

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

Локализация зон гидротермально-метасоматических пород с использованием методов спектрального анализа гиперспектральных космических снимков (на примере золоторудных объектов Ульинского прогиба, Хабаровский край)

Рассмотрены технологические особенности применения спектрального анализа гиперспектральных данных, позволяющие при прогнозировании и на начальных этапах поисков полезных ископаемых выявлять участки развития гидротермально-метасоматических околорудных преобразований горных пород. В исследованиях использована новая технология, включающая создание библиотеки спектров эталонных измененных пород, развитых в районе известного месторождения или рудного поля, спектральный анализ гиперспектральной дистанционной основы, выделение и анализ пространственного распространения гидротермально-метасоматических пород. Приведена хронология исследований на примере золоторудных объектов Ульинского прогиба Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (Хабаровский край), расположенных в пределах листа О-54-XIV. В результате работ выявлены спектрометрические аномалии как индикаторы рудопроявлений, что дает возможность локализовать площади поисковых работ.

Ключевые слова: околорудные гидротермально-метасоматические преобразования горных пород, золотое оруденение, космический снимок ASTER, гиперспектральная дистанционная основа, спектры пород, технология спектрального анализа.

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

Localization of zones of hydrothermal-metasomatic rocks using methods of spectral analysis of hyperspectral satellite images: Case study of gold targets in the Ulinsky Trough, Khabarovsk Territory

Technological aspects of using the spectral analysis of hyperspectral data are discussed. They make it possible to identify areas of hydrothermal-metasomatic wallrock alteration during forecasting and at initial stages of exploration. A new technology was used in the studies, including the creation of a library of spectra of reference altered rocks widespread in the area of a known deposit or an ore field, spectral analysis of hyperspectral remote basis, identification and analysis of the spatial distribution of hydrothermal-metasomatic rocks. The sequence of studies is given on the example of gold targets of the Ulinsky Trough, the Okhotsk-Chukchi Volcanic Belt (Khabarovsk Territory) located within the O-54-XIV sheet. As a result of the work, spectrometric anomalies were identified as indicators of ore occurrences, which made it possible to localize exploration areas.

Keywords: wallrock hydrothermal-metasomatic alterations, gold mineralization, ASTER satellite image, hyperspectral remote basis, rock spectra, spectral analysis technology.

Для цитирования: Кирсанов А. А. Локализация зон гидротермально-метасоматических пород с использованием методов спектрального анализа гиперспектральных космических снимков (на примере золоторудных объектов Ульинского прогиба, Хабаровский край) / А. А. Кирсанов, К. Л. Липияйнен, М. Ю. Смирнов, Г. А. Кирсанов, А. В. Золотухина // Региональная геология и металлогения. — 2022. — № 89. — С. 68–76. DOI: 10.52349/0869-7892_2022_89_68-76

Введение. Необходимость повышения прогнозно-поисковой эффективности региональных геологических работ, в том числе по ГДП-200, и пополнения фонда перспективных объектов требует применения инновационных технологий на основе использования новых источников информации и алгоритмов ее обработки, в том числе современных данных дистанционного зондирования Земли. В зарубежных исследованиях успешно используются космические гиперспектральные снимки ASTER, которые получают

в 14 спектральных каналах в трех диапазонах: 3 — в видимом и ближнем инфракрасном, 6 — коротковолновом инфракрасном и 5 — тепловом инфракрасном, с пространственным разрешением 15–30 м [15]. Технологии получения гиперспектральных данных основаны на построении изображений земной поверхности в каждом из узких интервалов (нанометры) регистрируемого спектра электромагнитных волн как отраженного, так и собственного теплового излучения природных и антропогенных объектов. Обязательным

