

# НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДИСТАНЦИОННЫХ ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПОИСКАХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Егоров А.Ю., Цыганов В.А., Приходько А.Ю.  
ФГУ НПП «АЭРОГЕОЛОГИЯ» ([egorov@aerogeologia.ru](mailto:egorov@aerogeologia.ru));

## Аннотация

*Конечность фонда легкооткрываемых месторождений полезных ископаемых на конкретных территориях постоянно инициирует попытки применения новых технологических решений, ориентированных на выделение коммерчески-ценных поисковых объектов, характеризующихся, либо пониженным уровнем контрастности индикационных параметров, либо относительно небольшими размерами, либо залегающих в малоблагоприятных для поисков ландшафтно-геологических обстановках. В настоящей работе приводится описание двух таких новых технологий, внедрение которых уже начато на территориях Российской Федерации.*

## 1. Аэроэлектроразведка методом переходных процессов (АероТЕМ) в комплексе с высокоточной аэромагнитной съемкой

### Геологические и петрофизические предпосылки применения технологии для поисков медно-никелевых руд

Известно (2), что для основного промышленного типа этих руд – магматических сульфидно-медно-никелевых месторождений - характерным является: локализация в периферийных и придонных частях хорошо дифференцированных интрузий основных - ультраосновных пород в виде либо крупных пластообразных залежей вкрапленных руд, либо средних по размерам жил, линз и штоков массивных руд. Вещественный состав руд – пирротин, халькопирит, пентландит, МПГ и др.; вмещающих пород – плагиоклазы, амфиболы, пироксены, оливин, хлорит. Физические свойства отмеченных образований приведены в таблице №1.

Таблица №1. Физические свойства пород и руд

	Магнитная восприимчивость	Электросопротивления	Плотность
Ед. изм.	$n \cdot 10^{-5}$ ед.СИ	Омм	г/см <sup>3</sup>
Руды (от – до)	<u>Десятки тысяч</u>	<u>От долей единицы до десятков</u>	<u>3-4 и более</u>
Вмещающие (от – до)	<u>Тысячи</u>	<u>Тысячи и десятки тысяч</u>	<u>Около 3</u>

В соответствии с изложенным, **поисковыми предпосылками** локализации таких месторождений являются крупные массивы дифференцированных пород основного- ультраосновного состава, которые отчетливо фиксируются в гравимагнитных полях интенсивными и значительными по размерам аномалиями. В геоэлектрическом поле такие массивы не образуют аномалий повышенной электропроводности. На этом фоне типичными **поисковыми признаками** медно-никелевых руд являются локальные аномалии электропроводности и локальные магнитные аномалии, сопоставимые по размерам и непосредственно связанные с рудными телами.

Отмеченные явления позволяют применять в качестве ведущих поисковых методов на магматические сульфидно-медно-никелевые месторождения электроразведку и магниторазведку в аэро- или наземной модификациях. По данным магниторазведки обычно выделяются массивы основных пород и прорисовываются элементы их внутреннего строения, а по данным магниторазведки и электроразведки – выделяются локальные аномалии, связываемые с самими рудными телами.

Основными проблемами для применения при поисках Cu-Ni руд геофизических методов являются, с одной стороны, значительные глубины залегания рудных тел, снижающие контрастность аномального эффекта от скоплений сульфидных минералов, а, с другой стороны, существенные неоднородности петрофизических моделей самой верхней части разреза, обуславливающие, особенно для наземных модификаций, высокий уровень «помех».

## Современные эффективные геофизические технологии

Применительно к современному уровню глубин возможного промышленного освоения в традиционных районах добычи Cu-Ni руд (Норильский район, Кольский п-ов и др.), применительно к размерам рудных тел представляющих практический интерес на этих глубинах, проведено исследование мирового рынка геофизических технологий и аппаратных средств для выбора эффективных технических предложений максимально обеспечивающих выполнение современных геолого-экономических задач. В результате удалось получить решение, удовлетворяющее геологической задаче и ландшафтно-геологическим обстановкам перспективных районов

Это решение представляет собой комплекс современных прецизионных аэрогеофизических технологий высокого пространственного разрешения и повышенной глубинности: аэроэлектроразведка методом переходных процессов (АероТЕМ) и высокоточная аэромагниторазведка (Рис. 1).

