

## **Обзор достижений последнего десятилетия в области применения спутниковых методов дистанционного зондирования при геологических и геофизических исследованиях**

**В.И. Горный, А.А. Тронин**

*Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН,  
197110, Санкт-Петербург, ул. Корпусная, 18  
E-mail v.i.gornyy@mail.ru, a.a.tronin@ecosafety-spb.ru*

Выполнен анализ опубликованных за последнее десятилетие работ в области применения спутниковых методов дистанционного зондирования при геологических и геофизических исследованиях. Проанализированы основные достижения в области изучения опасных геологических явлений, регионального геологического строения, поисков полезных ископаемых. Дана характеристика современному состоянию развития методов дистанционного зондирования, применяемых при решении геологических задач.

**Ключевые слова:** спутник, дистанционные методы, региональное геологическое строение, картирование, поиски, опасные геологические явления.

### **Применение материалов спутниковых съемок при изучении региональное геологического строения**

Во второй половине двадцатого века произошла смена геологических парадигм и моделей геологической среды. Если в начале века основной геологической парадигмой являлась фиксистская гипотеза, предполагавшая неподвижность литосферных плит, то ко второй половине этого века были накоплены геологические факты, позволившие сформулировать гипотезу тектоники плит, рассматривающую процесс формирования океанской коры в срединно-океанических хребтах, ее «растекание», погружение этой коры в мантию с одновременным дрейфом континентальных плит. Но в конце двадцатого века появился ряд новых геологических фактов, которые не смогла объяснить гипотеза тектоники плит. Поэтому была выдвинута гипотеза плюм-тектоники, опирающаяся на конвективные процессы в мантии и в верхней части ядра и взаимодействие вещества конвективных структур мантии с веществом литосферных плит. Почти одновременно с появлением этой новой геологической гипотезы произошло объединение двух последних не противоречащих гипотез – тектоники плит и плюм-тектоники. Существенную роль при этом сыграли материалы спутниковых съемок среднего и низкого геометрического разрешения (Глуховский, 1984; Горный, 2005).

Известно, что увеличение высоты съемки приводит к ухудшению геометрического разрешения на местности, но одновременно охватывается более обширные территории. При этом, разрозненные индикаторы геологического строения (формы рельефа и растительности, околорудные изменения горных пород, гидротермально-метасоматические изменения пород и т.п.), закономерно контролируемые геологическими телами, на материалах спутниковых съемок формируют «генерализованные» образы, индицирующие геологические структуры. Часто такие образы невозможно связать с конкретными геологи-

ческими телами, т.к. они могут отражать наложенные процессы. Кроме того, однородные материалы спутниковых съемок оказались доступными на всю территорию суши нашей планеты, что позволило выявить общие для всех континентальных плит закономерности (Горный, 2000; Горный, 2005; Горный и др., 2012; Серокуров и др., 2009) и позволило дать синтез тектоники плит и плюм-тектоники (Gornyi, 2002; Горный, 2005). В рамках этого представления геологическое строение континентальной коры рассматривается как результат перемещения литосферных плит над мантийными плюмами или «горячими» мантийными струями. Высокоэнергетические мантийные процессы приводят к переходу верхней мантии из твердого состояния в жидкое, что приводит к тектоно-магматической активизации, существенно изменяющей свойства верхней части коры, ее флюидодинамику, рельеф дневной поверхности, растительный покров. Все эти изменения могут регистрироваться на материалах спутниковых съемок. Следовательно, с помощью космических методов может быть получена информация, как о строении верхних частей коры, так и о наличии и параметрах современных или палеоструктур восходящей мантийной конвекции, изменивших облик земной коры.

За последние десятилетия изменились, также представления о модели геологической среды. На первых этапах развития геологической науки общепринятой была горизонтально-слоистая модель, построенная на основании сейсморазведочных работ. Эта модель предполагала дискретное изменение физических свойств геологических тел по глубине и выдержанность этих свойств в пластах по латерали. Дальнейшие исследования позволили сформировать модель слоисто-блоковой геологической среды, предполагающей наличие блоков земной коры, разделенных разрывными нарушениями. Внутреннее строение блоков предполагалось слоистым. В последние же десятилетия, формируется новая модель геологической среды, предусматривающая на фоне слоисто-блоковой модели наличие вертикальных струйных потоков флюидов, в том числе и микропузырьков газов (Спутниковые методы, 2012; Горный и др., 2009), переносящих из земных недр энергию и вещество в верхние горизонты коры и формирующие там как эпигенетические изменения горных пород, так и геохимические и геотермические аномалии. В свою очередь такие изменения приводят к вариациям физических свойств горных пород, почв и растительного покрова, что открывает возможность для их индикации современными высокочувствительными дистанционными методами. В этом направлении за последнее десятилетие опубликован ряд работ, посвященных анализу гео-индикаторов межблоковых тектонических нарушений и их динамики. К таким гео-индикаторам следует отнести тепловые аномалии (Тронин, Saraf, 2010; Горный и др., 2009; Вилор и др., 2006, 2007, 2008), специфические формы облаков (Морозова, 1996; Люшвин, 2009), изменения газового состава и атмосферного давления (Кутинов и др., 2011). Этому же вопросу посвящены исследования, направленные на формализованные методы анализа линеаментов, построенных по материалам спутниковых съемок (Бондур и др., 2012; Булыгин, Никулин, 2010; Зверев, Златопольский, Малкин, 2005; Щепин, 2005, 2007).

С развитием космической геодезии, появилась возможность наблюдения за геодинамическим режимом земной коры с помощью спутниковой радиолокационной интерферометрии и спутникового позиционирования – GPS/Глонасс. Эти исследования показали, что наблюдаются как монотонные горизонтальные перемещения литосферных плит со скоростями достигающими 6-9 см/год, так и вертикальные, в том числе и «высокочастотные» знакопеременные колебания поверхности земной коры (Горный и др., 2010). При этом, верти-

кальные движения блоков наблюдаются не только в открытых районах, но и на платформах в условиях мощного осадочного чехла.

### Геологическое картирование

Основными задачами этой стадии геологических работ являются картирование литологического состава поверхностных комплексов, включая гидротермально-метасоматическое изменения горных пород и выявление тектонических нарушений.

В последние годы начата реализация космического варианта спектроскопического метода, позволяющего дистанционно определять минеральный состав поверхностных отложений. Для этого применяются либо спутниковые спектрорадиометры с разделенными спектральными каналами, например ASTER, либо гиперспектральные сканеры с непрерывной регистрацией спектра большим количеством спектральных каналов (Hyperion).

