

Тенденции развития дистанционных методов при решении задач геологии и экологической безопасности

В. И. Горный¹, О. В. Бровкина², А. В. Киселев¹, А. А. Тронин¹

¹ Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, Санкт-Петербург, 197110, Россия
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru

² Институт исследования глобальных изменений Чешской академии наук
Брно, 60300, Чехия

В связи с проведением 14–18 ноября 2022 г. юбилейной 20-й Международной конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» появилась потребность в подведении итогов двадцатилетнего периода развития науки и техники в области применения дистанционных методов зондирования в геологии и экологической безопасности. Цель настоящего обзора заключается в анализе тенденций развития этого направления для концентрации усилий как научно-исследовательских, так и производственных организаций на наиболее перспективных, новых направлениях следующего десятилетия. Актуальность данного обзора определяется необходимостью подведения итогов наблюдавшегося в последние десятилетия бурного развития спутниковых методов дистанционного зондирования и появление в области экологической безопасности новых вызовов, связанных с глобальным потеплением климата. Отмечено, что существенный прогресс в начале XXI в. в анализируемых направлениях вызван введением в эксплуатацию таких новых методов дистанционного зондирования, как вариационная спутниковая гравиметрия, радиолокационная интерферометрия, спутниковая гиперспектральная съёмка. Возросло количество проектов и вышло на новый уровень применение современных методов дистанционного зондирования для определения характеристик небесных тел. Сделан вывод о том, что в области экологической безопасности дистанционное зондирование на современном этапе применяется для информационной поддержки системы принятия управленческих решений. Это накладывает следующие требования к результатам дистанционного зондирования: количественный характер, статистическое осреднение информации за определённый промежуток времени, возможность получения экономических оценок. Появились новые направления применения спутниковых методов дистанционного зондирования: спутниковый мониторинг биобезопасности, анализ влияния потепления климата и загрязнения атмосферного воздуха на здоровье населения и экосистем. В области геологии намечена тенденция комплексирования материалов дистанционного зондирования с материалами геофизических и геохимических съёмок. Всё шире применяются физические модели для геологического истолкования результатов дистанционного зондирования и определения параметров геологических тел. В заключение приведён прогноз развития методов дистанционного зондирования Земли из космоса в следующем десятилетии.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, геология, экологическая безопасность, развитие, тенденции, перспективные направления

Одобрена к печати: 31.03.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-9-38

Введение

Проведённые Институтом космических исследований РАН (ИКИ РАН) двадцать международных конференций «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», а также выпуск основанного ИКИ РАН в 2004 г. журнала «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» позволяют высветить тенденции в развитии дистанционных методов при решении задач геологии и экологической безопасности.

Основные моменты в развитии систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), определившие прогресс технологий ДЗЗ, были отмечены в пленарных докладах юбилейной конференции 2022 г. Прежде всего, это:

- создание и ввод в эксплуатацию множества цифровых измерительных съёмочных систем космического базирования, работающих во всех диапазонах спектра и различном пространственном разрешении;
- развитие новых методов ДЗЗ: спутниковой гравиметрии, радиолокационной интерферометрии, лидарных съёмок;
- рост и совершенствование систем и методов цифровой обработки материалов космических съёмок;
- накопление общедоступных многолетних архивов материалов космических съёмок и их подключение к сети Интернет;
- создание продуктов высокого уровня обработки, готовых к непосредственному применению при решении различных задач.

Цели обзора: иллюстрация того, как за последние 20 лет совершенствование технических систем привело к изменению методических приёмов и подходов применения спутниковых материалов ДЗЗ при решении задач геологии и экологической безопасности, а также выявление тенденций развития этого направления для концентрации усилий как научно-исследовательских, так и производственных организаций на наиболее перспективных, новых направлениях следующего десятилетия.

Новые методы ДЗЗ

Спутниковая вариационная гравиметрия

17 марта 2002 г. в рамках совместного проекта НАСА (Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства, *англ.* National Aeronautics and Space Administration — NASA) и Немецкого центра авиации и космонавтики (*нем.* Deutsches Zentrum für Luft — und Raumfahrt e.V.) по измерению поля силы тяжести Земли был выведен на орбиту тандем спутников GRACE (*англ.* Gravity Recovery And Climate Experiment), научные и практические результаты которого оказались весьма перспективными. Поэтому было принято решение о продолжении этой программы, и в 2018 г. были запущены спутники GRACE-FO (*англ.* GRACE Follow-On). Полное покрытие поверхности нашей планеты с пространственным разрешением около 250×250 км происходит в течение одного месяца. Стал возможным мониторинг пространственно-временных вариаций поля силы тяжести Земли. Основным фактором, определяющим высокочастотные вариации поля силы тяжести Земли с периодом более одного месяца, выступает количество влаги (жидкой и в виде пара), содержащейся на данной территории. Для удобства зарегистрированные изменения поля силы тяжести пересчитываются в толщину эквивалентного слоя влаги (ТЭСВ)*. Среднеквадратическая погрешность картографирования ТЭСВ по результатам месячного цикла измерений в зависимости от широты исследуемого региона, а также региональных климатических факторов и объёма выпавших осадков составляет менее 2,0 см (Landerer, Swenson, 2012; Swenson, Wahr, 2006; <http://dx.doi.org/10.5067/TELND-NC005>).

Исследования, выполненные за последние 20 лет, показали, что применение материалов съёмок спутниками GRACE эффективно при картировании влагозапаса крупных речных бассейнов, прогнозировании засух и наводнений (Зотов и др., 2016; Киселев и др., 2015, 2016), мониторинге изменений покровных ледников в Антарктиде, Гренландии, горных ледников в Гималаях и на Аляске, вызванных потеплением климата (Киселев и др., 2015, 2016; Chen et al., 2006; Moholdt et al., 2012) (*рис. 1*, см. с. 11). Кроме того, быстрые подвижки тектонических плит при крупных землетрясениях также вызывают регистрируемые спутниками изменения поля силы тяжести (Михайлов и др., 2014, 2016; Panet et al., 2010). При этом становится возможным сопоставление зарегистрированных спутниками GRACE изменений поля

* Под ТЭСВ понимается толщина плоско-параллельного слоя воды, вызывающего изменение поля силы тяжести Земли, равное наблюдаемому.

силы тяжести Земли с результатами моделирования деформаций, выполненного с использованием наземных данных. Это позволяет отбраковать часть моделей (Михайлов и др., 2014). Мониторинг спутниками GRACE эпицентров крупных землетрясений выявил возрастание гравитационного поля после сейсмического события (Михайлов и др., 2016). Авторы связали этот эффект с интенсивными постсейсмическими деформациями в областях, превосходящих по размерам очаговую зону землетрясения.