На сегодняшний день аэроэлектроразведка в модификации АероТЕМ с достаточным обоснованием может считаться одним из лучших видов аэроэлектроразведочной съемки. АероТЕМ система имеет специальную концентрическую геометрию генераторной петли и приемных катушек. Благодаря этому она совмещает в себе высокое пространственное разрешение, т.е. фокусирующую способность (характерную для вертолетных платформ, работающих в частотном режиме) и, одновременно большую глубину исследований (присущую самолетным установкам с фиксированной на крыльях генераторной петлей, «fixed wings»).

Аэроэлектроразведочная съемка АероТЕМ выполняется со специальной внешней, подвесной вертолетной установкой, работающей во временном режиме (time-domain) и



Рисунок 1. Комплекс аэрометодов: электроразведка (АероТЕМ) и высокоточная аэромагниторазведка.

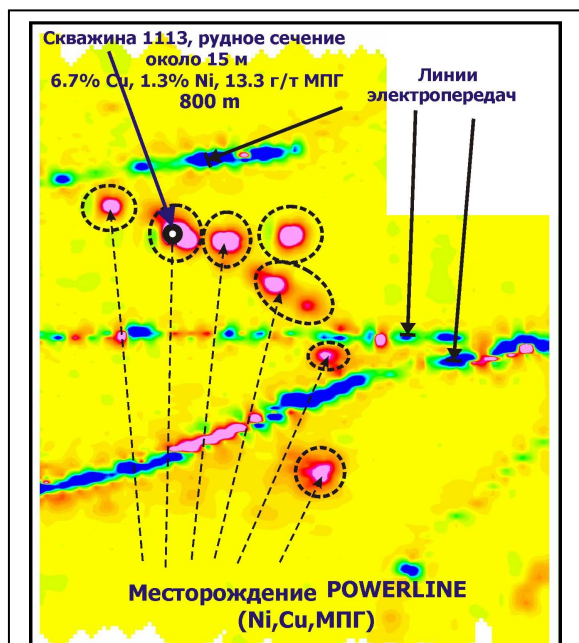


Рисунок 2. Пример отражения рудных тел сульфидной медно-никелевой минерализации (с МПГ) по результатам съемки АероТЕМ по месторождению Powerline (Канада)

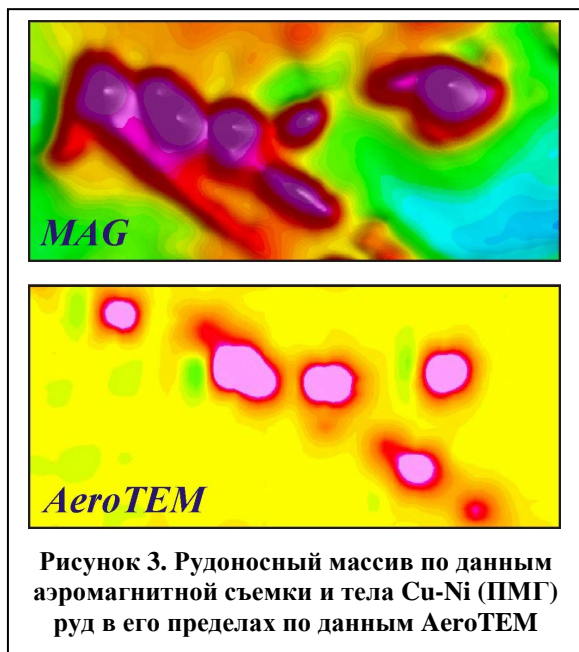
предназначена для поисков полезных ископаемых и геокартирования. Вертолетная электромагнитная съемка в режиме time-domain это одна из последних разработок в аэрогеофизике, которая уже сейчас обеспечивает новые открытия и служит одним из факторов развития горнодобывающей промышленности. Только за последние два года в Мире по результатам таких съемок открыто **11 новых месторождений полезных ископаемых (Ni-Cu-МПГ, кимберлиты, Cu-Pb-Zn, и Cu-Au)**. Практически все открытия были сделаны без последующей наземной съемки. Многие из этих районов ранее уже были покрыты аэроэлектроразведочной съемкой с самолетными или вертолетными частотными системами с аппаратурой предшествующих поколений.

Можно отметить следующие специфические особенности, характерные для аэроэлектроразведочных технологий типа АероТЕМ.