Для картирования литологического состава горных пород с использованием спектральной информации тепловых каналов радиометра ASTER предложены несколько простых индексов: карбонатный индекс (CI), кварцевый (QI) и мафический (MI) индексы (Ninomiya et al., 2005). В результате исследований выполнено геологическое картирование на участках с различным составом горных пород на северо-западе провинции Ганьсу, Китай, в Южной Австралии (протерозойские метаморфические породы, прорванные кислыми интрузиями) и в пределах офиолитового пояса Ярлинг Зангбо (Yarlung Zangbo), южный Тибет, Китай. Материалы съемок спектрорадиометрами ASTER и AVIRIS использованы при картировании горных пород в районе Маунтфйн Пасс (Mountain Pass), Калифорния, США (Rowan et al., 2003). В этом районе представлен широкий спектр пород от известняков и доломитов до гранитоидов, карбонатитов и вулканических пород. Спектральные методы были направлены на выявление абсорбционных линий минералов, связанных с радикалами  $\text{CO}_3$ ,  $\text{Al-O-N}$  и  $\text{Mg-O-N}$ . Для построения литологических карт использовался индекс спектральной чистоты пикселя (pixel-purity index (PPI)). Другой пример картированием горных пород по данным AVIRIS относится к району Боди/Парамаунт (Bodie/Paramount), Калифорния, США (Crosta et al., 1998). Там развито золото-серебряное оруденение, связанное с гидротермальными изменениями в комплексе вулканических пород миоценового возраста: дациты, андезиты, риолитовые лавы. Для выделения метаморфизованных пород применялся спектральный угловой метод, были выделены комплексы монтморрилонита, каолинита, мусковита, железа (ярозит, гётит, гематит).

В Неваде (США) продемонстрирована высокая эффективность картирования горных пород по материалам, полученным съемочной аппаратурой SEBASS, работающей в тепловом инфракрасном диапазоне спектра (Vaughan et al., 2003). Были выделены комплексы пород, имеющие в своем составе кварц, глинистые минералы, ярозит, алуниит, сульфаты и другие. Для опознавания горных пород использовались методы классификации. Исследования, выполненные в этом же штате с использованием спектральных методов показали возможность картирования нового вида минералов и горных пород, содержащих аммоний (Vaughan et al., 1998). В полевых шпатах катион  $\text{NH}_4^+$  заменяет  $\text{K}^+$ , образуя аммониевый полевой шпат баддингтонит. Он образуется в зонах гидротермально-метасоматических изменений золоторудных месторождений. Была обнаружена линейная корреляция между концентрацией баддингтонита и глубиной линии поглощения на длине волны 2.12 мкм.

Следует отметить попытки количественного подхода к определению содержания кремнезема  $\text{SiO}_2$  в горных породах. Исследования были проведены в Хиллер Маунтейнс (Hiller Mountains), Невада, США и Виргенес-Ла Реформа (Virgenes-La Reforma), Бая Калифорния Сур (Baja California Sur), Мексика (Hook et al., 2005).

В рамках измерительного направления дистанционного зондирования показана возможность определения концентрации светлых слюд в зеленокаменном поясе Пилбара (Pilbara), Западная Австралия (Ruitenbeek et al., 2006). Для восстановления концентраций минералов использовался метод спектральных отношений.

Данные спектрометра НуМАР в видимом и БИК диапазоне успешно применялись для картирования комплекса ультраосновных пород внедрённых в протерозойские гнейсы и амфиболиты в Австралии (Rowan et al., 2004). Для разделения горных пород использовались методы классификации. Материалы, полученные спектрометром НуМАР также успешно использованы при картировании карбонатитового комплекса в Гренландии (Bedini, 2009).

Современные гидротермы характеризуются проявлением низкотемпературного метаморфизма, который фиксируется дистанционными спектральными методами. С помощью систем MASTER и SEBASS были выполнены работы в окрестностях гидротермального месторождения Стимбот Спрингс (Steamboat Springs), Невада, США (Vaughan et al., 2005). Выявлены участки окварцевания (опалы, кварц, алуни́т, альбит) и высоких концентраций глинистых минералов и слюд (каолинит, монтмориллонит, мусковит).

Там же, в Неваде, результаты съёмки НуМАР и AVIRIS были использованы для картирования отложений горячих источников, туфов, сульфатов (Kratt et al., 2006, Nash et al., 2004). Аналогичные результаты, но с использованием данных тепловых каналов ASTER и других спектрометров были получены для Йеллоустонского национального парка, США (Hellman, Ramsey, 2004).

В работе (Глушакова и др., 2005) материалы спектрометра ASTER и цифровая модель рельефа дневной поверхности SRTM оказались эффективными для решения геологических задач на территории Монголии. Для выяснения пространственного положения компонентов офиолитовой ассоциации применена классификация методом максимального правдоподобия материалов съёмки, полученных первыми девятью каналами спектрометра ASTER. В результате выделены поля развития всех компонентов офиолитовой ассоциации: – гипербазиты; – габброиды; – дайки различных генераций; – лавы. Для уточнения геологического строения Южно-Гобийского золоторудного пояса по материалам ASTER выполнено распознавание минерального состава методом спектрального угла. В результате выделены ожелезненные известняки, с которыми ассоциируются золоторудные проявления, гранитоиды различных фаз, поля риолитов. В дальнейшем аналогичные результаты были получены на примере офиолитового пояса в Пакистане (Khan, Mahmood, 2008), где для разделения горных пород применялся ряд индексов: каолинитовый, алуни́товый, кальцитовый и ОН-индекс изменённых пород.

### **Поиски рудных месторождений**

Одним из наиболее распространённых объектов для исследований являются медно-порфи́ровые месторождения, которые обладают ярко выраженной закономерно меняющейся зональностью гидротермально-метасоматических изменений вмещающих горных по-

род. Такого рода работы были выполнены для района Серебряного пояса, Аризона, США (Abrams et al., 1985), Коллахуази (Collahuasi), Северное Чили (Sabins, 1997) и некоторых других (Spatz, Wilson, 1994). В результате исследования были выделены пропилитовая, аргиллитовая и филлитовая зоны метаморфизма.

Кварцево-жильные эпитермальные месторождения золота были исследованы в горном округе Голдфилд (Goldfield), Невада, США (Sabins, 1999). К. Ватсон (Watson et al., 1990) использовал спектральные данные TMS в тепловом диапазоне для изучения гидротермальных месторождений золота несогласия Carlin в Неваде, США. Месторождения золота различного генезиса: горячих источников, скарновые, эпитермальные жильные, типа бонанза были исследованы в Мексике с использованием материалов съемок спутником Landsat (Bennett et al., 1993). Данные спектрорадиометра ASTER были использованы для поиска измененных горных пород в Шоколадных горах (Калифорния, США) для локализации золоторудных проявлений в кварц-биотитовых гнейсах и мусковитовых сланцах докембрийского фундамента (Zhang et al., 2007).

В Аргентине выполнен анализ изменений горных пород в районе медно-порфировых месторождений Инфиернилло (Infiernillo), Аргентина (Tommaso, Rubinstein, 2007). Внутренняя зона изменения характеризуется калиевым метаморфизмом, на который были наложены интенсивные процессы серицитизации. Внешняя зона представляет собой обширный район окварцевания.

Применение материалов съемки спектрорадиометром ASTER при поисках железных руд апробировано на примере месторождения Чадермалу (Chadormalu), Иран. Месторождение представляет собой систему линз магнетитового или магнетит-апатитового (типа Кируна) состава и локализовано в палеокальдере Кух-э-Сорх (Kuh-e-Sorkh) с комплексом вулканических пород, залегающих в докембрийских гранитах, метаморфических сланцах, мраморах. Имеются зоны как натриевого, так и калиевого метаморфизмов, связанные с оруденением. В самой верхней части залежи вмещающие породы переработаны кварцевым метаморфизмом (Moghtaderi et al., 2007).