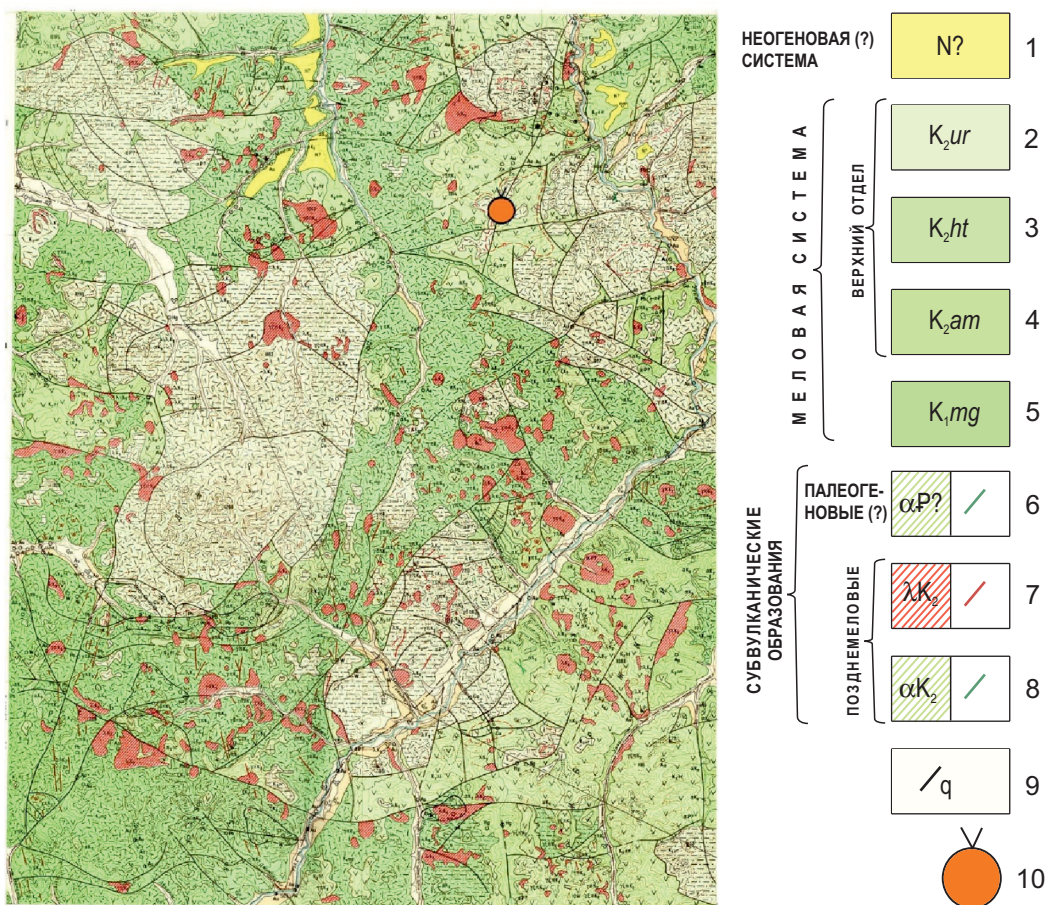


Рис. 1. Геологическая карта листа О-54-XIV [1]

1 – неразделенные отложения: пески, галечники, глины; 2 – уракская свита: игнимбриты липаритового и дацитового составов, липариты, их туфы и туфолавы, дациты, пачки туффитов и горизонты андезитов; 3 – хетанинская свита: андезиты и их туфы, андезито-базальты, туффиты, туфоаргиллиты и туфоалевролиты; 4 – амкинская свита: туффиты, туфопесчаники, туфы липаритов, туфоалевролиты; 5 – нижний отдел: магейская свита – липариты, дациты и их туфы, игнимбриты липаритового состава, туффиты, андезиты; 6 – андезиты; 7 – липариты, витролипартиты, игнимбриты липаритового состава (λK_2), гранит-порфиры ($\gamma\lambda K_2$), граносиенит-порфиры ($\gamma\zeta\lambda K_2$), трахилипартиты ($\lambda\tau K_2$), дациты, витродациты (ζK_2), гранодиорит-порофиры ($\gamma\delta\lambda K_2$), трахидациты ($\zeta\tau K_2$); 8 – андезиты; 9 – кварцевые жилы; 10 – месторождение Светлое

элементом анализа гиперспектральных снимков является наличие спектральной библиотеки, которая представляет собой коллекцию спектров отражения различных минералов и горных пород, полученных в полевых условиях или в лаборатории. Для создания такой библиотеки спектров во ВСЕГЕИ применяется полевой полнодиапазонный портативный спектрорадиометр PSR+ (имеет 1024 канала в спектральном диапазоне 350–2500 нм, спектральное разрешение 0,3–0,8 нм). Многие минералы и горные породы обладают уникальным спектром отражения и поглощения и могут быть выделены по этим спектрам при обработке гиперспектральных изображений [11; 13].

Принимая во внимание то, что рудные компоненты во многих типах месторождений составляют лишь незначительные проценты общей массы, индикаторами рудных тел являются окolorудные 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. [3; 14]. Поэтому основная задача исследований – 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 технологии формирования гиперспектральных дистанционных основ (ГДО) по космическим снимкам «ASTER» и методики их обработки, которые позволили создавать схемы выявленных минералов-индикаторов геологических обстановок, перспективных на полезные ископаемые. Результаты проведенных работ докладывались на российских и международных конференциях и конгрессах [4–13; 16].

Методы исследований. Для повышения качества результатов исследований во ВСЕГЕИ постоянно разрабатываются новые методические подходы к целенаправленной обработке

ГДО и прогнозной интерпретации получаемых материалов ее обработки. В настоящее время разработана и внедряется в практику геологоразведочных работ новая технология, основанная на спектральном анализе ГДО, с использованием библиотеки спектров гидротермально-метасоматических пород, отобранных в пределах известного рудного поля или месторождения. Результат спектрального анализа ГДО – выявление спектрометрических аномалий, включающих комплекс гидротермально-метасоматических пород, которые отображаются на схемах их вероятностного распределения по территории исследований, с целью локализации площадей поисковых работ.

Технология включает ряд последовательных операций:

- анализ минерагенической ситуации в районе месторождений или рудного поля и определение пород, с которыми связаны рудопроявления;
- отбор эталонных образцов гидротермально-метасоматических пород в пределах рудного поля;
- спектрометрирование эталонных пород полевым спектрометром;
- создание ГДО по космическим снимкам ASTER;
- спектральный анализ ГДО площади рудного поля или месторождения, с использованием созданной библиотеки спектров эталонных пород;
- создание схемы распространения эталонных пород по результатам спектрального анализа ГДО площади месторождения или рудного поля;
- оценка достоверности полученных результатов путем совмещения и анализа схемы точек отбора эталонных пород со схемой их распространения по результатам спектрального анализа ГДО;
- спектральный анализ ГДО всей площади листа с использованием спектров эталонных пород;
- создание схемы распространения эталонных пород по результатам спектрального анализа ГДО площади листа;
- анализ распространения эталонных пород и выделение спектрометрических аномалий – набора определенных пород, связанных или возможно связанных с рудопроявлениями;
- определение перспективных участков.

Геологическое строение. Исследования проводились на территории листа О-54-XIV, расположенного в центральной части Ульинского прогиба Охотско-Чукотского вулканогенного пояса, осложненной многочисленными разломами и вулканотектоническими структурами оседания, где повсеместно распространены ниже- и верхнемеловые вулканогенные отложения, в составе которых преобладают туфы и игнимбриты кислого и умеренно-кислого составов (рис. 1). Туффиты, андезиты и андезито-базальты имеют ограниченное распространение. Среди вулканитов мела выделены нижнемеловая мегейская (липариты, дациты и их туфы, игнимбриты, туффиты, андезиты) и верхнемеловые амкинская (туффиты, туфопесчаники, туфоалевролиты, туфы

липаритов), хетанинская (андезиты и их туфы, андезито-базальты, туффиты, туфоаргиллиты, туфоалевролиты) и уракская (игнимбриты липаритового и дацитового составов, липариты и их туфы, дациты, туффиты, андезиты) свиты. Локально присутствуют неогеновые и четвертичные терригенные отложения. Интрузивные образования занимают около 15% площади и представлены в основном субвулканическими андезитами, липаритами, гранит-порфирами, гранодиорит- и граносиенит-порфирами, дацитами, трахилипаритами и трахидацитами позднемелового возраста. Магматическая деятельность сопровождалась широким проявлением фумарольно-сульфатарных и гидротермальных процессов.