- При равных геоэлектрических условиях, глубина исследований АероТЕМ в два раза превышает возможности традиционных вертолетных систем за счет большего дипольного момента петли генератора и достигает нескольких сотен метров.
- АероТЕМ адекватно отражает объекты с любой

электропроводностью, тогда как для самолетных и других вертолетных систем, работающих в частотной области, существуют пределы, при которых невозможно правильно идентифицировать объект, являющийся объектом поисков. Эта особенность AeroTEM обеспечена возможностью измерений в ON-time режиме, т.е. во время пропускания питающего тока.

- Специально рассчитанные геометрические параметры системы гарантируют точную оценку глубины залегания, нахождения границ и эпицентров искомых объектов, что реально позволяет проводить горно-буровые работы без дополнительных наземных геофизических исследований.



Самолетные электромагнитные системы не обеспечивают такой возможности из-за большого разнеса генератор-приемник и способны только готовить основу для дорогостоящих наземных съемок.

- Симметричная геометрия установки генерирует сигналы, независимые от направлений полетов.
- 16 каналов в OFF-time режиме (после выключения питающего тока) обеспечивают прекрасную дифференциацию объектов в диапазоне электропроводности более чем в четыре порядка.

Разработано, апробировано и будет использоваться на объектах «Норильского никеля» новое поколение AeroTEM со значением момента диполя от 500 до 1000 тыс. А/м<sup>2</sup>, что повышает глубину исследований до 600-800 м, и обеспечивает повышение чувствительности и разрешающей способности. На рисунке №2 приведен пример выделения рудных тел с использованием технологии AeroTEM.

нологии AeroTEM.

Также, в дополнение к электрометрическому каналу **используется магнитометрический датчик** высокого разрешения (калиевый с оптической накачкой), для целей детальной аэро-съемки магнитного поля с высоким разрешением. Это должно обеспечить: освобождение от солнечных и других источников помех, более точное выделение и позиционирование аномалиеобразующих источников, улучшение дифференциации сложных геологических структур, возможность их разделения на различающиеся по остаточному намагничению элементарные составляющие.

Предполагается, что совместное использование описанных выше новейших аэроэлектроразведочных и магнитометрических технических средств является направлением быстрого и эффективного высоконаноуемого и высоконадежного инвестирования в поиски месторождений сульфидных медно-никелевых (с платиноидами) руд обозначенного геолого-промышленного типа.

## 2. Дистанционное гиперспектральное зондирование земной поверхности для целей поисков месторождений полезных ископаемых.

**Гиперспектральная съемка** (в российской литературе иногда используется термин «видеоспектрометрирование») является результатом эволюционного развития многоспектральных систем, где благодаря новым технологиям количество каналов сбора информации увеличивается с 3–7 до 200–1000 при достижении высокого спектрального разрешения (от 0.1 до 10 нм). В результате формируется многомерное пространственно-спектральное изображение, в котором каждый элементарный участок изображения («пиксель») характеризуется собственным спектром.

Применение гиперспектральной съемки очень эффективно при решении хозяйственных и военно-прикладных задач, так как позволяет получать информацию, которая отсутствует на тра-



Рисунок 4. Общий вид датчика НуМар

ditionонных панхроматических снимках. По оценкам экспертов, до 70% всех задач зондирования Земли могут быть решены благодаря применению результатов съемки с высоким спектральным разрешением, и только 30% – за счет видовой информации с высоким пространственным разрешением.

**Одним из важнейших направлений применения гиперспектральной съемки в настоящее время является геологическое картирование и поиски месторождений полезных ископаемых.**

Первый датчик класса НуМар был разработан в Австралии как 96 канальный инструмент, работающих в диапазоне длины волны 0.55 - 2.5 нм. Последующие датчики НуМар конструировались с 128 полосами, покрывающими 0.44 - 2.5 нм спектральных области и с двумя тепловыми полосами: одна полоса в 3 - 5 нм атмосферных окнах и другом в 8 - 10 нм спектральном диапазоне.

Датчик НуМар – это оптикомеханическая сканирующая система установленная на трех осях гироустойчивой платформы. Она связана с подсистемами управления, контроля, получения и накопления данных и навигационной подсистемой. Ее внешний вид показан на Рис.4. Высокая эффективность, достигнутая для настоящего поколения датчиков НуМар, частично получена из оптимизации системы для определенного эксплуатационного пакета. Таблица 2 иллюстрирует некоторые основные эксплуатационные характеристики современных датчиков НуМар.