В Испании в старом рудном районе (золото, серебро, свинец) проведены комплексные геохимические и спектрометрические работы по изучению спектральных свойств почв в связи с концентрациями таких элементов, как свинец, цинк, мышьяк (Choe et al., 2008). По данным спектрометра НуМАР и результатов геохимических анализов выявлены корреляции некоторых спектральных отношений с содержаниями тяжёлых металлов.

Данные Landsat ETM были использованы для картирования зон изменения при поисках урановых месторождений несогласия в Северной Австралии (Rajesh, 2008). Для картирования зон изменённых горных пород использовался метод главных компонент.

Вторым направлением применения материалов спутниковых съемок при прогнозировании и поисках рудных месторождений является методология, базирующаяся на применении методов эталонной классификации многомерного признакового пространства, подготавливаемого по дистанционным и геофизическим материалам. Одним из примеров этого направления является комплексная технология прогнозирования эндогенных руд меди, никеля, золота, молибдена, олова, полиметаллов, урана и полей развития кимберлитового магматизма. (Серокуров, 2005; Серокуров и др., 2007, 2008, 2009). Технология включает визуальное и формализованное тектоническое дешифрирование космических материалов различного масштабного ряда, специализированную обработку данных, направленную на

построение многомерного признакового пространства, создание прогнозно-поисковых моделей рудных таксонов, выделение участков, благоприятных для проведения наземных поисковых работ.

В работе (Бусыгин, Никулин, 2009) изложена методика интегрированного анализа геолого-геофизических данных, материалов космических съемок при прогнозе золоторудной минерализации на территории Сорокинского золоторудного поля (Приазовский кристаллический массив), Украина. Для анализа использованы карты полей приращения поля силы тяжести и приращения магнитного поля, цифровая модель рельефа миссии SRTM. Для прогнозирования применялся метод аналогий, формализованный в программе эталонной классификации. Первичное признаковое пространство включало в себя около 500 трансформант геофизических полей и цифровой модели рельефа. Исходное признаковое пространство подвергалось минимизации путем отбрасывания неинформативных признаков. В итоге подготовлена карта сходства набора признаков с эталонной выборкой «рудного класса». Показано, что примененная методика повышает качество прогнозирования золоторудной минерализации. За пределами Сорокинского золоторудного поля выявлены перспективные на золоторудную минерализацию участки.

Изучению природы формирования коренных месторождений алмазов посвящена работа (Горный и др., 2006) Для этого выполнено тектоническое дешифрирование космических материалов спутников NOAA(AVHRR), Terra/Aqua(MODIS) на основные алмазные районы России. Проведен совместный анализ космического снимка Terra(ASTER) и глубинного сейсмического профиля, пересекающего трубку Мир в Мало-Ботуобинском алмазоносном районе Восточной Сибири. Выявлена аналогия структур, индицирующих алмазоносные районы со структурами, возникающими в результате камуфлетных ядерных взрывов. С использованием методов подобия, проведена оценка глубин и мощности взрывов, которые могли сформировать алмазоносные районы. Показано, что оценки глубин совпадают с диапазоном глубин самопроизвольной детонации тяжелых мантийных углеводородов. В сплошных кимберлитах алмазоносной трубки Айхал обнаружены макровключения битумов. Это явилось одним из подтверждений механизма образования коренных месторождений алмазов в результате камуфлетных взрывов, вызванных самопроизвольной детонации тяжелых мантийных углеводородов.

В работе (Кутинов и др., 2011) предложен тектонический узел в качестве промежуточного поискового объекта поиска кимберлитовых тел Архангельской алмазоносной провинции. Рассмотрена возможность регистрации спутниковыми съемками индикационных признаков ландшафта, сформированных наведенными магнитотеллурическими токами, глубинной дегазацией и изменением структуры барического поля в приземном слое атмосферы. Сделана попытка выделения поисковых критериев тектонических узлов.

### **Поиск месторождений углеводородов**

В последнее десятилетие основные усилия исследователей по применению материалов космических съемок были направлены решение нескольких проблем. Прежде всего, это разработка формализованных методов выявления площадей, перспективных на поиски углеводородов. Для этого используется эталонная классификация, основанная на методе аналогий при прогнозировании месторождений полезных ископаемых. Примерами

являются многочисленные исследования, выполненные в России и на Украине (Горный и др., 2008, 2012; Архипов и др., 2011; Бусыгин и др., 2012; Трофимов и др., 2012; Прогнозирование структур..., 2010; Спутниковые методы..., 2012). Особенностью исследований, выполненных на примере юга Западной Сибири (Горный и др., 2008) является применение схемы палео-структур восходящей мантийной конвекции, подготовленной по космическим материалам на этапе регионального геологического изучения территории, для корректного выбора эталонов при прогнозировании перспективных на поиски залежей углеводородов в восточной части Курганской области. В результате этот подход совмещает два методологических подхода в прогнозировании – генетический подход и метод аналогий.

Вторым новым моментом применения космических материалов при поисках месторождений углеводородов является широкое комплексирование с материалами геофизических съемок (Горный и др., 2012; Бусыгин и др., 2012; Спутниковые методы..., 2012). Следует отметить специфику применения геофизических материалов при подготовке многомерного признакового пространства – необходимость решения обратной геофизической задачи. Это необходимо для корректного сопоставления дистанционных и геофизических признаков (Горный и др., 2012).

Третьим моментом является все более частые попытки регистраций изменений в ландшафте (аномалий «типа залежь») формирующихся над месторождениями углеводородов в почвенно-растительном покрове вследствие эпигенетических изменений, вызванных флюидодинамикой (Горный и др., 2008; Трофимов и др., 2012; Спутниковые методы..., 2012). Ведущую роль при этом играет спутниковая спектрометрия и тепловой геотермический метод.

В результате работ по исследованию просачиваний углеводородов в Лиссабонской долине (Юта, США) были обнаружены высокие концентрации глинистых минералов, дефицит гематита, повышенные содержания кальцита и значительные изменения полевых шпатов в зонах изменений (Petrovic et al., 2008). Эти зоны были приурочены к участкам просачиваний углеводородов. Для выделения по материалам спутниковых съемок перспективных участков использовался метод главных компонент. Аналогичные исследования, но с большим объемом полевых работ, направленные на поиск высоких концентраций глинистых минералов, кальцита и кварца были выполнены в Китае (Ху et al., 2008).

Особо следует отметить новизну применения материалов спутниковых съемок при крупномасштабных работах: – стадия разведки месторождений; – при эксплуатации месторождений. Это применение космической радиолокационной интерферометрии для выявления блоковой структуры месторождения (Трофимов и др., 2012) и для мониторинга просадок дневной поверхности при добыче углеводородов (Филатов), исследования направленные на количественную оценку запасов углеводородного сырья с применением материалов спутниковых съемок (Трофимов и др., 2012).