Горные породы, отличающиеся повышенной проницаемостью, в различной степени подверглись тем или иным метасоматическим преобразованиям и являются благоприятной средой для рудоотложения. По игнимбритам и лавовым фациям уракской свиты, частично по кислым и умеренно-кислым вулканитам магейской, амкинской и хетанинской свит, преимущественно образуются монокварциты, аргиллизированные и окварцованные по массе риолиты, диккит-каолинитовые метасоматиты, менее развиты диккит-кварцевые и кварц-диккит-каолинитовые метасоматиты, отмечаются локальные участки алунитовых разновидностей. По субвулканическим телам развиваются в основном монокварциты, фиксируется окварцевание риолитов по массе, алунит-кварцевые и диккит-алунитовые метасоматиты. Среди туфогенных фаций дацитов и туфо-песчанниковых отложений преимущественно развиты окварцованные по массе образования, монокварциты, алунитовые кварциты, диккит-кварцевые, алунит-кварцевые, диккит-алунитовые и диккит-каолинитовые метасоматиты [1; 2].

На территории отмечен ряд коренных золоторудных проявлений и месторождений: Ягодка, Чистый, Светлое, Уенма и др., россыпи Сухой, руч. Амундакит, шлиховые ореолы золота. Коренные проявления золота эпитептермальные, среди них выделяются золотоносные кварцевые жилы и гидротермально-метасоматические вторичные кварциты.

Результаты исследований. Для выделения новых площадей, перспективных на благороднометалльное оруденение с использованием ГДО, в качестве тестового объекта было выбрано рудное поле Светлое Секчинского (Уенминского) золоторудного узла, расположенное в пределах Дюльбакинской вулканотектонической депрессии (рис. 1). Поле объединяет ряд участков, локализованных среди вулканитов хетанинской и уракской свит и прорванных штоками и дайками уракского дацит-риолитового и хакаринского базальтового комплексов. На его площади наиболее полно представлены околорудные гидротермалиты-метасоматиты, в том числе вторичные кварциты (Геологическая

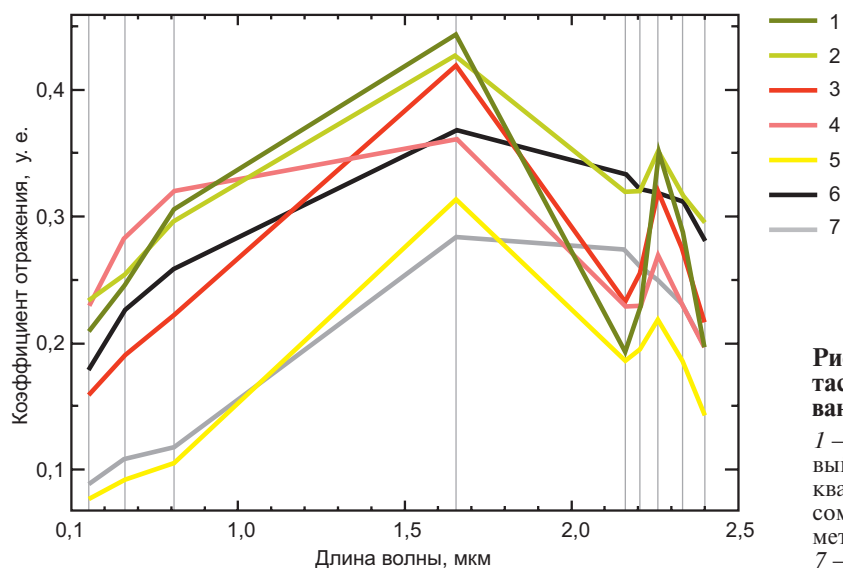


Рис. 2. Спектры эталонных образцов метасоматитов-гидротермалитов, адаптированных под 1–9 спектральные каналы ГДО
 1 – диккитовый кварцит; 2 – диккит-кварцевый метасоматит; 3 – диккит-каолиновые кварциты; 4 – диккит-каолиновые метасоматиты; 5 – кварц-диккит-каолиновые метасоматиты; 6 – монокварциты массивные; 7 – монокварциты пористые