**Таблица 2. Типовой пакет эксплуатационных параметров для датчика НуМар**

Спектральные диапазоны	VIS, NIR, SWIR, MWIR, TIR
Число каналов	100 - 200
Спектральный диапазон	10 – 20 нм
Пространственное разрешение	2 – 10 м
Ширина обзора	60 – 70 градусов
Отношение сигнал/помех	>500:1
Рабочая высота	2000 – 5000 м

#### Техника выполнения съемок

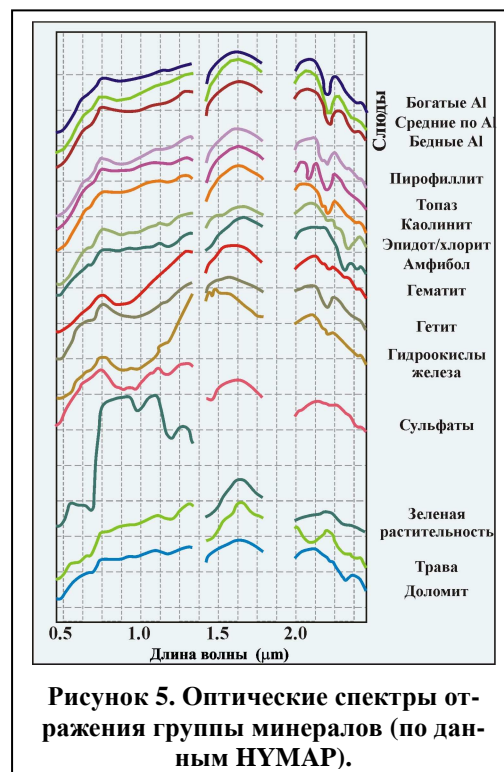
Обычно гиперспектральные съемки выполняются с использованием авиационной платформы типа самолета – Цесна- 404, при высоте от 2000 до 5000 м при скорости полетов от 110 до 180 и более км/час. Пространственная конфигурация элемента наблюдения («пикселя») 2,5 м вдоль маршрута и 2 метра вкрест маршрута. Производительность съемок составляет в среднем 1000-1500 км. кв. за один вылет (рабочий день).

#### Обработка и интерпретация данных

Направлена на выделение и картирование ореолов отдельных минералов по спектру их фотоотображения или ассоциаций минералов и осуществляется с использованием специального программного обеспечения, наземной полевой и лабораторной аппаратуры. Полученные характеристики спектра используются далее для вычленения этой компоненты из всех наблюдаемых данных и картирования по площади работ приповерхностных минералогических ореолов этого минерала.

Аналогичным образом осуществляется обработка по всем минералам, благоприятным для выделения методом в конкретной обстановке и представляющим практический интерес (Рис. 5).

В конечном счете, на исследованную площадь составляются мономинеральные карты и карты минералогических ассоциаций, представляющих практический интерес для задач геокартирования и поисков месторождений полезных ископаемых.



## Некоторые примеры применения гиперспектральных технологий для решения геологических задач

Поиски коренных месторождений золота в Западной Австралии (Центральная Пилбора)  
Поисковые работы проводились в пределах территории перекрытой четвертичными рыхлыми отложениями преимущественно автохтонного происхождения (делювий, элювий и пр.). По составу это преимущественно пески. Растительность (Рис.6.) представлена редкими зарослями эвкалиптов и злака спинифекс (Spinifex).



Рисунок 6. Типовой ландшафт области съемки

Бассейн Маллина, где проводились работы, включает в себя наибольшее количество золотосодержащих формаций, зафиксированных в тектонической зоне Центральной Пилбары. С золоторудными месторождениями здесь связываются участки развития околорудной и жильной минерализации, представленной, главным образом, пирофиллитом, а также, «белой слюдой», турмалином, хлоритом. Отмеченные обстоятельства послужили основанием проведения в пределах наиболее перспективных частях района гиперспектрального дистанционного зондирования с целью выявления и картирования зон околорудной минерализации.

Результаты работ по одной из таких частей размером 5 x 18 км иллюстрируются рисунком

7.

Приведенные и другие данные, полученные в результате интерпретации материалов гиперспектральной съемки позволили существенно уточнить геологическую карту района и выделить в его пределах локальные участки (А и В на рисунке 7) с явными признаками коренных месторождений золота. Прогнозные ресурсы по рассмотренному участку были оценены в 5 млн. метрических тонн (по руде) при средних содержаниях 5-8 г/т.