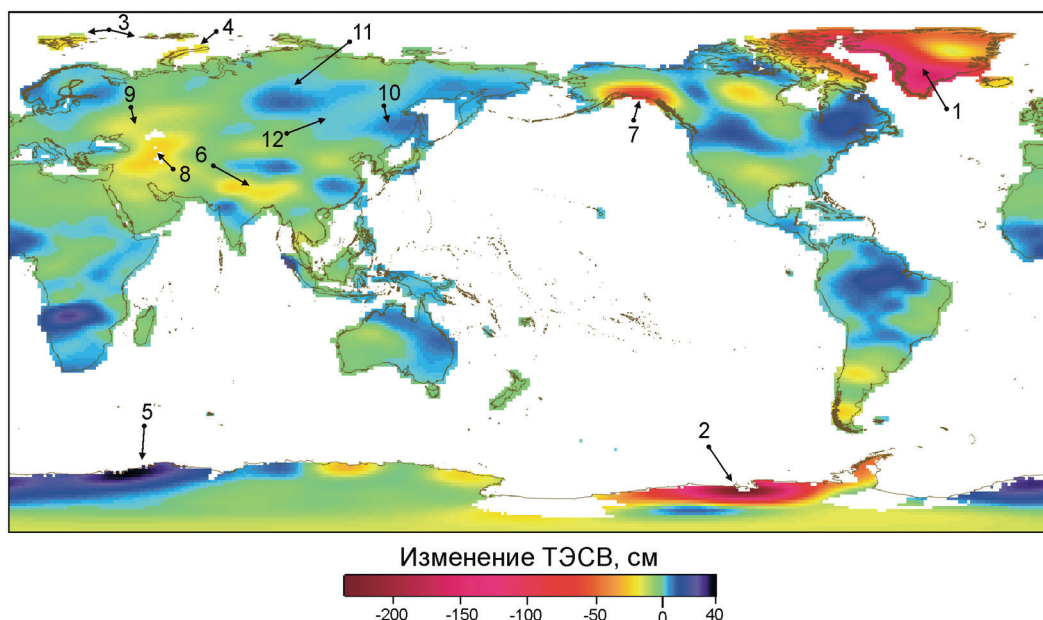


Рис. 1. Карта-схема тенденций изменения ТЭСВ за период с 2002 по 2015 г. по материалам съёмок спутниками GRACE (Киселев и др., 2016). 1–4 — области деградации покровных ледников; 5 — область накопления массы ледяного покрова; 6, 7 — области деградации горных ледников в Гималаях и на Аляске; 8, 9 — территории снижения влагозапаса на Ближнем востоке, юге европейской части России; 10, 11 — области повышения влагозапаса и возрастания риска паводков

Регистрируются и вариации поля силы тяжести, вызванные более длительными геологическими процессами, например постледниковым поднятием Балтийского щита со скоростью до ~9 мм/год (Steffen et al., 2009).

Столь разнообразное применение спутниковой гравиметрии за последние 20 лет указывает на чрезвычайную эффективность этого нового спутникового метода. Представляется, что в следующем десятилетии спутниковая гравиметрия может стать рутинным методом ДЗЗ в задачах мониторинга влагозапаса сельскохозяйственных земель и прироста биомассы (Gegu et al., 2015a, b). Возможно, что появятся исследования, направленные на использование этого метода в задачах прогнозирования сейсмических событий.

Необходимо отметить, что у спутниковой гравиметрии есть и существенный недостаток — низкое пространственное разрешение. Поэтому одним из новых направлений могут быть исследования, направленные на повышение пространственного разрешения этого метода.

Спутниковая радиолокационная интерферометрия

Первые же результаты применения спутниковой радиолокационной интерферометрии (РЛИ) для картирования деформаций дневной поверхности после землетрясения 1992 г. в Калифорнии (магнитуда 7,3) продемонстрировали чрезвычайные перспективы этого нового метода, зарегистрировавшего смещения линии разрыва порядка 6 м (рис. 2, см. с. 12) (Massonne et al., 1993). Для реализации этого метода используется когерентный (голографический)

радиолокатор, регистрирующий пространственное распределение амплитуды и фазы отражённого сигнала. Поэтому данный метод можно рассматривать как один из вариантов голографии. В варианте радиолокационной дифференциальной интерферометрии (РЛДИ) строится пространственное распределение разности фаз отражённых сигналов, полученных с некоторым временным интервалом. Если изменение расстояния до спутника превышает длину волны радиолокатора, то выполняется восстановление полной фазы отражённого радиолокационного сигнала, пересчитываемое в изменение расстояния до отражающей поверхности.

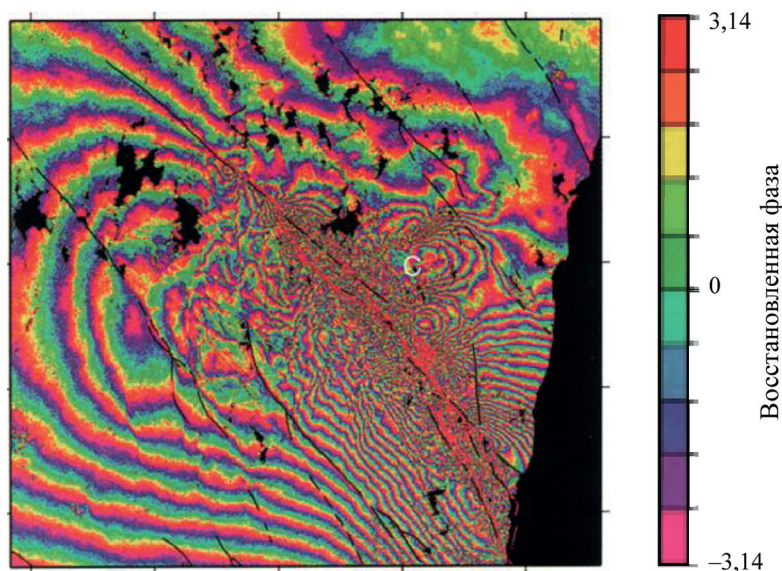


Рис. 2. Дифференциальная радиолокационная интерферограмма землетрясения в Ландерсе (англ. Landers) 1992 г., Калифорния (Peltzer et al., 1994)

В более сложном варианте в спутниковой радиолокационной интерферометрии по постоянным/устойчивым отражателям (англ. persistent/permanent scatterers) (РЛИ ПО) обрабатывается большое количество разновременных радиолокационных сцен, на которых выделяются отражатели, дающие постоянный интенсивный отражённый сигнал на всех используемых сценах, и по ним определяются смещения подстилающей поверхности. В методе РЛИ ПО при росте числа использованных сцен снижаются погрешности изменений высот подстилающей поверхности, которые могут не превышать первых миллиметров (Горный и др., 2010). Для снижения погрешностей картирования деформаций подстилающих поверхностей (например, при мониторинге оползней) и для повышения надёжности измерений используются угловые отражатели (Zakharov et al., 2018). Применяются и более сложные системы, такие как активные отражатели — транспондеры (англ. transponders) (Mahapatra et al., 2014).

За последние 20 лет РЛИ применялась для картирования как деформаций подстилающей поверхности, вызванных природными факторами, так и деформаций, имеющих техногенную природу.

В рамках мониторинга деформаций, вызванных природными факторами, продолжалось применение РЛДИ и РЛИ ПО для мониторинга последствий землетрясений (Михайлов и др., 2018, 2022; Тимошкина и др., 2022). По данным РЛДИ строились модели поверхности разрыва, оценивалась выделенная при сейсмическом событии энергия. Таким образом, применение РЛИ позволило получать количественную информацию о параметрах сейсмических событий и на основе сравнения с данными сейсмологических источников уточнять модели землетрясений.