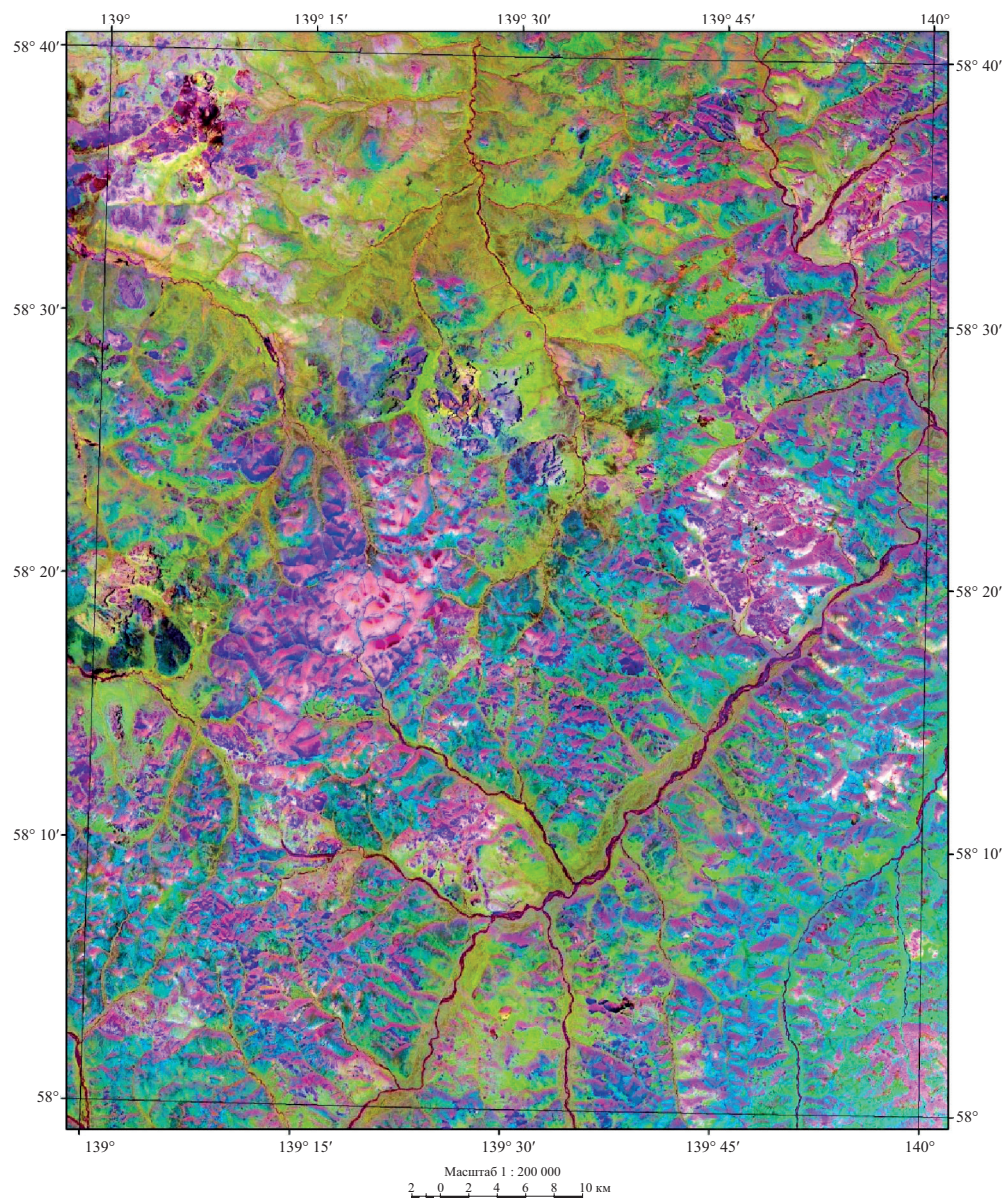


Рис. 3. Лист О-54-XIV. Гиперспектральная дистанционная основа по данным ASTER
 Синтезированное изображение RGB (2–4-й главных компонент) от 08.10.2000. Проекция Гаусса – Крюгера. Эллипсоид Красовского. Геодезическая система координат Пулково-1942 г.

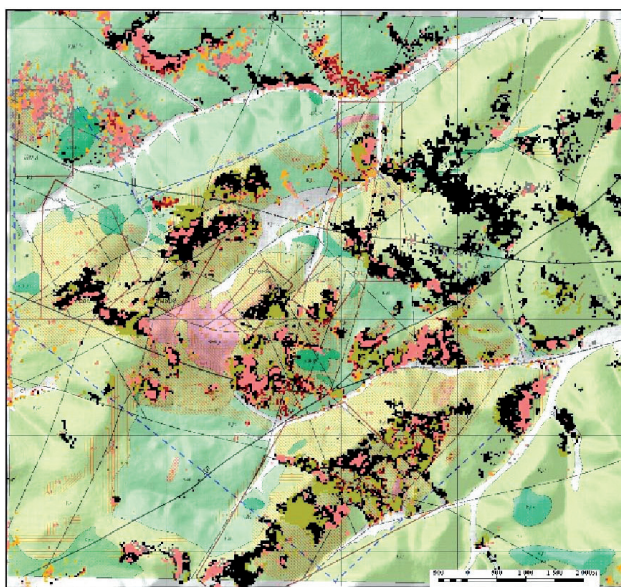


Рис. 4. Схема вероятностного распространения эталонных пород, наложенная на геологическую карту масштаба 1 : 25 000 (ООО «Светлое», Б. А. Новоселов, 2012), совмещенная с моделью рельефа

1 – диккитовый кварцит; 2 – диккит-кварцевый метасоматит; 3 – диккит-каолиновые кварциты; 4 – диккит-каолиновые метасоматиты; 5 – кварц-диккит-каолиновые метасоматиты; 6 – монокварциты массивные; 7 – монокварциты пористые