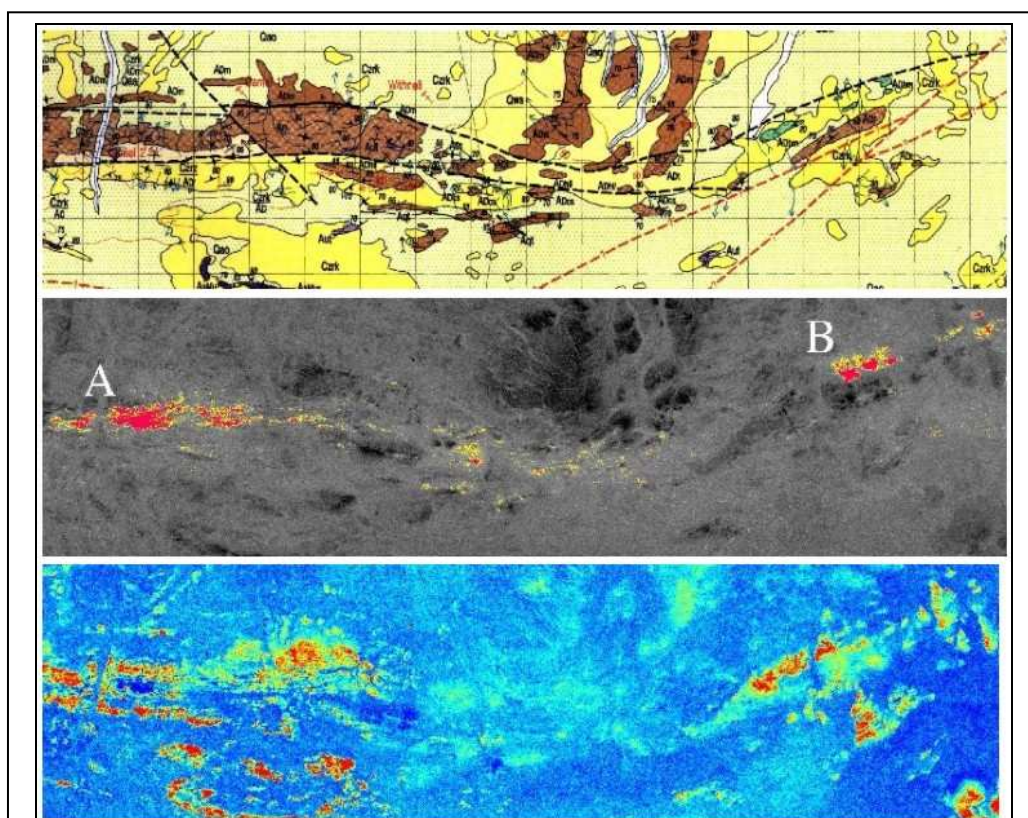


Рисунок 7. Материалы работ по одному из объектов Центральной Пилбары (Западная Австралия) на рудное золото

**Верх** – Геологическая карта района

**Середина** – Области развития пирофиллита по данным НУМАР съемки (максимальные – красное, средние – желтое, не обнаружены – оттенки серого)

**Низ** – Области развития доломита по данным НУМАР съемки (максимальные – красное, средние – желтое и зеленое, не обнаружены – голубое)

Отмечается, что кроме перечисленных минералов технология НУМАР успешно идентифицирует другие минеральные новообразования, такие как хлорит, каолинит, кальцит и другие. Особо успешно выделяются и картируются области развития минералов, имеющих в своей структуре гидроксильные группы. Выделение, картирование, таких и других минералов, их парагенетических ассоциаций представляет новые реальные возможности экспрессного получения ценной геологической информации, недоступной для других геологических методов.