Экономически важным направлением применения РЛИ ПО стал мониторинг опасных для сохранности зданий и сооружений деформаций, возникающих под действием различных

природных процессов. В районах, благоприятных для формирования оползней, РЛИ позволяет строить карты-схемы оползневой опасности и получать достоверную информацию о рисках разрушения зданий и сооружений (Захарова, Захаров, 2019; Смольянинова и др., 2022; Lee et al., 2017; Xun et al., 2022). Появились исследования, направленные на применение РЛИ для обнаружения и мониторинга динамики карстовых явлений (Bruckno et al., 2015; Pambudi, Napira, 2020). Всё больший интерес вызывает применение РЛИ в криолитозоне для мониторинга оседания дневной поверхности под влиянием деградации многолетней мерзлоты (Виноградов и др., 2018; Захаров и др., 2020; Мусихин, Лысков, 2012). На участках сложного строения верхней части геологического разреза под действием сезонных изменений уровня грунтовых вод в зданиях и сооружениях могут возникать знакопеременные вертикальные колебания, надёжно регистрирующиеся РЛИ ПО (Горный и др., 2010, 2014а; Дагуров и др., 2016). Поэтому проведение спутникового мониторинга знакопеременных движений может позволить выбрать наиболее безопасные для строительства новых зданий и сооружений участки на территориях со сложным геологическим строением.

Наиболее распространённым применением РЛИ для мониторинга деформаций поверхности, вызванных техногенными причинами, представляется мониторинг провалов над подземными горными выработками. Классическим примером такого использования в России служит район Соликамска, где в течение длительного времени в подземных выработках добывались калийные соли. Наземными геодезическими измерениями и результатами применения РЛИ показано, что скорость деформации дневной поверхности в Соликамске достигает 300 мм/год (Бабаянц и др., 2021; Гневанов, Шамин, 2012; Михайлов и др., 2019). При этом различие между результатами геодезических измерений и данными РЛИ невелики, что указывает на высокую достоверность спутниковых измерений и их экономическую эффективность при длительном мониторинге деформаций дневной поверхности в пределах всего горнодобывающего региона. РЛИ оказалась эффективной при картировании деформаций не только в районах подземной добычи солей и угля (Gueguen et al., 2008), но и на нефтегазовых месторождениях. Например, на Комсомольском газовом месторождении (Западная Сибирь) наземными геодезическими измерениями и РЛДИ картированы оседания поверхности со скоростью, превышающей 100 мм/год (Васильев и др., 2018). На нефтяном месторождении Lost Hill (Калифорния, США) по амплитуде оседания дневной поверхности, зарегистрированной РЛДИ, была оценена годовая добыча нефти (Xu et al., 2001).

Развитие методов РЛИ в различных областях науки и народного хозяйства позволяет предположить, что в следующих десятилетиях этот новый метод ДЗЗ широко войдёт в практику горного дела, городского хозяйства, прогнозирования чрезвычайных ситуаций и станет одним из важных инструментов обеспечения экологической безопасности населения. Представляется, что особенно широко в ближайшие десятилетия РЛИ будет применяться в Арктике для мониторинга угроз разрушения зданий и сооружений, вызванных деградацией многолетней мерзлоты под влиянием потепления климата. Этому способствует открытие архивов Европейского космического агентства (*англ.* European Space Agency, ESA), хранящих материалы радиолокационных съёмки спутниками Sentinel-1A и -1B. ([https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/\(archive\)/0](https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/(archive)/0)). Но уже сейчас можно утверждать, что спутниковая РЛИ становится наиболее экономически востребованным практическим приложением голографии.

Спектрометрия

Последние десятилетия характеризуются бурным развитием спектрометрических методов дистанционного зондирования. Основной задачей спектрометрии в дистанционных методах представляется восстановление вещественного состава земной поверхности и атмосферы. Развитие шло в направлении повышения спектрального и пространственного разрешения аппаратуры, динамического диапазона, освоения теплового диапазона электромагнитного спектра. Высокое спектральное разрешение современных приборов позволило ввести термин

«гиперспектральная съёмка». Так, для прибора Hyperion (спутник EO-1, *англ.* Earth Observing) ширина спектральных каналов составила 10 нм при 12-битном квантовании сигнала и разрешении на местности в 30 м, а атмосферный спектрометр TROPOMI (*англ.* TROPospheric Ozone-Monitoring Instrument) (спутник Sentinel-5P) имеет спектральное разрешение 0,25 нм при 14-битном квантовании. Столь высокое спектральное разрешение достигнуто ценой снижения пространственного разрешения до 7 км. Совершенно особой задачей для конструкторов приборов стала проблема стабильности спектральных каналов. Потребовалась разработка методики атмосферной коррекции на совершенно новом уровне. Так, для гиперспектрометра Hyperion был разработан специальный прибор для коррекции атмосферы ALI (*англ.* Advanced Land Imager). Следует отметить и спектрорадиометр ASTER (*англ.* Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) (спутник Terra), который открыл направление многоспектральных съёмок в тепловом диапазоне 8–12 мкм. Известно (Плюснина, 1976), что ряд минералов (кварц, гипс, известняк и др.) имеют спектральные особенности в тепловом инфракрасном диапазоне спектра (*рис. 3*). Это позволило применять материалы съёмки спектрорадиометром ASTER в рамках поисковых работ для картирования гидротермально-метасоматических окolorудных изменений горных пород (Горный и др., 2014б).

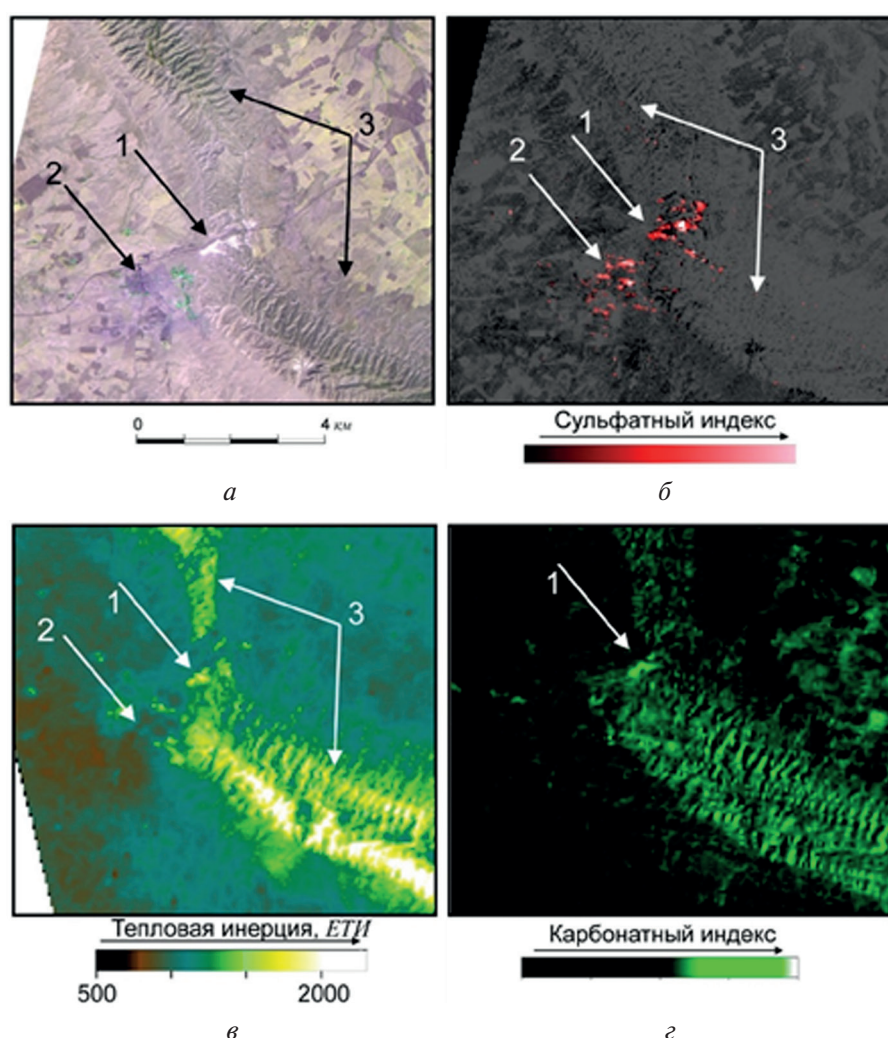


Рис. 3. Выявление загрязнения почв сульфатами при добыче гипса и известняка открытым способом в районе г. Махмур (*англ.* Makhmour), Ирак: *а* — цветовой композит, видимый диапазон (ASTER); *б* — карта сульфатного индекса (ASTER); *в* — карта тепловой инерции (Landsat TM (*англ.* Thematic Mapper), ASTER); *г* — карта карбонатного индекса (ASTER). Условные обозначения: 1 — карьер; 2 — сульфатное загрязнение почвы в районе г. Махмур; 3 — гряда Джабал Кварц Чанг (*англ.* Jabal Quarch Chang), сложенная карбонатами