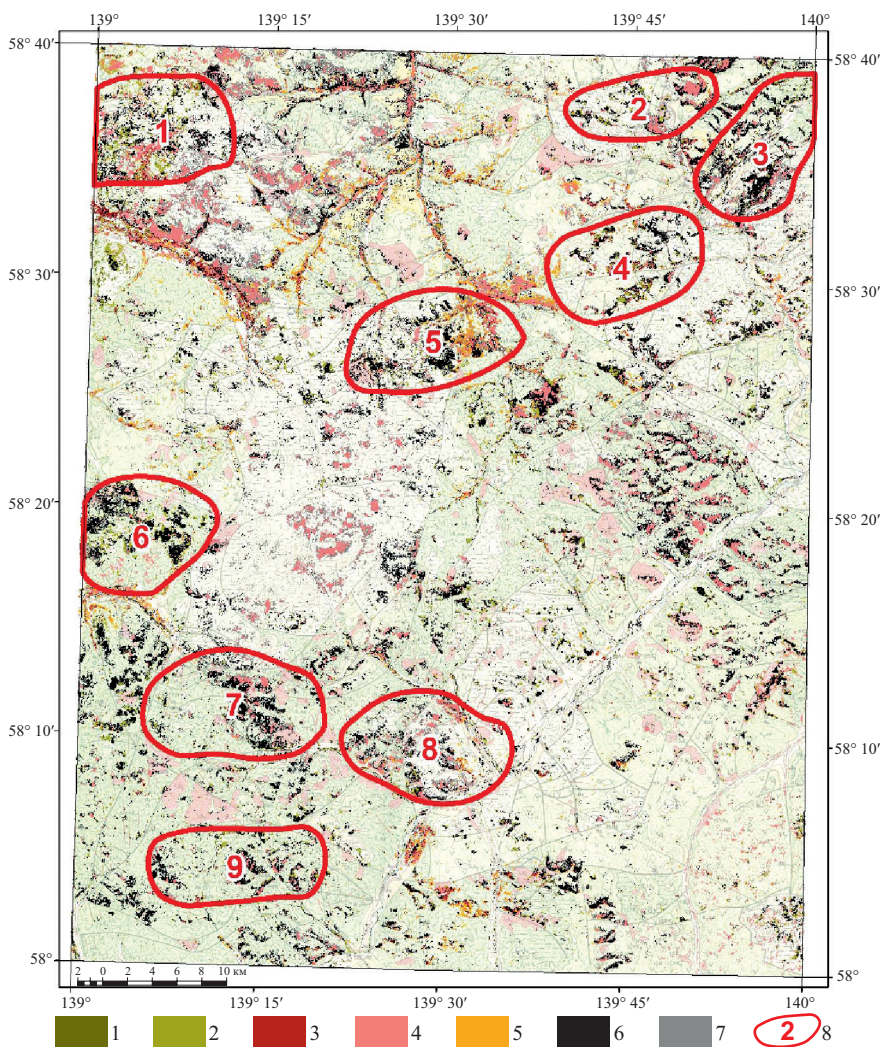


Рис. 5. Схема вероятностного распространения эталонных пород, наложенная на геологическую карту масштаба 1 : 200 000 [1]

1–7 – породы-образцы: 1 – диккитовый кварцит; 2 – диккит-кварцевый метасоматит; 3 – диккит-каолиновые кварциты; 4 – диккит-каолиновые метасоматиты; 5 – кварц-диккит-каолиновые метасоматиты; 6 – монокварциты массивные; 7 – монокварциты пористые; 8 – комплексные спектрометрические аномалии гидротермалитов-метасоматитов и их номера
Усл. обозн. к геологической карте см. на рис. 1

карта междуречья Алалинды и Онемна масштаба 1 : 25 000, Б. А. Новоселов, 2012).

На первом этапе исследований во ВСЕГЕИ в лабораторных условиях было проведено спектрометрирование отобранных специалистами Хабаровского филиала АО «Полиметалл УК» ООО «Светлое» с различных участков рудного поля Светлое и прилегающих площадей пространственно привязанных образцов эталонных метасоматитов-гидротермалитов: монокварцитов (массивных и пористых, кварца до 90 % и более); диккитовых и диккит-каолининовых кварцитов (кварца ~ 50–60 %); диккит-кварцевых, кварц-диккит-каолининовых (кварца до 10 %) и диккит-каолининовых (кварца ~ 20–40 %) метасоматитов, с применением спектрометра PSR+. В результате получены спектры, составившие локальную библиотеку (рис. 2).

Для проведения исследований на территории листа была создана гиперспектральная дистанционная основа (ГДО) по космическим снимкам ASTER в 14 спектральных каналах, включающая отдельные каналы и синтезированные изображения (рис. 3). Они вошли в состав ГИС-проекта в виде информационных слоев наряду с геологической картой рудного поля Светлое и прилегающих участков масштаба 1 : 25 000, картами: геологической и полезных ископаемых масштабов 1 : 200 000 листа О-54-XIV и 1 : 1 000 000 листа О-54, схемой точек отбора эталонных пород в пределах рудного поля Светлое и прилегающих участков. В процессе работ ГИС-проект дополнялся полученными картографическими материалами в виде схем пород-индикаторов и спектрометрических аномалий.

На следующем этапе исследований был проведен спектральный анализ ГДО площади рудного тела Светлое с использованием полученной библиотеки спектров эталонных метасоматитов-гидротермалитов, который позволил выявить аналогичные породы и создать схему их вероятностного распределения по всей площади (рис. 4).

С целью оценки достоверности полученных результатов совместили схемы точек отбора эталонных пород и схемы их вероятностного распределения по результатам спектрального анализа ГДО по площади рудного поля Светлое, которое показало хорошее пространственное совпадение пород.

В процессе дальнейших исследований был проведен спектральный анализ ГДО всей территории листа О-54-XIV с использованием локальной библиотеки спектров эталонных пород. В результате исследований выявлены метасоматиты-гидротермалиты, которые распределены по площади неравномерно и создают на многих участках комплексные сообщества пород в различных сочетаниях. На геологической карте листа О-54-XIV поля эталонных образцов монокварцитов коррелируются с участками распространения кислых вулканитов уракской и магейской свит, а также присутствуют в пределах субвулканоческих кислых интрузий и кислых разновидностей

пород хетанинской свиты. Участки диккитовых, диккит-каолининовых кварцитов и диккит-кварцевых метасоматитов имеют ограниченное распространение, в то время как точки диккит-каолининовых и кварц-диккит-каолининовых метасоматитов широко распространены и отмечаются во всех вулканитах на данной территории (рис. 1). По ассоциации полей совокупных эталонов гидротермально-метасоматических изменений пород, характерных для рудного поля Светлое, выделяется ряд спектрометрических аномалий (СМА), отображенных на общей схеме гидротермалитов-метасоматитов, совмещенной с геологической картой масштаба 1 : 200 000 (рис. 5). Все СМА находятся в пределах Средне- и Верхнеульинского серебро-золоторудных россыпных районов, входящих в Ульяновскую алуנית-молибденово-серебро-золоторудно-россыпную минерагеническую зону (Государственная геологическая карта РФ масштаба 1 : 1 000 000. Третье поколение. Дальневосточная серия. Лист О-54 – Охотск. Карта полезных ископаемых. Составители: В. А. Дымович, Р. А. Саутченкова, Б. Г. Лопатин, В. Н. Зелепугин (гл. науч. ред.), 2021).