**Рисунок 8. Выделение по данным гиперспектральной съемки месторождения магнезита в Южной Австралии.**

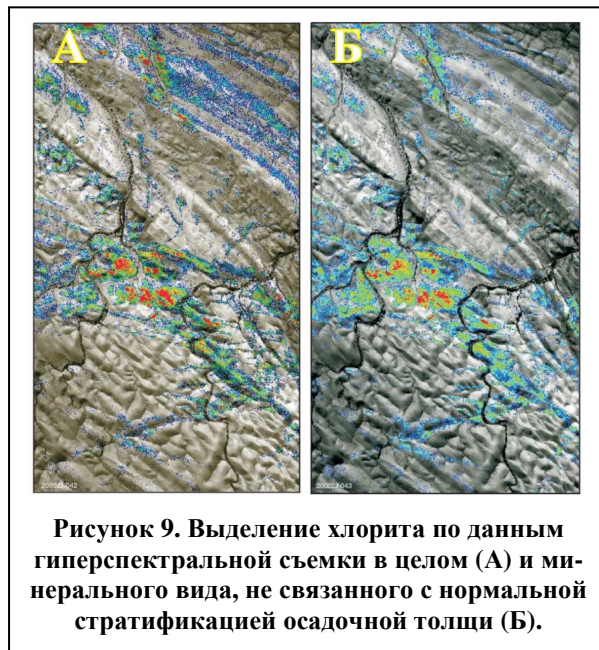
На рисунке 8 приведен пример минералогической интерпретации данных гиперспектральной съемки при поисках **месторождений магнезита** в Южной Австралии (Adelaide Geosyncline).

На части рисунка «А», показана относительно полная минералогическая интерпретация данных, на части рисунка «Б» по той же площади – данные только по магнезиту. С учетом элементов залегания выделенных магнезитовых тел, последний рисунок позволяет провести оценку прогнозных ресурсов магнезита высоких категорий.

Интересный пример известен из опыта **поисков коренных месторождений алмазов** в ЮАР. Имеются результаты гиперспектральной съемки, на которых от известных кимберлитовых тел отчетливо прослеживались минералогические ореолы породообразующих минералов кимберлитов или развитых по ним вторичных минералов.

Рисунок 9 иллюстрирует пример попытки выделения по данным гиперспектральной съемки валовых концентраций хлорита в верхней части разреза осадочного комплекса пород (слева) и выделения на его фоне хлорита (chlorite + Al(OH) – probably mica), не связанного с нормальной стратификацией толщ. Последний в данном случае может фиксировать **зону наложенных околорудных изменений** (хлоритизация). Работы, результаты, которых показаны на рисунке, проведены по Южной Австралии для демонстрации преимуществ минералогического картирования на основе гиперспектральной съемки.

Кроме дистанционного картирования отдельных минералов, данные гиперспектральных съемок позволяют выделять и картировать специфические минералогические ассоциации. Приведенные данные позволяют констатировать, что в благоприятных ландшафтно-геологических обстановках использование гиперспектральной аэросъемки позволяет проводить **целевое** инструментальное фактографическое, практически непрерывное (в различных масштабах) высокопроизводительное минералогическое картирование территорий. При этом возможно выделение и картирование многих минеральных видов, которые визуальными в полевых условиях обычно не диагностируются (например, глинистые минералы).



**Рисунок 9. Выделение хлорита по данным гиперспектральной съемки в целом (А) и минерального вида, не связанного с нормальной стратификацией осадочной толщи (Б).**