Развитие технических средств ДЗЗ привело к созданию компанией ITRES Research Ltd. (Канада) авиационного гиперспектрального сканера TASI-600 (*англ.* Thermal Hyperspectral Imaging Sensor) (https://www.photonics.com/Products/TASI-600_Thermal_Hyperspectral_Imaging_Sensor/pr28860), имеющего 64 спектральных канала в диапазоне 8–11,5 мкм. Применение в авиационном варианте TASI-600 позволило распознать в г. Брно (Чехия) асбестоцементные крыши на фоне металлических и черепичных. Асбестоцементная кровля представляет угрозу для здоровья населения при вдыхании волокон асбеста, что снижает уровень экологической безопасности.

Спектрометрические наблюдения за атмосферой позволили проводить глобальный мониторинг широкого круга малых газовых компонентов, среди которых важнейшими считаются диоксиды азота и серы, оксид углерода, а также аэрозоль. Несколько особняком стоят наблюдения за диоксидом углерода.

Анализ распределения в атмосфере диоксида азота показал, что современные приборы дистанционного зондирования позволяют осуществлять как глобальный, так и региональный долговременный мониторинг содержания NO_2 в атмосфере.

Полученные данные выявили явную антропогенную природу аномалий диоксида азота и, как результат, неравномерное распределение газа в атмосфере Земли. Контрастность аномалий достигает двух порядков. По интенсивности аномалий, их площади можно ранжировать источники этого токсиканта на городские и промышленные агломерации, районы добычи и переработки углеводородного сырья, в первую очередь угля. В городских агломерациях выявлена зависимость содержания диоксида азота от числа автомобилей (Тронин и др., 2009).

Последние тенденции говорят о сближении двух направлений в спутниковой спектроскопии: анализа газового состава атмосферы и анализа минерального состава подстилающей поверхности. Прибор EMIT (*англ.* Earth Surface Mineral Dust Source Investigation), установленный на Международной космической станции 14 июля 2022 г., представляет собой спектрометр с пространственным разрешением на местности 60 м, спектральным диапазоном 380–2500 нм и имеет спектральное разрешение 7,4 нм.

Инструмент EMIT предназначен в первую очередь для изучения минерального состава пыли. Тем не менее он оказался способен картировать с высоким пространственным разрешением в атмосфере выбросы метана (*рис. 4*), что указывает на ещё одну тенденцию в развитии спутниковой спектроскопии — появление универсальных приборов с рекордными спектральными и пространственными характеристиками.

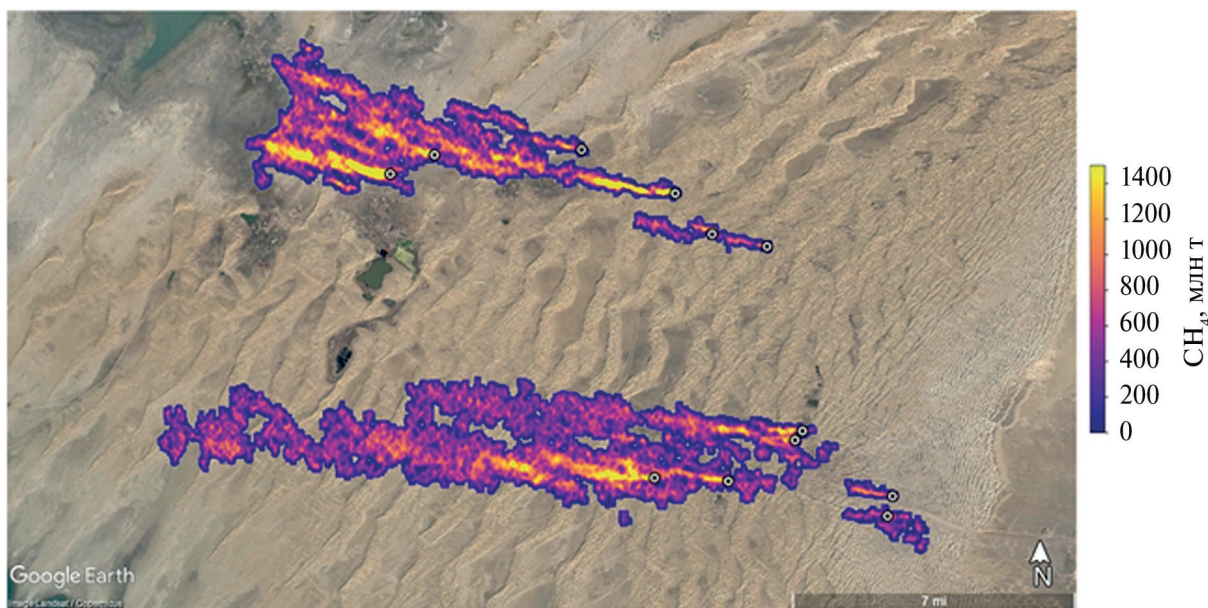


Рис. 4. Выбросы метана от скважин на п-ове Челекен, Туркмения (<https://www.nasa.gov/feature/jpl/methane-super-emitters-mapped-by-nasa-s-new-earth-space-mission>)

Методы анализа спутниковых данных

Формализованные методы анализа материалов ДЗЗ

На первом этапе применения материалов спутниковых съёмок при решении задач геологии и экологической безопасности анализ информации выполнялся методом визуального дешифрирования. Основные недостатки этого подхода — трудность количественной оценки достоверности результатов и значительная зависимость их от опыта специалиста-дешифровщика. Поэтому начал применяться подход выделения с известной достоверностью аномальных (в статистическом смысле) областей, например лесных экосистем, подвергшихся техногенному воздействию (Краснощеков и др., 2022).

С появлением мультиспектральных и гиперспектральных сканирующих съёмочных систем возникла принципиально нерешаемая в рамках визуального дешифрирования проблема сравнения множества изображений. Известно, что человеческий мозг не может без существенных ошибок сравнивать одновременно более двух изображений, т.е. не способен эффективно работать в многозадачном режиме. Поэтому потребовалась разработка формализованных методов анализа материалов спутниковых съёмок.

Простейшими методами анализа спутниковых материалов, полученных многоканальными системами, оказались расчёты различных индексов, характеризующих состояние экосистем (Калабин и др., 2013, 2014, 2016; Саворский и др., 2016; Achten et al., 2008; Brown et al., 2000; Handbook..., 2005; Kamran, Khorram, 2022; Kondratyev et al., 1974; Sellers, 1985; Stenberg et al., 2004; Tucker, 1979) или наличие тех или иных минералов в обнажениях в пределах «открытых» (свободных от растительности) территорий (Горный, 2004; Горный и др., 2014; Тронин и др., 2011), что позволило в комплексе с методами классификации использовать спутниковые материалы при геологическом картировании и поисках месторождений полезных ископаемых (Горный и др., 2014б; Кирсанов и др., 2021).