### **Опасные геологические явления**

К опасным геологическим явлениям относят землетрясения, вулканические извержения, оползни, деформации дневной поверхности, вызванными карстовыми и мерзлотными явлениями, техногенной нагрузкой. При изучении опасных геологических явлений спутни-

ковыми съёмочными исследуется рельеф, температура и влажность земной поверхности, вещественный состав поверхностных отложений, газовый состав, концентрация аэрозоля, температура и влажность атмосферы.

Деформации дневной поверхности наблюдаются на всех этапах развития опасных процессов, часто видны невооружённым глазом и легко фиксируются как наземными, так и дистанционными методами. Спутниковые методы изучения деформаций при опасных геологических явлениях можно разделить на: структурные (оптические и радиолокационные), радиолокационную интерферометрию, методы определения смещений с помощью систем глобального позиционирования, гравитационные измерения.

Структурные методы основываются на дешифрировании разрывных нарушений на данных дистанционного зондирования как оптического, так и радиоволнового диапазона. При изучении опасных явлений эти методы начали применяться раньше других (Трифонов и др., 1988). В настоящее время их используют также и для быстрой оценки экономического ущерба на территории, пострадавшей от стихийного бедствия. Так, радиолокационная съёмка сейсмоактивного разлома Enriquillo-Plantain, вызвавшего разрушительное землетрясение на Гаити 12 января 2010,  $M = 7.0$  и выполненная с американского стратегического разведывательного БПЛА RQ-4 Global Hawk позволила быстро оценить район и масштаб разрушений.

Давно и успешно эти методы используются для изучения структуры и морфологии вулканических построек, разрывных нарушений, контролирующей магматическую активность, картирования потоков лавы и пирокластических материалов различного состава и возраста, для распознавания и прогнозирования оползневых процессов.

В последнее десятилетие отмечается широкое использование спутниковой радиолокационной интерферометрии для картирования деформаций дневной поверхности. Метод основан на измерении амплитуды и фазы отражённого от земной поверхности радиолокационного сигнала. Съёмки проводятся с двух и более параллельных орбит. Это позволяет с высокой точностью восстановить рельеф поверхности. Проведя такие же измерения через некоторый промежуток времени можно получить тонкие изменения высоты рельефа дневной поверхности, то есть его деформации. Современные системы позволяют фиксировать смещения с высокой точностью – вплоть до нескольких миллиметров.

Впервые эти исследования были выполнены для землетрясения Ландерс в Калифорнии (28 июня 1992,  $M=7.3$ ). Для землетрясений на территории России по этой методике впервые были построены карты деформаций Нефтегорского землетрясения на Сахалине (28 мая 1985 г.,  $M=7.6$ ) (Tobita et al., 1998) и Алтайского землетрясений (27 сентября 2003,  $M=7.3$ ) (Nissen et al., 2007).

В качестве яркого примера эффективности применения технологии спутниковой радиолокационной интерферометрии можно привести землетрясение Тохоку 2011 г. в Японии ([http://www.jaxa.jp/article/special/antidisaster/yamanaka\\_e.html](http://www.jaxa.jp/article/special/antidisaster/yamanaka_e.html)).

Исследование вулканов представляет собой более простую задачу для спутниковой интерферометрии, так как положение объектов фиксировано и хорошо известно, а их поверхность часто лишена растительности и имеет множество отражающих площадок. За прошедшие 15 лет выполнен большой объём исследований вулканов на Аляске, в Андах, Японии и на Камчатке. Исследования деформаций поверхности вулканов методом спутниковой интерферометрии для таких вулканов как Этна (Италия) и Сакурадзима (Япония) ведутся в режиме мониторинга. Современный уровень развития технологий дистанционного



зондирования в этом направлении позволяет использовать метод спутниковой интерферометрии для прогноза вулканической активности.

Активно ведутся работы по применению спутниковой интерферометрии при изучении деформаций земной поверхности, вызванных техногенным воздействием, при мониторинге оползневых процессов, деформаций зданий и сооружений. Накоплен значительный опыт при измерении просадок, вызванных горными выработками, тоннелями метро, откачкой воды, нефти и газа. В последние годы отмечается повышенный интерес к внедрению технологий спутниковой радиолокационной интерферометрии при добыче углеводородов, на железнодорожном транспорте, при исследовании деформаций зданий (Горный и др., 2010; Евтюшкин, Филатов, 2009; Железнов и др., 2010; Захарова, Захаров, 2009; Филатов и др., 2011). В рамках этих исследований представлены два основных метода космической радиолокационной интерферометрии – дифференциальная интерферометрия и интерферометрия по постоянным отражателям.

Технологии глобального позиционирования давно и успешно используются для мониторинга деформаций земной поверхности (Segall and Davis, 1997; Segall, 2010; Соболев и др., 2010). В России также накоплен опыт совместного применения технологий глобального позиционирования и спутниковой интерферометрии (Михайлов и др., 2010). Один из последних примеров применения технологий глобального позиционирования показан на примере землетрясения Тохоку, Япония, 11 марта 2011,  $M=9.0$ . Смещения на уровне береговой линии северо-восточной Японии составили около 4 м в восточном направлении для горизонтальной составляющей и просадки около 1 м – для вертикальной составляющей.

В настоящее время актуальной является задача измерения деформаций до события и прогноза вулканических извержений и землетрясений. Если в случае вулканической активности есть все предпосылки для успешного решения задачи прогноза, то в случае землетрясений ответ на этот вопрос пока неочевиден: по одним сведениям перед землетрясениями не фиксировалось заметных деформаций поверхности, по другим – такие изменения есть, и спутниковая радиолокационная интерферометрия их фиксирует. Так, например, в Японии, в районе Токай, на контакте трёх литосферных плит уже 20 лет наблюдается опускание одного из густонаселённых участков со скоростью более 5 мм/год. Здесь ожидается разрушительное землетрясение с огромной энергией (магнитуда более 8). Расположенные здесь же приёмники GPS подтверждают данные, полученные спутниковой интерферометрией. Отметим, что в Японии национальная сеть насчитывает в настоящее время более 1200 станций, расположенных на расстоянии 20-50 км и проводящих измерения каждые 30 секунд. Столь густая сеть позволяет следить за деформациями земной поверхности крупных регионов в режиме реального времени и проверять данные спутниковой интерферометрии.

В настоящее время в Институте физики Земли РАН совместно с Научным центром аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос» с использованием спутниковых данных GPS, космических снимков и разломной тектоники на основе построенных геомеханических моделей созданы новые технологии по прогнозу сейсмичности на интервале времени порядка недели-месяца (Бондур и др., 2010). На примере крупнейшего за последнее время землетрясения в Южной Калифорнии «Гектор Майн» 16.10.1999 с  $M=7,1$  были продемонстрированы возможности новой технологии при непосредственном введении в модель спутниковых данных сети GPS по вариациям смещения земной поверхности, которые являются реальным отражением текущей сейсмичности.

Деформации дневной поверхности приводят к изменению массы горных пород, а это создаёт основу для применения спутниковой гравиметрии. После разрушительного Суматранского землетрясения в Индонезии 26 декабря 2004 года, (магнитуда 9.0), вызвавшего чудовищное цунами и унесшее жизни более чем 227 тысяч человек, впервые по спутниковым данным были зафиксированы изменения гравитационного поля Земли в эпикентральной области (Han et al., 2006). По всей видимости, они были вызваны смещением литосферных плит. Вертикальное поднятие с амплитудой в несколько метров охватило площадь около 30 квадратных километров и вызвало цунами, тогда как горизонтальное смещение сегмента плиты составило до 10 метров на участке 1200×150 квадратных километров.