Анализ совокупности эталонов околорудных гидротермалитов-метасоматитов, характерных для золоторудного поля Светлое, и прилегающих площадей с привлечением геологических материалов дал основание выделить четыре перспективных участка с расположенными в их пределах СМА (рис. 6).

На участках А (СМА 1), Б (СМА 2) и В (СМА 5) породы представлены игнимбритами и вулканокластическими породами верхнего мела (уракской и амгинской свит); исходя из спектрального анализа ГДО фиксируются диккит-кварцевые, диккит-каолининовые, кварц-диккит-каолининовые метасоматиты и монокварциты. Согласно карте полезных ископаемых, в пределах участка 1 находится одно рудопоявление, участка 2 – три рудопоявления и ореол рассеяния золота (по данным литохимического опробования рыхлых отложений), участка 3 – ореол рассеяния золота.

Участок Г (СМА 6) сложен кислыми туфами магейской свиты, частично перекрытыми игнимбритами уракской свиты и прорванными субвулканическими штоками и жильными телами гранит-порфиров; фиксируются в основном монокварциты, диккит-кварцевые и диккит-каолининовые метасоматиты, отмечаются и кварц-диккит-каолининовые их разновидности. В пределах участка отмечено золоторудное проявление.

Выводы. Внедрение в практику геологических работ технологий анализа гиперспектральных космических снимков направлено на решение задачи повышения прогнозно-поисковой эффективности региональных ГРП и пополнения фонда перспективных объектов. На примере золоторудных объектов, находящихся среди гидротермально измененных ниже- и верхнемеловых вулканогенных пород, расположенных

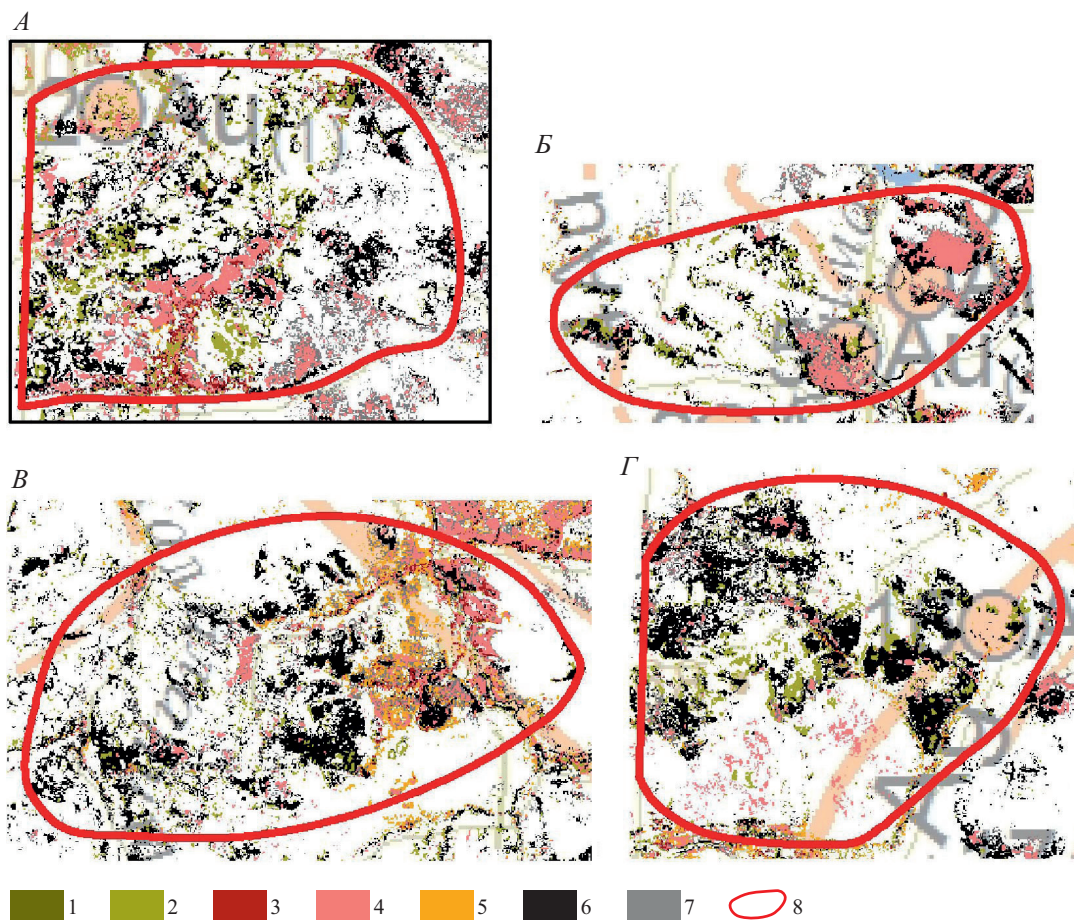


Рис. 6. Перспективные площади: А, Б, В и Г с контурами СМА, наложенными на фрагменты карты полезных ископаемых масштаба 1 : 1 000 000

1–7 – породы-образцы: 1 – диккитовый кварцит; 2 – диккит-кварцевый метасоматит; 3 – диккит-каолиновые кварциты; 4 – диккит-каолиновые метасоматиты; 5 – кварц-диккит-каолиновые метасоматиты; 6 – монокварциты массивные; 7 – монокварциты пористые; 8 – контур аномалии

на территории центральной части Ульинского прогиба Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (Хабаровский край, северо-восточная часть хр. Джугджур), проводились исследования с применением спектрального анализа ГДО, созданной по космическим снимкам ASTER. Для корректной постановки исследований была создана библиотека спектров эталонных образцов околорудных метасоматитов рудного поля Светлое. По результатам проведенных исследований выявлено девять спектрометрических аномалий, анализ которых, совместно с геологическими материалами, позволил определить четыре перспективных площади.