### Перспективные направления развития гиперспектральных съемок в РФ

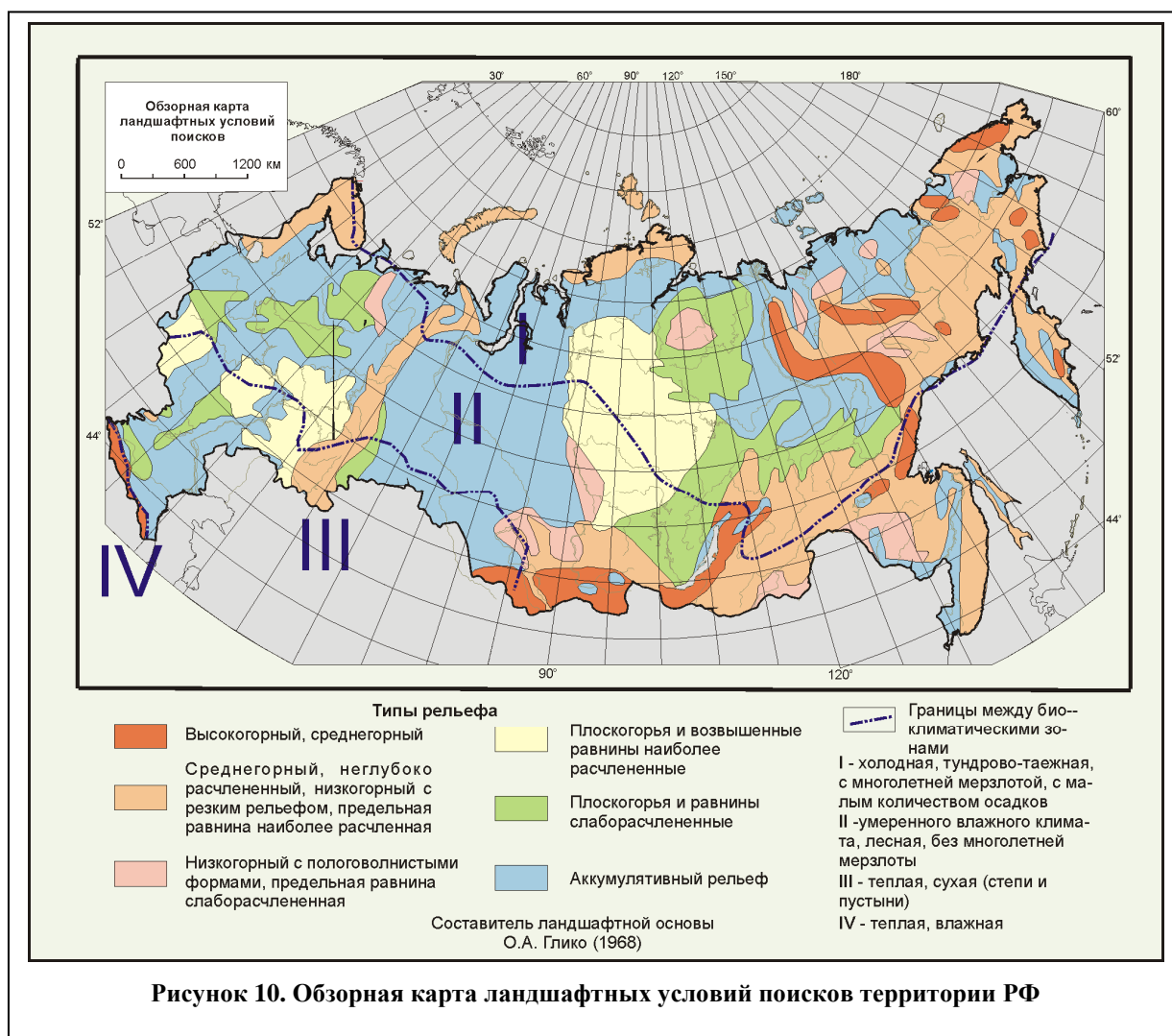
Перечисленные выше возможности новой технологии позволяют ожидать высокую геологическую и экономическую эффективность ее применения в благоприятных ландшафтно-геологических обстановках РФ к самому широкому кругу геологических задач, связанных с повышением инвестиционной привлекательности объектов. Ее использование в рамках геолого-

минерагенического картирования, прогнозно-поисковых и поисково-оценочных работ поможет весьма существенно повысить их результативность при минимизации средств для самой рискованной части геолого-поискового процесса.

Соответственно **целевым назначением гиперспектральных съемок при проведении геолого-минерагенического картирования и прогнозно-поисковых работ является выделение и оконтуривание первичных и вторичных минералогических ореолов, выступающих в качестве минералогических и петрографических предпосылок и признаков локализации скоплений различных видов полезных ископаемых.**

Для определения территорий РФ, благоприятных по своим ландшафтно-геологическим обстановкам к применению гиперспектральной съемки, приведем краткий обзор региональной изменчивости природных факторов, определяющих эффективность метода.

На рис. 10. показана обзорная карта ландшафтных условий поисков территории РФ. Эти условия определяют процессы выветривания горных пород, вскрытия и разрушения месторождений у дневной поверхности, высвобождение устойчивых в условиях выветривания рудных минералов, окисление неустойчивых, появление вторичных поисковых признаков с образованием раз-



личных ореолов рассеяния, в т.ч. минералогических. Выделяются три составляющих ландшафта, влияющих на их информативность для поисковых методов: биоклиматическая, структурно-геоморфологическая, петрографо-минералогическая.

**В конечном счете, совместный анализ неструктурно-геоморфологических данных, биоклиматической и растительной (Рис. 10) зональности позволил построить схему районирования территории РФ по условиям применения гиперспектрального метода.**

.Совокупность приведенных данных позволяет провести районирование территории РФ по ландшафтно-геологическим условиям проведения гиперспектральной съемки - таблица 3.