После разрушительного землетрясения в Японии 11 марта 2011 года, (магнитуда 9.0), вызвавшего сильное цунами и унесшее жизни более чем 15 тысяч человек, были зафиксированы изменения поля силы тяжести Земли на площади в сотни тысяч квадратных километров (Wang et al., 2012). По всей видимости, они были также вызваны смещением литосферных плит как в горизонтальном, так и вертикальном направлениях.

Современные спутниковые системы позволяют проводить мониторинг земной температуры поверхности суши и океана, а также количества атмосферных осадков, влажности и температуры атмосферы с высоким пространственным и временным разрешением, достаточным для мониторинга опасных геологических явлений.

Уже в 80-х годах, с запуском спутников Landsat, NOAA, геостационарных аппаратов становится реальным мониторинг вулканической и сейсмической активности с использованием тепловых каналов.

Многочисленные тепловые эффекты, наблюдавшиеся в вулканических и сейсмических процессах стимулировали развитие дистанционного геотермального метода изучения этих опасных геологических явлений. В первую очередь космической тепловой съёмкой были зафиксированы тепловые аномалии, приуроченные к излиянию лавы из вулканов. Так как температура лавы значительно превышает температуру земной поверхности, этот объект легко регистрируется спутниковыми методами даже с низким пространственным разрешением.

Измерение влажности земной поверхности и количества атмосферных осадков являются критической информацией при мониторинге оползневых процессов. Технологии спутникового мониторинга влажности почвы и атмосферных осадков получили широкое распространение только последнее время.

Первый пример использования тепловых дистанционных методов в вулканологических исследованиях связан с извержением вулкана Ласкар в Чили, 16 сентября 1986, когда была изучена эволюция тепловой аномалии кратера вулкана по тепловым снимкам со спутника Landsat. С тех пор наблюдения за вулканической активностью с использованием тепловых изображений прошло путь от исследований до мониторинга. На Конференции неоднократно делались сообщения как о научных достижениях в этом виде дистанционного зондирования (Хренов, 2011), так и о решении практических задач мониторинга вулканической активности на Камчатке (Мельников, 2008).

На большом количестве примеров (Горный и др., 1988; Тронин, 2004; Ouzounov, Freund, 2003; Quang, Xu, Dian, 1991; Tramutoli et al., 2001) в различных географических, геологических и сейсмических условиях показано наличие тепловых аномалий на земной поверхности, связанных с землетрясениями. Тепловые аномалии на земной поверхности

связаны с крупными разрывными нарушениями и узлами их пересечения. Тепловые аномалии зафиксированы в Средней Азии, Камчатке, Китае, Индии, Японии, Турции, Италии, Испании, США и других странах и регионах. Эти аномалии имеют размеры сотни километров в длину, десятки – в ширину, появляются за одну-две недели до толчка, их амплитуда достигает 5-7 °С.

В связи с Гуджаратским землетрясением в Индии 26 января 2001 г. были выполнены исследования по измерению влажности почвы по данным радиометра MISR, установленного на борту спутника Terra. Для этого же землетрясения были обнаружены изменения испарения с поверхности по спутниковым данным. Аномалии приземной температуры и влажности воздуха, а также теплового потока, затраченного на испарение с поверхности отмечены при землетрясении Сычуань, Китай, 2008, Гаити, 2010, Тохоку, Япония, 2011.

Выдвинуты несколько гипотез формирования тепловых аномалий на земной поверхности: из-за изменения уровня грунтовых вод, эманацій радона и локального парникового эффекта.

Поверхность моря представляет собой более сложный объект для наблюдений тепловых аномалий, связанных с вулканической и сейсмической активностью. Из-за высокой тепловой инерции воды процессы нагревания и охлаждения идут гораздо медленнее, чем на суше. Значительную роль в отличие от суши, начинает играть тепломассоперенос.

Дистанционные тепловые методы в авиационном варианте использовались для мониторинга подводных извержений с середины 80-х гг. Каналы спутниковых систем в оптическом и тепловом диапазоне для наблюдения за подводными извержениями вулканов стали использоваться позже. Одним из последних примеров такого мониторинга послужило извержение вулкана около о. Иерро (Канарские о-ва) в феврале 2012 г.

Тепловые аномалии на водной поверхности были обнаружены для землетрясений Бумердес в Алжире 21 мая 2003,  $M=6.8$ , Бхудж (Гуджарат), Индия,  $M = 7.7$ , 26 января 2001, Суматранского землетрясения 26 декабря 2004 г.,  $M=9.0$  и многих других (Ouzounov и Freund, 2003). Кроме изменений температуры водной поверхности было обнаружено изменение цвета морской воды при землетрясении Бхудж. Многочисленные исследования изменений характеристик водной поверхности были проведены после разрушительного Суматранского землетрясения: от измерений теплового потока, затраченного на испарение с водной поверхности до вариаций хлорофилла-А в воде.

Дистанционные методы исследования атмосферы широко применяются при изучении опасных геологических процессов, в первую очередь для мониторинга тепловых выбросов вулканов. Относительно новым направлением является анализ малых газовых компонент в атмосфере, связанных с вулканической активностью. Для этого используются спутниковые наблюдения за диоксидом серы, оксидом брома и концентрацией аэрозоля.

Для исследования сейсмической активности был выполнен анализ концентраций тропосферного озона при землетрясениях. По результатам спутниковых измерений озона с сейсмоопасных зонах отмечены незначительные снижения концентраций в эпицентральной зоне (Tropin, 2002). Эти данные подтверждаются результатами наземных озонметрических наблюдений (Тертышников, 1994, 1995). Исследования атмосферных процессов при Гуджаратском землетрясении показали изменение содержания водяного пара в столбе атмосферы и концентраций аэрозоля над океаном, вызванное сейсмическим событием.

Анализ облачности при землетрясениях идёт в двух направлениях – методах визуального дешифрирования и формализованного анализа. Идея первого метода заключается в анализе формы и распределения облаков для прогноза землетрясений. Однако попытки формализовать этот метод до настоящего времени не удались. Формализованный анализ основан на измерении всё того же уходящего длинноволнового излучения от Земли, но в этом варианте измеряется статистически усредненная уходящая длинноволновая радиация вне зависимости от погодных условий как при наличии, так и при отсутствии облачного покрова. В результате применения такой методики было обнаружено аномальное поведение уходящего длинноволнового излучения для ряда крупных землетрясений (Ouzounov et al., 2007). Наиболее полные данные были представлены для землетрясения Тохоку в Японии, 2011 г. (Ouzounov et al., 2011). Как наиболее вероятный источник формирования аномалии называется эмиссия радона.