Использование гиперспектральных данных при прогнозировании и на начальных этапах поисков полезных ископаемых дает возможность по совокупности спектрометрических признаков околорудных метасоматитов и геологических предпосылок выявлять перспективные площади для постановки поисковых работ путем предварительной обработки и дальнейшего спектрального анализа космических изображений на наличие и локализацию в их пределах участков гидротермально-метасоматических (околорудных) изме-

нений пород. Как показывает опыт, привлечение материалов геохимического содержания (рудогенные геохимические аномалии, мультипликативные геохимические ореолы и др.) повышает объективность выделения перспективных площадей и позволяет еще на предварительном этапе поисковых работ определять новые участки локализации оруденения [6; 11].

Гиперспектральные космические снимки для решения задач прогнозно-поисковых работ наиболее эффективно использовать на открытых и полужакрытых по геолого-ландшафтным условиям территориях, таких как горно-складчатые области и арктические районы России.

Перспективы развития связываются с применением аэрогиперспектральной аппаратуры, позволяющей получать снимки с высокими пространственным (лучше 1 м) и спектральным (лучше 10 нм) разрешениями. Для аэросъемок могут применяться легкие самолеты, вертолеты и беспилотные летательные аппараты, что значительно снижает стоимость работ. Это позволит проводить исследования на качественно новом уровне и повысить детальность и достоверность поисковых работ.

1. Государственная геологическая карта СССР. Масштаб 1 : 200 000. Прихотская серия. О-54-XIV (устье р. Дюльбаки) / И. И. Филичев, Н. С. Шпак, В. Н. Верещагин (ред.). — М., 1975.

2. Государственная геологическая карта СССР. Масштаб 1 : 200 000. Серия Прихотская. Лист О-54-XIV. Объяснительная записка / Н. С. Шпак, И. И. Филичев, М. А. Шлосберг, В. Н. Верещагин (ред.). — М., 1979. — 83 с.

3. Измененные окolorудные породы и их поисковое значение // Труды ВСЕГЕИ / Под ред. Н. Н. Курек. — М.: Госгеолтехиздат, 1954. — 270 с.

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 научно-практической конференции. — Новосибирск: СНИИГиМС, 2014. Т. 1. — С. 55–56 с.

5. Кирсанов А. А. 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: Материалы Второй Международной конференции. — СПб.: ВСЕГЕИ, 2014. — С. 25–28.

6. Кирсанов А. А. 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): Сборник тезисов докладов XIII Всероссийской открытой конференции. — М.: ИКИ, 2015. — URL: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5360 (дата обращения: 27.01.2022).

7. Кирсанов А. А. 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 научно-практической конференции. — М.: ЦНИГРИ, 2015. — С. 22–23.

8. Кирсанов А. А. 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 докладов VII научно-практической конференции. — М.: ЦНИГРИ, 2017. — С. 23–24.

9. Кирсанов А. А. Прогнозирование площадей, перспективных на поиски золота, на основе результатов обработки аэро- и космических гиперспектральных данных / А. А. Кирсанов, О. В. Петров, К. Л. Липияйнен, М. Ю. Смирнов, Г. А. Кирсанов, В. О. Павлова // Цветные металлы и минералы: Сборник докладов Девятого Международного конгресса. — Красноярск, 2017. — С. 889–897.

10. Кирсанов А. А. 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: Сборник тезисов докладов IX Всероссийской научно-практической конференции. — Якутск, 2018. — С. 61–64.

11. Кирсанов А. А. Выявление площадей, перспективных на поиски полезных ископаемых, 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 // Региональная геология и металлогения. — 2019. — № 78. — С. 82–90.

12. Кирсанов А. А. 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: Сборник тезисов докладов IX Всероссийской научно-практической конференции. — Якутск, 2019. — С. 35–39.

13. Кирсанов А. А. Новый метод выявления окolorудных гидротермально измененных пород по космическим гиперспектральным данным на примере Ломамского потенциально золоторудного района, Республика Саха (Якутия) / А. А. Кирсанов, К. Л. Липияйнен, М. Ю. Смирнов, Г. А. Кирсанов // Региональная геология и металлогения. — 2021. — № 86. — С. 97–106.

14. Плющев Е. В., Шатов В. В., Кашин С. В. Металлогения гидротермально-метасоматических образований // Труды ВСЕГЕИ. Нов. серия. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2012. — Т. 354. — 560 с.

15. 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.

16. Kirsanov A. A. Utilization of ASTER hyperspectral data during prospecting for solid minerals / A. A. 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. Filichev I. I., Shpak N. S., Vereshchagin V. N. (eds.). Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR. Masshtab 1 : 200 000. Priokhotskaya seriya. O-54-XIV (ust'e r. Dyul' baki) [State geological map of the USSR. Scale 1 : 200,000. Okhotsk series. O-54-XIV (Mouth of the Dulbaki River)]. Moscow, 1975.

2. Shpak N. S., Filichev I. I., Shlosberg M. A., Vereshchagin V. N. (eds.). Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR. Masshtab 1 : 200 000. Seriya Priokhotskaya. List O-54-XIV. Ob'yasnitel'naya zapiska [State geological map of the USSR. Scale 1:200,000. Priokhotskaya series. Sheet O-54-XIV. Explanatory note]. Moscow, 1979, 83 p.

3. Kurek N. N. (ed.). Izmennennye okolorudnye porody i ikh poiskovoe znachenie [Altered wall rocks and their search value]. *Trudy VSEGEI*. Moscow, Geoltekhizdat, 1954, 270 p. (In Russian).

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

5. Kirsanov A. A., Lipiyainen K. L., Smirnov M. Yu., Pavlova V. O. Opyt primeneniya aereo- i kosmicheskikh giperspektral'nykh dannykh pri reshenii geologorazvedochnykh zadach [Experience in the use of aereo- and space hyperspectral data in solving geological exploration problems]. *Novyye*

tehnologii obrabotki i ispol'zovaniya dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli v geologorazvedochnykh rabotakh i pri vedenii monitoringa opasnykh geologicheskikh protsessov: *Materialy Vtoroy Mezhdunarodnoy konferentsii*. St. Petersburg, 2014, pp. 25–28. (In Russian).