**Таблица 3. Перечень основных геоморфологических районов РФ по ожидаемым условиям применения гиперспектрального метода поисков месторождений твердых полезных ископаемых**

<b>Черты рельефа</b>	<b>Геоморфологические районы</b>
<b>ТЕРРИТОРИИ ВЕСЬМА БЛАГОПРИЯТНЫЕ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА</b>	
<p>I. Эрозионно-денудационный рельеф неотектонических поднятий</p> <p><i>А. Рельеф складчатых областей и щитов</i></p>	<p><i>Кавказ, Дагестанские горы, Алтай, Западный Саян, горы Прибайкалья; Становой хребет, Верхне-Колымское нагорье, Тарбагатай.</i></p>
<b>ТЕРРИТОРИИ БЛАГОПРИЯТНЫЕ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА</b>	
<p>I. Эрозионно-денудационный рельеф неотектонических поднятий</p> <p><i>А. Рельеф складчатых областей и щитов</i></p>	<p><i>Восточная Тува, западная часть Западного Саяна; восточная часть Алтая, Восточный Саян, Хребты - Верхоянский, Черского, Тас-Таяхта, Джугджур; Южный и Северный Урал, Кузнецкий Алатау, Колымская горная система, Анадырская, Аннойская, Корякская горные системы, Камчатские вулканические горы, Западный склон Верхоянского хребта, останцовые горы Джугджура и Камчатские горы, Горы Новой Земли, предгорье Восточного Саяна, среднегорье Забайкалья (Яблоневоый хребет), Приамурье, Сихотэ-Алинь, Сахалинские, Чукотские горы, район Пятигорья, Алданское и Адычанское нагорья, Патомо-Мамское и Витимо-Олекминское нагорье, Юкагирское плоскогорье, Оймяконское, Нерское, Анадырское плоскогорья, Полярный Урал; Чу-Илийские горы, Мугоджары, южная оконечность Новой Земли, Салаир, предгорья Кузнецкого Алатау.</i></p>
<b>ТЕРРИТОРИИ МЕНЕЕ БЛАГОПРИЯТНЫЕ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА</b>	
<p>I. Эрозионно-денудационный рельеф неотектонических поднятий</p> <p><i>А. Рельеф складчатых областей и щитов</i></p>	<p><i>Низкогорный Средний и Северный Урал, Южно-Уральский пенепплен, горы Бырранга, Пай-Хой, низкогорное Южное Забайкалье, Енисейский кряж, Алазейское и Янское плоскогорья, Зауральский пенепплен в Среднем Урале, плато Кольского полуострова и Карелии.</i></p>
<p><i>Б. Рельеф плит</i></p>	<p><i>Горы Путорана частях; северо-западная часть Сибирского плоскогорья; Уфимское плато, Ставропольская возвышенность, Северо-восточная, южная и юго-восточные части Сибирского плоскогорья, Плато Заволжья, Сурское, Самарская лука, Приволжская возвышенность, Зейско-Буреинское плато.</i></p>
<b>ТЕРРИТОРИИ СЛАБО БЛАГОПРИЯТНЫЕ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА</b>	
<p>I. Эрозионно-денудационный рельеф неотектонических поднятий</p> <p><i>Б. Рельеф плит</i></p>	<p><i>Донецкий кряж, Азовско-Подольская возвышенность, Тиманский кряж, предгорья Алтая и Минусинских впадин, Плато Беломорско-Кулойское, Мезенско-Двинское, Сухоно-Двинское, Волго-Двинское, Русская равнина, Приволжская равнина, Ставропольская возвышенность (окраинная часть).</i></p>

Как следует из рис.10. и таблицы 3, регионы весьма благоприятные, благоприятные и менее благоприятные для применения гиперспектральной съемки слагают более 50% территории РФ, что свидетельствует о весьма значительном фронте работ для использования рассматриваемой технологии.

## Литература

1. Глико О.А. Ландшафтные условия и применение поисковых методов. Теоретические основы поисков и разведки твердых полезных ископаемых. Том 1. Поиски. Под редакцией В.М. Крейтера. М. «Недра», 1968.
2. Красников В.И. Основы рациональной методики поисков рудных месторождений. М. «Недра», 1965.

*Опубликовано: Новые дистанционные геолого-геофизические технологии при поисках рудных месторождений полезных ископаемых. Разведка и охрана недр №8 –2006. С 50-57.*