### Заключение

В результате произошедшей технической революции, вызванной как переходом от аналоговых, не измерительных технических систем дистанционного зондирования к метрологически обеспеченным, измерительным цифровым системам, так и возросшей производительностью компьютеров необыкновенно расширились возможности применения спутниковых методов при решении геологических и геофизических задач. В первую очередь следует отметить все возрастающее применение в нашей стране космической радиолокационной интерферометрии при решении широкого круга задач геологии, геофизики и экологической безопасности. Следует отметить, что космическая радиолокационная интерферометрия это наиболее серьезное практическое применение голографии, открытой Денешом Габором (Dénes Gábor) 65 лет тому назад.

Вторым важным моментом в тенденциях применения спутниковых методов в геологии и геофизике является замена методик визуального дешифрирования материалов на формализованные методы анализа, позволяющие количественно оценивать надежность получаемых результатов и тем самым исключить элементы субъективизма при их получении.

### Литература

1. *Архипов А.И., Есипович С.М., Каушал А., Ковальчук С.П., Попов М.А., Станкевич С.А., Титаренко О.В.* Уточнение границ залежей углеводородов на основе геоинформационного анализа материалов многоспектральной космической съемки и геолого-геофизических данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. №2. С. 121-129.
2. *Бондур В.Г., Гарагаиш И.А., Гохберг М.Б., Латшин В.М., Нечаев Ю.В.* Связь между вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии // Доклады РАН. 2010. Т. 430. № 3. С. 400 – 404.
3. *Бондур В.Г., Зверев А.Т., Гапонова Е.В.* Линеаментный анализ космических изображений сейсмоопасных регионов России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №4. С. 213-222.
4. *Булаева Н.М., Кобзаренко Д.Н., Османов Р.Ш., Аскеров С.Я.* Исследование связи приповерхностного температурного поля с сейсмической активностью центральной части дагестанского клина на основе спутниковых данных NOAA // Вестник Дагестанского научного центра. 2004. № 16. С. 29.

5. Бусыгин Б.С., Никулин С.Л. Комплексование аэрокосмических и геолого-геофизических материалов при прогнозировании золоторудной минерализации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т.6. №2. С. 17-23.
6. Бусыгин Б.С., Никулин С.Л. Генерализация космических снимков для повышения эффективности решения геологических задач методами линеаментного анализа // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т.7. №2. С. 303-309.
7. Бусыгин Б.С., Никулин С.Л., Свистун В.К. Геоинформационная технология прогноза скоплений метана в пределах шахтных полей центрального Донбасса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №3. С. 237-245.
8. Вилор Н.В., Абушенко Н.А., Тацилин С.А. Спутниковый метод изучения корреляции инфракрасного эмиссионного потока и элементов геологической структуры Земли в северном полушарии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т.3. №2. С. 215-224.
9. Вилор Н.В., Абушенко Н.А., Тацилин С.А., Ключевский А.В., Демьянович В.М. Применение данных дистанционного зондирования при исследовании инфракрасного излучения земной поверхности в областях интенсивного движения блоков литосферы Центрально-Азиатского складчатого пояса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2007. Т.4. №.2. С. 134-140.
10. Вилор Н.В., Ключевский А.В., Демьянович В.М., Русанов В.А., Тацилин С.А., Шарпинский Д.Ю. Распределение и колебательные свойства уходящего поверхностного ИК потока разломов в корреляционных соотношениях с сейсмологическими параметрами // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т 5. №.1. С. 337-348.
11. Глушкова Н.В., Наумов Е.А., Рябинин А.Б., Дягилев Г.С., Нагирняк М.С. Опыт использования космических снимков датчика ASTER для решения геологических задач на примере тестовых полигонов в пределах Монголии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. № 2. С. 175-181.
12. Глуховский М.З., Павловский Е.В. Кольцевые структуры ранних стадий развития Земли // Сравнительная планетология. Материалы 27-го международного геологического конгресса. М.: Наука. 1984. С. 65–74.
13. Горный В.И., Сальман А.Г., Тронин А.А., Шилин Б.В. Уходящее инфракрасное излучение Земли – индикатор сейсмической активности // Доклады АН СССР. 1988. Т. 301. № 1. С. 67-69.
14. Горный В.И. Геодинамика Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформ (по данным дистанционного геотермического метода) // Региональная геология и металлогения. Сентябрь, 2000, №12. ВСЕГЕИ. С-Петербург. С. 76-86.
15. Горный В.И. Минерагенические закономерности как результат движения плит и мантийной конвекции (по космическим материалам) // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2005. Т 2. №2. С. 182-197.
16. Горный В.И., Караев Н.А., Ван Гендерен Дж. Л., Фролов В.С. Камуфлетные взрывы как причина формирования структур, индицирующих алмазоносные районы (по материалам дистанционных и геофизических методов) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т. 3. №.2. С. 225-241.
17. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Тронин А.А. Количественная оценка перспектив нефтегазоносности территорий на основе комплексной обработки материалов космических и геофизических съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т.5. №.1. С. 349-355.
18. Горный В. И., Латыпов И.Ш., Теплякова Т.Е., Воякина Е.Ю. Верификация результатов дистанционного геотермического метода при изучении природы формирования аazonальной экосистемы Большого Соловецкого острова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т. 6. №2. С. 36-45.
19. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Оловянный А.Г., Тронин А.А.. Знакопеременные вертикальные движения земной поверхности по данным космической радиолокационной съемки (на примере Санкт-Петербурга) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 321-332.
20. Горный В.И., Attmar O, Kafri A., Киселев А.В., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Minini H. Региональное геологическое строение севера аравийской плиты и перспективы нефтегазоносности территории Сирии по данным комплексной обработки результатов спутниковых и гравиметрической