Создание доступных через сеть Интернет обширных архивов материалов спутниковых съёмок потребовало разработки методов анализа временных рядов дистанционно измеренных характеристик подстилающей поверхности. Так, на основе анализа суточных вариаций температуры подстилающей поверхности разработаны методики картирования тепловой инерции, скорости испарения и теплового потока, которые оказались эффективными как при решении геологических задач (Горный, 2004; Горный и др., 2009), так и задач экологической безопасности населения городов (Горный и др., 2017, 2020). Разложение с помощью полиномов Чебышёва временных рядов, отражающих сезонные вариации нормализованного вегетационного индекса, позволило зарегистрировать влияние техногенной нагрузки на фазы растительности (Крицук и др., 2013).

Анализ многолетних трендов дистанционно измеренных характеристик подстилающей поверхности потребовал нового инструментария. Во-первых, возникла необходимость в выравнивании в пределах исследуемых территорий гистограмм пространственного распределения дистанционно измеренных характеристик, зарегистрированных в различное время. Для этого потребовались изощрённые методы анализа, в том числе и перекрёстная проверка (Корниенко, 2022). Это позволило в условиях арктической тундры п-ова Ямал (Западная Сибирь) выявить «тонкую» спектральную реакцию тундровых экосистем на техногенное воздействие со стороны газовых промыслов. Кроме того, появилась необходимость сопровождать картосхемы трендов картосхемами p -критерия и коэффициента вариации (Горный и др., 2021), а при построении графиков трендов сопровождать их доверительными интервалами. Это позволило на количественном уровне оценивать достоверность полученных значений трендов на различных участках карт-схем и судить о стабильности техногенных факторов, определяющих, например, изменение нагрева подстилающей поверхности (Манвелова и др., 2022).

Следует отметить появление публикаций, использующих для анализа материалов ДЗЗ подходы, разработанные в теории информации (Крицук и др., 2016; Li, 1990).

Для оценки здоровья экосистем по данным ДЗЗ переломным этапом стало создание теоретических основ термодинамики экосистем (Jorgensen, Svirezhev, 2004). Было показано, что скорость испарения влаги с подстилающей поверхности выступает мерой реакции экосистемы на внешнее воздействие (Горный и др., 2011, 2013, 2019; Gornyy et al., 2010). На этой основе был предложен термодинамический индекс нарушенности экосистем (Горный и др., 2019), позволивший строить карты ущербов лесным экосистемам от накопленного экологического ущерба (Горный и др., 2019). Ещё одним направлением применения положений термодинамики экосистем становятся методики, основанные на картировании поглощённой растительностью эксергии солнечного излучения (Пузаченко и др., 2014; Puzachenko et al., 2013). В указанных работах с применением многоспектральных материалов спутниковых съёмок исследовались особенности преобразования растительным покровом солнечной энергии в эксергию и оценивались возможности опознавания различных элементов экосистем на основе спутникового картирования термодинамических характеристик подстилающей поверхности.

В последние годы появилось ещё одно новое направление в методах обработки материалов ДЗЗ — анализ материалов с применением искусственного интеллекта. Публикации (Колесников, 2022; Курганович и др., 2021) показывают перспективность этого направления. В качестве примера можно привести опознавание на крупномасштабных аэроснимках пихт, поражённых уссурийским полиграфом (см. работы (Марков и др., 2020; Керчев и др., 2021)).

Таким образом, при решении задач геологии и экологической безопасности методы обработки материалов спутниковых съёмок за последние 20 лет развивались в направлении применения формализованных методов извлечения с известной достоверностью количественной информации о характеристиках подстилающей поверхности, необходимых для информационной поддержки системы принятия управленческих решений.

Комплексирование спутниковых материалов с результатами геофизических и геохимических съёмок

Преимущество дистанционного зондирования при решении геологических задач — высокое пространственное разрешение, что определяет возможность выявления и анализа закономерностей распределения тектонических нарушений. В последние десятилетия всё шире применяются методики автоматизированного дешифрирования линеаментов (протяжённые элементы изображений, которые могут индизировать тектонические нарушения) и кольцевых структур (Златопольский, 2011, 2012; Крицук, Латыпов, 2019; Zlatopolsky, 1997). Тем не менее опознавание разломов на фоне множества линеаментов, сформированных другими причинами, наиболее надёжно выполняется комплексированием с геофизическими материалами, например сейсморазведкой. Это позволяет строить трёхмерные модели исследуемой территории (Глубинное..., 2001; Горный и др., 2012), выявлять открытые разломы, по которым происходит вынос эндогенного тепла флюидами (Горный и др., 2016б) (рис. 5, см. с. 18), и, как отмечено выше, подтвердить гипотезу происхождения алмазов (Карпов и др., 1998; Горный и др., 2006).

Комплексирование результатов спектрометрической съёмки, позволяющей получать информацию о наличии минералов — индикаторов окolorудных изменений, с материалами геохимической съёмки, характеризующими содержание в почве различных химических элементов, повышает достоверность прогнозирования рудных тел (Кирсанов и др., 2021).

Модели при анализе материалов ДЗЗ

Появление вслед за концепцией тектоники плит представлений о тектонике плюмов, опирающейся на результаты математического моделирования мантийной конвекции, позволило предложить качественную модель формирования палеопозиций мантийных плюмов и «горячих точек» и сформулировать признаки суперрегиональных наложенных геологических структур, которые следует искать на спутниковых материалах ДЗЗ (Горный 2005; Gornyy, 2002).

