штокверковой зоне кварцевых прожилков с сульфидами, медно-молибденовое проявление – в гидротермалитах зоны дробления на контакте гранодиоритового штока.

В результате исследований создана схема перспективных на золотое оруденение прогнозных площадей, построенная на основе учета комплекса гиперспектральных характеристик ассоциаций индикаторных минералов

(рис. 4). Проведенный анализ полученных материалов, геолого-геохимических и минералогических данных показал, что прогноз-ные площади, выявленные по результатам обработки ГДО, совпадают с выделенными независимо от наших исследований перспективными участками на Схеме минерагенического районирования и прогноза полезных ископаемых, составленной по данным полевых и геохимических работ (Ю. Ю. Юрченко, 2016) (рис. 5).

Заключение. Опыт проведенных работ доказывает, что использование данных ASTER является эффективным инструментом при прогнозировании и на начальных стадиях поиска месторождений, обеспечивая убедительной информацией о распределении минералов-индикаторов оруденения на изучаемой территории. Более достоверные результаты достигаются при комплексировании космических данных ASTER с данными, полученными авиационными и наземными гиперспектрометрами. Использование разработанной технологии обработки и анализа комплекса гиперспектральных данных дает возможность на ранних стадиях геологоразведочного процесса выявлять потенциально перспективные участки, что позволяет существенно снизить себестоимость работ за счет локализации районов поисков полезных ископаемых.

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

2. Измененные окологорудные породы и их поисковое значение: Сборник статей / ред. Н. Н. Курек. – М.: Госгеолтехиздат, 1954. – 270 с.

3. Карта полезных ископаемых. Лист N-54-XX. Масштаб 1 : 200 000. – М.: ВАНПО «Аэрогеология», 1975.

4. Опыт выявления гидротермально-метасоматических изменений горных пород на основе обработки данных гиперспектральных съемок / А. А. Кирсанов, К. Л. Липийинен, В. О. Павлова, Г. А. Кирсанов, М. Ю. Смирнов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, природных и антропогенных объектов): Тезисы докл. Тринадцатой Всерос. конф. – М.: ИКИ, 2015. – С. 353. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5360 (дата обращения: 21.01.2019).

5. Опыт применения аэро- и космических гиперспектральных данных при решении геологоразведочных задач / А. А. Кирсанов, К. Л. Липийинен, 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: Материалы Второй Междунар. конф. – СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. – С. 25–28.

6. Плюшев Е. В., Шатов В. В., Кашин С. В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований. – СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. – 560 с. – (Труды ВСЕГЕИ. Нов. серия; т. 354).

7. Kirsanov A. A., Petrov O. V., Morozov F. F., Lipiyainen K. L., Smirnov M. Yu. Utilization of ASTER hyperspectral data during prospecting for solid // Proc. of 34 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. Identification of areas perspective for the search for solid minerals, according to the processing of airborne and satellite hyperspectral data. *Scientific and methodological foundations of the forecast, prospecting and evaluation of deposits of noble, non-ferrous metals and diamonds Collection of abstracts of the VII scientific-practical conference*. Moscow: TsNIGRI. 2017. Pp. 23. (In Russian).

2. *Izmenennyye okolorudnyye porody i ikh poiskovoye znachenie: Sbornik statey [Modified surroundings and their search value: Collection of articles]*. Ed. by N. N. Kurek. Moscow: Gosgeoltekhizdat. 1954. 270 pp.

3. Карта полезных ископаемых. List N-54-XX. Masshtab 1 : 200 000 [Map of minerals. Sheet N-54-XX.

Scale 1:200,000]. Moscow: VANPO «Aerogeologiya». 1975.

4. Kirsanov A. A., Lipiyainen K. L., Pavlova V. O., Kirsanov G. A., Smirnov M. Yu. Experience in identifying hydrothermal-metasomatic changes in rocks based on data processing of hyperspectral surveys. *Modern Problems Remote sensing of the Earth from space (physical principles, methods and technologies for monitoring the environment, natural and man-made objects): Abstracts of the Thirteenth All-Russian Conference*. Moscow: IKI. 2015. Pp. 353. URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5360 (21.01.2019). (In Russian).

5. Kirsanov A. A., Lipiyaynen K. L., Smirnov M. Yu., Pavlova V. O. Experience of using airborne and satellite hyperspectral data when solving geological exploration tasks. *New technologies for processing and using Earth remote sensing data in geological exploration and monitoring of hazardous geological processes: Proceedings of the Second International Conference*. St. Petersburg: VSEGEI. 2014. Pp. 25–28. (In Russian).

6. 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.

7. Kirsanov, A. A., Petrov, O. V., Morozov, F. F., Lipiyaynen, K. L., Smirnov, M. Yu. 2012: Utilization of ASTER hyperspectral data during prospecting for solid. *Proc. of 34 International geological congress*. Brisbane, Australia. URL: <http://www.34igc.org/scientific-themes-symposia.php>. (21.01.2019).

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

Липийайнен Константин Львович – зам. директора, Центр дистанционных методов природоресурсных исследований ВСЕГЕИ¹. <Konst_Lipiyaynen@vsegei.ru>

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

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

Смирнова Ирина Олеговна – канд. географ. наук, вед. науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹. <Irina_Smirnova@vsegei.ru>

Павлова Виктория Олеговна – науч. сотрудник, ВСЕГЕИ¹, <Victoria_Pavlova@vsegei.ru>

Kirsanov Alexandr Andreevich – Candidate of Geographical Sciences, Director, Center for Remote Methods of Natural-Resources Research of VSEGEI¹. <Aleksandr_Kirsanov@vsegei.ru>

Lipiyaynen Konstantin Lvovich – Deputy Director, Center for Remote Methods of Natural-Resources Research of VSEGEI¹. <Konst_Lipiyaynen@vsegei.ru>

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

Kirsanov Georgy Aleksandrovich – Head of Sector, VSEGEI¹. <Georgy_Kirsanov@vsegei.ru>

Smirnova Irina Olegovna – Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, VSEGEI¹. <Irina_Smirnova@vsegei.ru>

Pavlova Victoria Olegovna – Researcher, VSEGEI¹. <Victoria_Pavlova@vsegei.ru>

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

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