- съепок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т.9. №1. С. 305-312.
21. *Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А.* Сейсмоэлектромагнитные явления: М.: Наука. 1988. 174 с.
  22. Дагестанское землетрясение 14 мая 1970 г. Сейсмология, геология, геофизика. Под. ред. Амирханова Х.И. М.: Наука, 1980. 220 с.
  23. *Дода Л.Н., Новикова Н.Н., Пахомов Л.А.* Космический мониторинг предвестников землетрясений // Наука в России. 2009. № 6. С. 30-37.
  24. *Евтюшкин А.В., Филатов А.В.* Оценка деформаций земной поверхности в районах интенсивной нефтедобычи в Западной Сибири методом SAR-интерферометрии по данным ENVISAT\ASAR и ALOS\PALSAR // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009.Т. 6. № 2. С. 45-53.
  25. *Железнов М.М., Василейский А.С., Макаров А.Ю.* Мониторинг потенциально опасных воздействий на железнодорожную инфраструктуру с использованием космических систем ДЗЗ // Вестник ВНИИЖТ. 2010. № 6. С. 16-19.
  26. *Захарова Л.Н., Захаров А.И.* Исследование динамики волжских берегов в районе Ульяновска методом радиолокационной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т.6. №2. С. 54-57.
  27. *Златопольский А.А., Малкин Б.В.* Автоматизированный анализ ориентационных характеристик данных дистанционного зондирования (программа «Lessa») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т.2. № 2. С. 188-195.
  28. *Кутинов Ю.Г., Чистова З.Б., Гофаров М.Ю.* Выявление индикационных признаков площадей перспективных на поиски коренных источников алмазов в условиях архангельской алмазоносной провинции // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т.8. №2. С. 150-156.
  29. *Люшвин П.В.* Спектральные характеристики сейсмогенных облаков // Исследование Земли из космоса, 2009. № 2. С. 19-27.
  30. *Макаренко Ф.А.* Термальные воды СССР и вопросы их теплоэнергетического использования // М.: Изд. Академии наук СССР. 1963. 292 с.
  31. *Мельников Д.В.* Применение данных OMI/Aura для задач мониторинга извержений вулканов Камчатки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 1. С. 371-375.
  32. *Михайлов В.О., Назарян А.Н., Смирнов В.Б., Диаман М., Шатири Н., Киселева Е.А., Тихоцкий С.А., Поляков С.А., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П.* Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 // Изв. РАН, «Физика Земли». 2010. №2. С. 3-16.
  33. *Морозова Л.И.* Особенности проявления лито-атмосферных связей в периоды сильных землетрясений Азии // Известия РАН, Физика Земли. 1996. №5. С. 63-68.
  34. Прогнозирование структур чехла юга Восточной Сибири космическими методами и оценка их прогнозных локализованных ресурсов в условиях слабой геологической изученности [Текст] // рук. работы Г. Г. Райкунов; ред. Д. М. Трофимов: Королёв: Астрозонд. 2010. 108 с.
  35. *Серокуров Ю.Н.* Использование материалов космического зондирования при выделении участков, перспективных для поисков эндогенных руд и коренных алмазов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т.2. №2. С. 204-208.
  36. *Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д., Громцев К.В.* Технология дистанционного картирования очаговых активизационных процессов в земной коре восточной части Балтийского щита // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т.4. №.2. С. 156-161.
  37. *Серокуров Ю.Н., Калмыков В.Д., Громцев К.В.* Опыт использования дистанционной информации при оценке золотоносного потенциала Восточных Саян // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т.5. №.1. С. 386-390.
  38. *Серокуров Ю.Н., Громцев К.В.* Оценка алмазоносного потенциала Северо-Западных территорий Канады по материалам дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т.6. № 2. С. 66-70.
  39. *Соболев Г.А., Закржевская Н.А., Акатова К.Н., Гитис В.Г., Дерендяев А.Б., Брагин В.Д., Сы-*

- чева Н.А., Кузиков С.И. Динамика взаимодействия полей сейсмичности и деформаций земной поверхности (Бишкекский геодинамический полигон) // Физика Земли. 2010. № 10, С. 15–37.
40. Спутниковые методы поиска полезных ископаемых. Сб. статей. Под ред. В.И. Лялько, М.А. Попова: Киев: Карбон-Лтд, 2012. 436 с.
  41. Тертышников А.В. Сейсмоозонные эффекты Закавказья // Известия РАН, Физика Земли. 1994. № 5. С. 53-61.
  42. Тертышников А.В. Эффекты сейсмоозонных связей над очагами сильных землетрясений // Известия РАН, Физика Земли. 1995. № 9. С. 66-71.
  43. Трифонов В.Г., Макаров В.И., Кожухин А.И., Скобелев С.Ф., Шульц С.С. (мл.). Аэрокосмическое изучение сейсмоопасных зон. М.: Наука. 1988. 133 с.
  44. Тронин А.А. Космические методы исследования землетрясений: Современное состояние и перспективы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Т. 1. С. 33-38.
  45. Тронин А.А., Saraf A.K. Космическая тепловая съемка передового надвига Гималаев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 2. С. 350-353.
  46. Трофимов Д.М., Евдокименков В.Н., Шуваева М.К. Современные методы и алгоритмы обработки и анализа комплекса космической, геолого-геофизической и геохимической информации для прогноза углеводородного потенциала неизученных территорий. М.: Физматлит, 2012. 320 с.
  47. Филатов А.В., Евтюшкин А.В., Васильев Ю.В. Определение смещений техногенных объектов на территории нефтяных месторождений методом радарной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С.175-181.
  48. Фишкова Л.М., Торошелидзе Т.И. Отображение сейсмической активности в вариациях свечения ночного неба // Полярные сияния и свечение ночного неба. 1989. № 33. С. 17-23.
  49. Хренов А.П. Исследование активных вулканов методами дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 166-176.
  50. Щетин М.В. Автоматизированный программный метод анализа изображений аэрокосмических фотопланов. Векторизация – анализ ландшафтных и тектонических структур // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. №. 2. С. 209-215.
  51. Щетин М.В. Программа ALINA. Метод свернутых роз. Метод геологических исследований и геологического районирования на основе программной обработки аэрокосмических изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4. №. 2. С. 162-171.
  52. Abrams M.J., Brown D. Silver Bell, Arizona, porphyry copper test site // The Joint NASA-Geosat test case study, Section 4: American Association of Petroleum Geologists: Tulsa: OK. 1985. 73 p.
  53. Baugh W.M., Kruse F.A., Atkinson Jr. W.W. Quantitative Geochemical Mapping of Ammonium Minerals in the Southern Cedar Mountains, Nevada, Using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS) // Remote Sensing of Environment. 1998. V. 65. 3. P. 292-308.
  54. Bedini E. Mapping lithology of the Sarfartoq carbonatite complex, southern West Greenland, using HyMap imaging spectrometer data // Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113. 6. P. 1208-1219.
  55. Bennett S.A., Atkinson W.W., Kruse F.A. Use of thematic mapper imagery to identify mineralization in the Santa Teresa District, Sonora, Mexico // Int. Geol. Rev. 1993. 35. P. 1009– 1029.
  56. Choe E., van der Meer F., van Ruitenbeek F., van der Werff H., de Smeth B., Kim K.W. Mapping of heavy metal pollution in stream sediments using combined geochemistry, field spectroscopy, and hyperspectral remote sensing: A case study of the Rodalquilar mining area, SE Spain // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112. 7. P. 3222-3233.
  57. Crosta A.P., Sabine C., Taranik J.V. Hydrothermal Alteration Mapping at Bodie, California, Using AVIRIS Hyperspectral Data // Remote Sensing of Environment. 1998. Vol. 65. 3. P. 309-319.
  58. Gornyi V.I. The Mantle Convection and the Drift of Euro-Asian Plate (According the Remote Geothermal Method Data). Proceedings of the IGARSS 2002 & 24-th Canadian Symposium on Remote Sensing. 24-28 June 2002. Toronto, Canada. 2002 IEEE. Vol. IV. P. 2029-2035.
  59. Han S.-C., Shum C.K., Bevis M., Ji C., Kuo C.-Y. Crustal Dilatation Observed by GRACE after the 2004 Sumatra-Andaman Earthquake // Science. 2006. V. 313. 5787. P. 658-662.
  60. Hook S.J., Dmochowski J.E., Howard K.A., Rowan L.C., Karlstrom K.E., Stock J.M. Mapping variations in weight percent silica measured from multispectral thermal infrared imagery--Examples from the Hiller Mountains, Nevada, USA and Tres Virgenes-La Reforma, Baja California Sur, Mexico // Remote Sensing of Environment, 2005. Vol. 95. 3. P. 273-289.