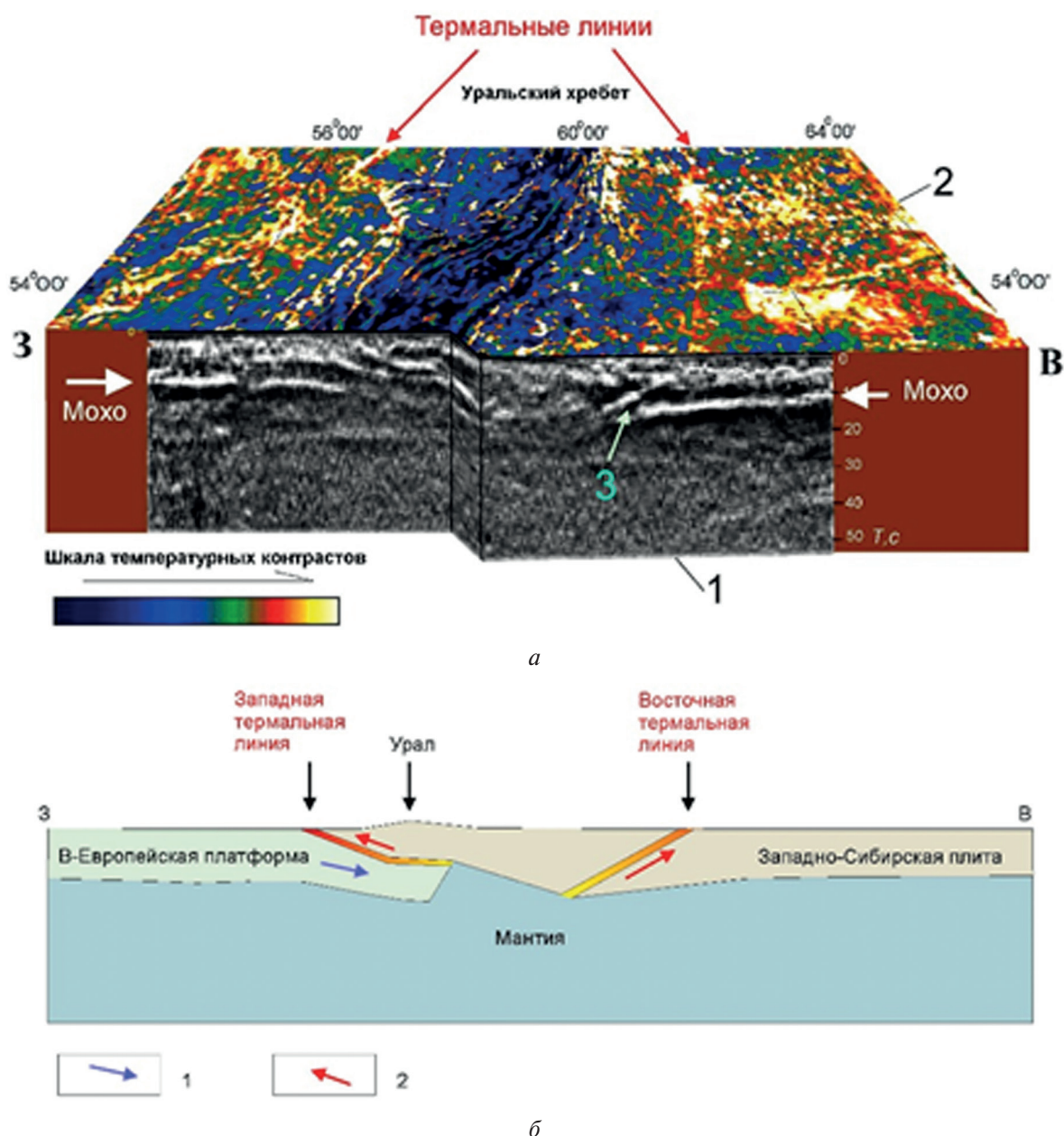


Рис. 5. Блок-диаграмма территории Южного Урала (а). Тектоническая интерпретация вдоль глубинного профиля Уралсейс (б). 1 — направление движения Восточно-Европейской платформы; 2 — направление движения подземных флюидов (Горный и др., 2016)

В результате на материалах съёмки спутниками NOAA (англ. National Oceanic and Atmospheric Administration — Национальное управление океанических и атмосферных исследований, США) (AVHRR — англ. Advanced Very-High-Resolution Radiometer), в цифровых моделях рельефа дневной поверхности и данных гравиметрии были выявлены цепочки региональных овальных структур, индицирующих палеопозиции «горячих точек» (Gornyi, 2002), и проанализирована их минерагеническая значимость (Горный 2005). Этот пример показал эффективность применения даже качественных моделей геологических структур при анализе материалов ДЗЗ. Такой же подход был реализован при разработке методики поисков медно-порфировых месторождений. При этом была использована разработанная И. Г. Павловой качественная модель порфировой рудно-магматической системы, позволившая понять особенности отражения околорудных изменений горных пород в материалах спутниковой спектрометрии (Горный и др., 2014б; Павлова, 1983).

Метод аналогий и физическая модель формирования структур после ядерного взрыва вместе с материалами спутниковых съёмок и сейсморазведки были использованы при выявлении природы формирования коренных месторождений алмазов на примере Мирнинского кимберлитового поля (Якутия) (Горный и др., 2006).

Следующим этапом стало построение погребённых трёхмерных геологических структур путём обработки материалов стереоскопической съёмки сверхвысокого разрешения спутников Pleiades (Горный и др., 2016a). В открытом регионе, где на материалах ДЗЗ отчётливо проявляются выходы пластов на дневную поверхность, с помощью специального программного обеспечения были измерены десятки тысяч элементов залегания пластов осадочных пород, а уже по ним построена трёхмерная модель синклиналей и разделяющая их антиклиналь (рис. 6). Такая информация может быть полезной при предварительной оценке перспектив нахождения нефтегазовых залежей и для выбора оптимального положения сейсморазведочного профиля.

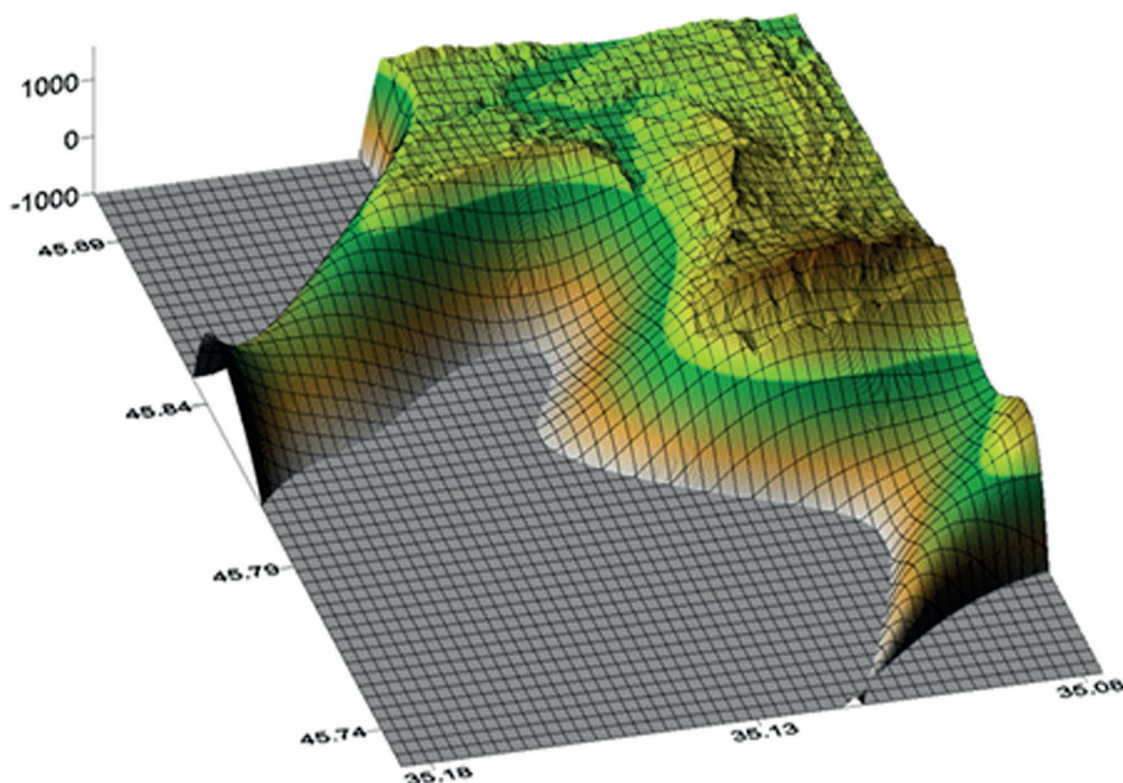


Рис. 6. Модель складчатой структуры (Ирак), построенная по результатам измерений элементов залегания пластов путём обработки стереоскопических спутниковых изображений, полученных съёмочной системой сверхвысокого разрешения (Горный и др., 2016a)

Хорошим примером использования материалов ДЗЗ для валидации и уточнения физической модели остывания излитого влк. Толбачек (Камчатка) лавового потока служит применение спутниковой радиолокационной интерферометрии (Волкова, Михайлов, 2022). Сравнение динамики наблюдаемых опусканий поверхности лавового потока с результатами моделирования позволило авторам сделать вывод, что «аномально-высокие опускания могут быть вызваны другими процессами, такими как обрушение полостей в отложениях лавы» (Волкова, Михайлов, 2022). Такой же подход в применении математических моделей для объяснения наблюдаемых дистанционными методами явлений применён при поисках воды на Марсе (Edwards, Piqueux, 2016). На материалах тепловой съёмки поверхности Марса замечены в кратерах изменения температуры, которые на основе математического моделирования тепловой инерции марсианских покровов соотнесли с повышением содержания влаги.