6. Kirsanov A. A., Lipiyainen K. L., Pavlova V. O., Kirsanov G. A., Smirnov M. Yu. Opyt vyyavleniya zon gidrotermal'no-metasomaticheskikh izmeneniy gornyykh porod na osnove obrabotki dannykh giperspektral'nykh s"emok [Experience in identifying zones of hydrothermal-metasomatic changes in rocks based on processing data from hyperspectral surveys]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa (fizicheskie osnovy, metody i tehnologii monitoringa okruzhayushchey sredy, potentsial'no opasnykh yavleniy i ob"ektov): Sbornik tezisov dokladov XIII Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii*. Moscow, 2015, available at: http://smiswww.wiki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=109&thesis=5360 (accessed: 27.01.2022). (In Russian).

7. Kirsanov A. A., Petrov O. V., Lipiyainen K. L., Smirnov M. Yu., Pavlova V. O. Opyt ispol'zovaniya aero- i kosmicheskikh giperspektral'nykh dannykh pri geologorazvedochnykh rabotakh na tverdye poleznye iskopaemye [Experience in the use of aero- and space hyperspectral data in geological exploration for solid minerals]. *Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov i otsenki mestorozhdeniy blagorodnykh i tsvetnykh metallov – sostoyaniye i perspektivy: Materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Moscow, 2015, pp. 22–23. (In Russian).

8. Kirsanov A. A., Lipiyainen 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 dannykh [Identification of areas promising for the search for solid minerals, according to the processing of aero- and space hyperspectral data]. *Nauchno-metodicheskie osnovy prognoza, poiskov i otsenki mestorozhdeniy blagorodnykh, tsvetnykh metallov ialmazov: Sbornik tezisov dokladov VII nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Moscow, 2017, pp. 23–24. (In Russian).

9. Kirsanov A. A., Lipiyainen K. L., Smirnov M. Yu., Kirsanov G. A. Prognozirovaniye ploshchadey, perspektivnykh na poiski zlota, na osnove rezul'tatov obrabotki aero- i kosmicheskikh giperspektral'nykh dannykh [Prediction of prospective areas for gold prospecting based on the results of processing aero- and space hyperspectral data]. *Tsvetnyye metally i mineraly: Sbornik dokladov Devyatogo Mezhdunarodnogo kongressa*. Krasnoyarsk, 2017, pp. 889–897. (In Russian).

10. Kirsanov A. A., Lipiyainen K. L., Smirnov M. Yu., Kirsanov G. A. Primeneniye aero- i kosmicheskikh giperspektral'nykh

dannykh dlya resheniya prognozno-poiskovykh rabot [Application of aero- and space hyperspectral data for solving predictive and prospecting works]. *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy severo-vostoka Rossii: Sbornik tezisov dokladov IX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii*. Yakutsk, 2018, pp. 61–64. (In Russian).

11. Kirsanov A. A., Lipiyainen K. L., Smirnov M. Yu., Kirsanov G. A., Smirnova I. O., Pavlova V. O. Identification of areas perspective for gold mineralization based on results of airborne and satellite hyperspectral data processing. *Regional Geology and Metallogeny*, 2019, no. 78, pp. 82–90. (In Russian).

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

13. Kirsanov A. A., Smirnov M. Yu., Lipiyainen K. L., Kirsanov G. A. 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). *Regional Geology and Metallurgy*, 2021, no. 86, pp. 97–106. (In Russian).

14. Plyushchev E. V., Shatov V. V., Kashin S. V. Metallogeniya gidrotermal'no-metasomaticheskikh obrazovaniy [Metallogeny of hydrothermal-metasomatic formations]. *Trudy VSEGEI. Nov. seriya*. St. Petersburg, 2012, vol. 354, 560 p. (In Russian).

15. 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 dannykh i sovremennykh metodov ikh obrabotki v geologicheskikh issledovaniyakh [Review of foreign achievements over the past five years in the field of using multi- and hyperspectral satellite data and modern methods of their processing in geological research]. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa (fizicheskie osnovy, metody i tehnologii monitoringa okruzhayushchey sredy, potentsial'no opasnykh yavleniy i ob"ektov)*. Moscow, 2020, vol. 17, no. 1, pp. 9–27. (In Russian).

16. Kirsanov A. A., Petrov O. V., Morozov A. F., Lipiyainen 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: 27.01.2022).

Кирсанов Александр Андреевич – канд. географ. наук, директор, Центр дистанционных методов природоресурсных исследований, VSEGEI¹. <Aleksandr_Kirsanov@vsegei.ru>

Липияйнен Константин Львович – зам. директора, Центр дистанционных методов природоресурсных исследований, VSEGEI¹. <Konst_Lipiyaynen@vsegei.ru>

Смирнов Михаил Юрьевич – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник, VSEGEI¹. <Mikhail_Smirnov@vsegei.ru>

Кирсанов Георгий Александрович – зав. сектором, Центр дистанционных методов природоресурсных исследований, VSEGEI¹. <Georgy_Kirsanov@vsegei.ru>

Золотухина Алина Владимировна – инженер, VSEGEI¹. <Alina_Zolotuhina@vsegei.ru>

Kirsanov Alexandr Andreevich – Candidate of Geographical Sciences, Director, Center for remote methods of nature-resource researches, VSEGEI¹. <Aleksandr_Kirsanov@vsegei.ru>

Lipiyaynen Konstantin Lvovich – Deputy Director, Center for remote methods of nature-resource researches, 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 the Sector, Center for remote methods of nature-resource researches, VSEGEI¹. <Georgy_Kirsanov@vsegei.ru>

Zolotukhina Alina Vladimirovna – Engineer, VSEGEI¹. <Alina_Zolotuhina@vsegei.ru>

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

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