61. Khan S.D., Mahmood K. The application of remote sensing techniques to the study of ophiolites // *Earth-Science Reviews*. 2008. Vol. 89. 3-4. P. 135-143.
62. Kratt C., Calvin W., Coolbaugh M. Geothermal exploration with Hymap hyperspectral data at Brady-Desert Peak, Nevada, *Remote Sensing of Environment*, 2006. Vol. 104. 3. P. 313-324.
63. Moghtaderi A., Moore F., Mohammadzadeh A. The application of advanced space-borne thermal emission and reflection (ASTER) radiometer data in the detection of alteration in the Chadormalu paleocrater, Bafq region, Central Iran // *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007. Vol. 30. 2. P. 238-252.
64. Nash G.D., Johnson G.W., Johnson S. Hyperspectral detection of geothermal system-related soil mineralogy anomalies in Dixie Valley, Nevada: a tool for exploration // *Geothermics*. 2004. Vol. 33. 6. P. 695-711.
65. Ninomiya Y., Fu B., Cudahy T.J. Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared 'radiance-at-sensor' data // *Remote Sensing of Environment*. 2005. Vol. 99. 1-2. P. 127-139.
66. Ouzounov D., Freund F. Mid-infrared emission prior to strong earthquakes analyzed by remote sensing data // *Adv. Space Res.* 2003. 33. P. 268-273.
67. Ouzounov D., Liu D., Kang C., Cervone G., Kafatos M., Taylor P. Outgoing Long Wave Radiation Variability from IR Satellite Data Prior to Major Earthquakes // *Tectonophysics*. 2007. 431. P. 211-220.
68. Ouzounov D., Pulinets S., Romanov A., Romanov A., Tsybulya K., Davidenko D., Kafatos M., Taylor P. Atmosphere-ionosphere response to the M9 Tohoku earthquake revealed by multi-instrument space-borne and ground observations: Preliminary results // *Earthquake Science*. 2011. V. 24. 6. P. 557-564.
69. Petrovic A., Khan S.D., Chafetz H.S. Remote detection and geochemical studies for finding hydrocarbon-induced alterations in Lisbon Valley, Utah // *Marine and Petroleum Geology*. 2008. Vol. 25. 8. P. 696-705.
70. Quang Z., Xu X., Dian C. Thermal Infrared Anomaly–Precursors of Impending Earthquakes // *Chin. Sci. Bull.* 1991. 36. P. 319-323.
71. Rajesh H.M. Mapping Proterozoic unconformity-related uranium deposits in the Rockhole area, Northern Territory, Australia using Landsat ETM+ // *Ore Geology Reviews*. 2008. Vol. 33. 3-4. P. 382-396.
72. Rowan L.C., Mars J.C. Lithologic mapping in the Mountain Pass, California area using Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) data // *Remote Sensing of Environment*, 2003. Vol.84. 3. P. 350-366.
73. Rowan L.C., Simpson C.J., Mars J.C. Hyperspectral analysis of the ultramafic complex and adjacent lithologies at Mordor, NT, Australia // *Remote Sensing of Environment*. 2004. Vol. 91. 3-4. P. 419-431.
74. Ruitenbeek van F. J.A., Debba P., van der Meer F. D., Cudahy T., van der Meijde M., Hale M. Mapping white micas and their absorption wavelengths using hyperspectral band ratios // *Remote Sensing of Environment*. 2006. Vol. 102. 3-4. P. 211-222.
75. Sabins F.F. *Remote Sensing – Principles and Interpretation*, 3rd edn. // W.H. Freeman, New York. NY. 1997. 494 p.
76. Sabins F.F. Remote sensing for mineral exploration // *Ore Geology Reviews*, 1999. 14. P. 157–183.
77. Segall P. *Earthquake and Volcano Deformation*, Princeton University Press. 2010. 424 p.
78. Segall P., Davis J.L. GPS applications for geodynamics and earthquake studies // *Annual Reviews of Earth and Planetary Science*. 1997. 25. P. 301-36.
79. Spatz D.M., Wilson R.T. Exploration remote sensing for porphyry copper deposits, western America Cordillera // *Proceedings Tenth Thematic Conference on Geologic Remote Sensing*. Environmental Research Institute of Michigan. 1994. Ann Arbor, MI. P. 1227–1240.
80. Tobita M., Fujiwara S., Ozawa S., Rosen, P.A., Fielding E.J., Werner C.L., Murakami M., Nakagawa H., Nitta K., Murakami M. Deformation of the 1995 North Sakhalin earthquake detected by JERS-1/SAR interferometry // *Earth Planets Space*. 1998. 50. P. 313-325.
81. Tommaso I.D., Rubinstein N.N. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina // *Ore Geology Reviews*, 2007. Vol. 32. 1-2. P. 275-290.
82. Tramutoli V., Bello G.D., Pergola N., Piscitelli S. Robust satellite techniques for remote sensing of seismically active areas // *Ann. Geofis.* 2001. 44. P. 295-312.
83. Vaughan R.G., Calvin W.M., Taranik J.V. SEBASS hyperspectral thermal infrared data: surface emissivity measurement and mineral mapping // *Remote Sensing of Environment*. 2003. Vol. 85. 1. P. 48-63.



84. *Vaughan R.G., Hook S.J., Calvin W.M., Taranik J.V.* Surface mineral mapping at Steamboat Springs, Nevada, USA, with multi-wavelength thermal infrared images // *Remote Sensing of Environment*. 2005. Vol. 99. 1-2. P. 140-158.
85. *Wang L., Shum C. K., Simons F. J., Tapley B. and Dai C.* Coseismic and postseismic deformation of the 2011 Tohoku-Oki earthquake constrained by GRACE gravimetry // *Geophys. Res. Lett.* 2012. 39. L07301, doi:10.1029/2012GL051104.
86. *Watson K., Kruse F.A., Hummer-Miller S.* Thermal infrared exploration in the Carlin trend, northern Nevada // *Geophysics*. 1990. Vol. 55. P. 70–79.
87. *Xu D.Q., Ni G.Q., Jiang L.L., Shen Yu.T., Li T., Ge Sh.L., Shu X.B.* Exploring for natural gas using reflectance spectra of surface soils // *Advances in Space Research*. 2008. Vol. 41. 11. P. 1800-1817.
88. *Zhang X., Pazner M., Duke N.* Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south Chocolate Mountains (California) // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2007. Vol. 62. 4. P. 271-282.

## **Review of the Last Decade Major Achievements of Remote Sensing Methods Application on the Geological & Geophysical Problems Solution**

**V.I. Gornyy, A.A. Tronin**

*Scientific Research Centre for Ecological Safety, Russian Academy of Sciences  
18, Korpusnaya Str., Saint-Petersburg, 197110, Russia  
E-mail v.i.gornyy@mail.ru, a.a.tronin@ecosafety-spb.ru*

The analysis of results of remote sensing methods application on geological and geophysical problem solution, published during the last 10 years was carried out. The major attention was directed to geohazard, to regional geological investigations, to minerals and oil prospecting. The assessment of the modern state of remote sensing methods development was done.

**Keywords:** satellite, remote sensing methods, regional geological structure, geological mapping, prospecting, geohazard.