Моделирование деформаций дневной поверхности позволило истолковать выявленный спутниковой РЛИ ПО эффект неравномерных знакопеременных вертикальных движений дневной поверхности в районах со сложным геологическим строением верхней части разреза, что вызывает знакопеременные усталостные напряжения в зданиях и сооружениях с последующим их разрушением (Горный и др., 2014а).

Необходимо также отметить следующие важные для практики направления комплексирования ДЗЗ с результатами математического моделирования динамики атмосферы: мониторинг атмосферного переноса продуктов вулканических извержений (Гирина и др., 2020), позволивший повысить безопасность полётов в северной части Тихого океана; оценка влияния выбросов тепловых электростанций Эстонии и их трансграничного переноса на экосистемы западной части Ленинградской обл. (Манвелова и др., 2022).

Вершиной применения математического моделирования в ДЗЗ выступает включение моделей в алгоритм обработки материалов ДЗЗ для определения количественных характеристик объектов мониторинга на основе обращения этих моделей. К этому направлению относятся построение карт тепловой инерции, скорости испарения, теплового потока по материалам многократной спутниковой съёмки (Горный, 2004; Горный и др., 2017) и определение содержания газов в атмосфере по данным спектральных измерений (van Geffen et al., 2022).

Новые направления применения спутникового мониторинга

Измерительный спутниковый мониторинг биопасностей

Роль дистанционных методов при мониторинге биопасностей может быть весьма существенной. В первую очередь это касается проблемы регистрации изменений характеристик экосистем — как биотических, так и абиотических, связанных с изменением климата. Климатические изменения приводят к изменениям условий обитания животных и растений, смене экосистем, иногда резкой. Применение спутниковых методов при контроле биопасностей можно разделить на три направления: опасности, угрожающие человеку — в первую очередь инфекционные заболевания, опасности для сельского хозяйства и опасности для лесных экосистем (Тронин, 2013; Тронин и др., 2008).

Дистанционные методы применяются для изучения ареалов переносчиков трансмиссивных заболеваний человека, возбудителями которых являются паразиты, вирусы и бактерии. Переносчиками могут быть самые разные животные, но очень часто это членистоногие и мелкие грызуны. И те и другие сильно зависят от состояния экосистем: температуры и влажности, биопродуктивности. Спутниковые данные радиометра MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) комплексировались с наземными данными для составления карты количественного риска заболевания боррелиозом на территорию Канады с разрешением в 1 км (Kotchi et al., 2021). Значительный объём исследований для определения риска заражения холерой выполнен с использованием спутниковых данных о цвете и температуре океана (Rasault et al., 2019). Проведено множество работ по применению дистанционных методов для определения мест размножения комаров как переносчиков таких опасных заболеваний, как малярия, конго-крымская геморрагическая лихорадка и др. (Дубянский и др., 2022; Rasault et al., 2019).

Ярким примером применения дистанционных методов для контроля сельскохозяйственных биопасностей служат разработки измерительной методики спутникового картирования численности саранчовых на юге Западной Сибири (Горный и др., 2008; Gornyy et al., 2006). Методика основана на комплексировании материалов спутниковой съёмки с результатами наземного учёта численности итальянского пруса на статистически представительном количестве ключевых участков размером 1×1 км (не менее 30). Апробирован подход для прогнозирования вспышек численности саранчовых на юге Западной Сибири на примере распространённого в этом регионе вида саранчи — итальянского пруса (Тронин и др., 2014). Специалисты из Республики Казахстан разрабатывают направление, основанное на предпочтении саранчовыми определённых экосистем, которые картируются с использованием ма-

териалов спутниковых съёмок и формализованных методов распознавания (Малахов и др., 2018; Муратова и др., 2012; Цычуева и др., 2017).

Важность мониторинга состояния лесных экосистем подчёркивается вниманием к контролю вредителей леса спутниковыми методами (Исаев и др., 2004; Селиховкин, Смирнов, 2015). Выполняются работы по применению спутниковых методов для картирования лесов, повреждённых сибирским шелкопрядом, короедом-типографом. Применение средств дистанционного зондирования в сочетании с данными наземных и авиационных наблюдений могут использоваться для своевременного обнаружения очагов массового размножения насекомых на начальных стадиях развития, оценки степени повреждения лесов.

В связи с потеплением климата актуальной задачей экологической безопасности становится обнаружение массового размножения сине-зелёных водорослей в водоёмах. Водоросли генерируют опасные нейротоксины и гепатотоксины, что представляет угрозу водоснабжению и рекреационным зонам. Разработаны модели оценки времени и величины массового размножения сине-зелёных водорослей на основе дистанционных методов (Mishra et al., 2019).

Полученные в области спутникового мониторинга биоопасностей научные результаты позволяют надеяться, что в ближайшем будущем это направление спутникового мониторинга войдёт в практику ряда отраслей.

Информационная поддержка принятия управленческих решений в области экологической безопасности

В настоящее время результаты обработки материалов спутниковых съёмок стали использоваться в качестве информационной поддержки системы принятия управленческих решений, направленных на повышение уровня экологической безопасности населения.

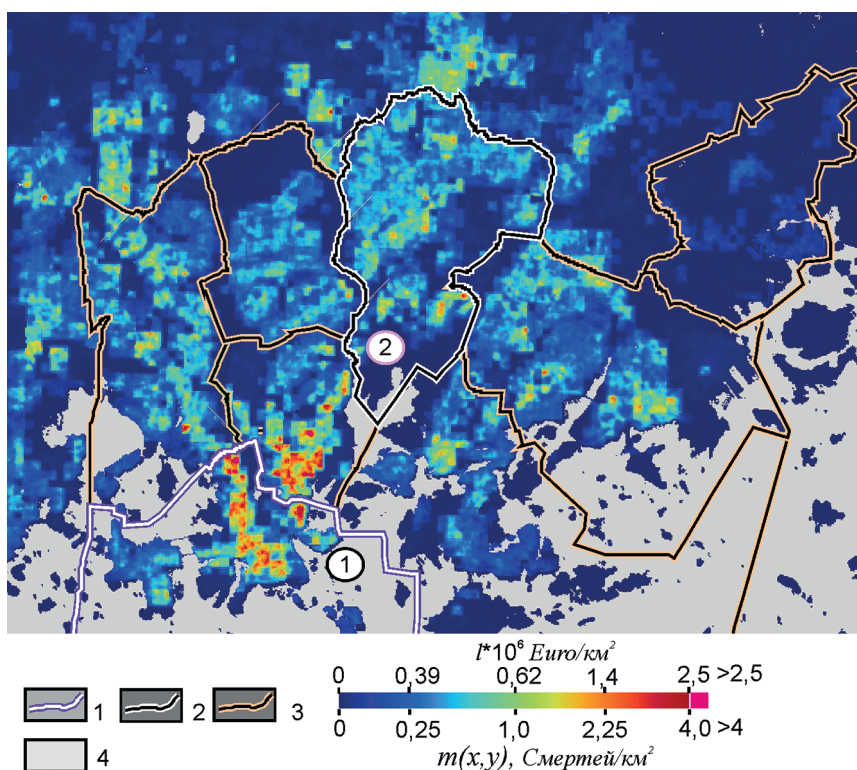


Рис. 7. Цифровая карта потенциального количества смертей и экономического ущерба от перегрева городской среды г. Хельсинки. 1 — граница центрального района (англ. Southern Major District); 2 — граница Северо-Восточного района (англ. North-Eastern Major District); 3 — границы других главных районов; 4 — акватории (Горный и др., 20226)

Например, появилась необходимость ранжирования территорий по уровню экологической безопасности населения (Тронин, 2019). Для этого требуется знание как рисков (вероятностей) реализации негативных событий, влияющих на здоровье населения и экосистем, так и потенциального ущерба (математического ожидания, т. е. статистически усреднённых величин), вызванных реализацией экологических угроз. Но этому препятствует один из недостатков спутниковых съёмок систем оптического диапазона спектра — невозможность получения непрерывных временных рядов дистанционно измеренных характеристик подстилающей поверхности из-за облачности или в условиях полярной ночи и, следовательно, невозможность построения только по спутниковым материалам достоверного статистического распределения, необходимого для оценки рисков. Поэтому предложена методика комплексирования эпизодических материалов ДЗЗ, покрывающих исследуемую территорию, с полными временными рядами количественных характеристик, наблюдаемых на наземных метеостанциях или постах наблюдений. Метод реализуем, если удастся показать линейную связь между характеристиками, измеренными дистанционно в данной точке местности (пикселе) и полученными на метеостанции. С помощью этой методики построены карты риска нагрева поверхности городской среды выше температуры размягчения битума (Крицук и др., 2013) и карты температуры воздуха на высоте 2 м над поверхностью в г. Апатиты (Мурманская обл.) в условиях полярной ночи (Kritsuk et al., 2022). Дальнейшее применение данной методики позволило построить карты риска (вероятности) нагрева воздуха выше температуры минимальной смертности (Горный и др., 2022а; Крицук и др., 2019) и карты ущерба экономике города от преждевременной смертности населения, вызванной перегревом городской среды (Горный и др., 2022б) (рис. 7, см. с. 21).

Беспилотные аппараты ДЗЗ

В последние годы для выполнения различных видов аэросъёмок, в том числе и для верификации материалов космических съёмок, начали применяться беспилотные летательные аппараты. Появление этого вида ДЗЗ обусловлено достижениями в миниатюризации технических средств ДЗЗ. Например, если полная масса отечественного серийного одноканального авиационного тепловизора «Малахит» в комплекте с цифровым регистратором составляла 27 кг (Тронин, Шилин, 2008), то тепловизоры, устанавливаемые на беспилотные летательные аппараты, имеют массу в первые сотни грамм (<https://www.capitalhobbies.com/catalog/aksessuary/fpv-oborudovanie/teplovizor-flir-vue-pro/>). Появление беспилотных съёмочных систем, имеющих цифровую регистрацию данных и координатную привязку, позволяет создавать ортофотопланы высокого пространственного разрешения и наиболее экономично решать задачи городского хозяйства, энергетики, экологической безопасности, геологической съёмки. Особенно полезны такие системы при проведении экспедиционных работ на удалённых территориях, например в Арктике, где выполнение обычных аэросъёмок стало практически невозможным из-за их высокой стоимости (Богданов, Бекетова, 2019), или на Дальнем Востоке России (Марков и др., 2020).

Необходимо также отметить появление и использование на беспилотных летающих аппаратах малогабаритных сканирующих лазерных систем (*англ.* airborne laser scanning — ALS), что привело к революционным достижениям в подготовке трёхмерных цифровых моделей рельефа подстилающей поверхности, рельефа морского дна, характеристик растительного покрова (FLIS — *англ.* Flying Laboratory of Imaging Systems, CzechGlobe, <https://olc.czechglobe.cz/flis/>), зданий и сооружений. Картирование лесной биомассы необходимо для развития устойчивого лесопользования и лучшего понимания вклада различных лесных экосистем в глобальный углеродный цикл. Применение бортовых лазерных сканеров позволило оценивать лесную биомассу с достоверностью, сравнимой с данными лесной инвентаризации (Brovkina et al., 2022; Melville et al., 2015; Noordermeer et al., 2019; Novotný et al., 2021).

В горном деле применение этих систем может обеспечить мониторинг объёмов добычи полезных ископаемых в карьерах и угольных разрезах, соблюдение требований техники безопасности при складировании вскрышных пород в терриконах и отвалах (Padró et al., 2019).

Представляется, что в связи с высокой экономической эффективностью в ближайшем будущем беспилотные летательные аппараты займут достойное место в таком виде методов ДЗЗ, как аэросъёмка. Поэтому существующие технологии аэросъёмочных работ целесообразно в ускоренном порядке целенаправленно адаптировать к применению на беспилотных летательных аппаратах.

Заключение

Главные тенденции

Обобщая результаты анализа публикаций в области геологии и экологической безопасности, можно отметить следующие основные тенденции в развитии методов ДЗЗ:

- Применяется всё более изощрённый формализованный инструментарий для оценки достоверности результатов и при анализе материалов ДЗЗ: выравнивание гистограмм разновременных материалов ДЗЗ, перекрёстная проверка; опознавание объектов по их статистическим или информационным характеристикам; применение искусственного интеллекта. Намечился переход от восстановления по данным ДЗЗ простых индексов к более сложным задачам, например от картирования вегетационного индекса к мониторингу динамики продуктивности экосистем.
- Используется комплексирование с материалами геофизических и геохимических съёмок.
- Возросло использование моделей объектов, явлений и процессов при анализе материалов ДЗЗ, для повышения надёжности системы доказательств, для решения обратных задач.
- Значительно повысился интерес к изучению строения и характеристик небесных тел. Возросло количество проектов и вышло на новый уровень применение современных методов дистанционного зондирования для изучения строения и определения характеристик небесных тел на основе физических моделей и комплексирования различных методов дистанционного зондирования (спектрометрического метода, использующего видимый и инфракрасный тепловой диапазоны спектра, радиолокационного подповерхностного зондирования).
- В области экологической безопасности дистанционное зондирование на современном этапе рассматривается уже как элемент информационной поддержки системы принятия управленческих решений. Это определило следующие требования к результатам дистанционного зондирования: количественный характер, осреднение информации на статистически значимом промежутке времени, объектный подход, возможность получения экономических оценок.
- Появились новые направления и системы применения ДЗЗ для их реализации, такие как спутниковый мониторинг биоопасностей, спутниковый мониторинг влияния потепления климата и загрязнения атмосферного воздуха на здоровье населения и экосистем, отраслевые информационные системы, созданные ИКИ РАН.

Общие моменты, определившие тенденции, следующие: упрощение доступа к архивам материалов спутниковых съёмок; создание информационных систем, позволяющих пользователям без специальной подготовки решать практические задачи геологии и экологической безопасности.

Прогноз развития

Выявленные тенденции позволяют дать следующий прогноз развития методов ДЗЗ:

- Рост автоматизации процессов космического мониторинга объектов подстилающей поверхности и загрязнения атмосферы, направленного на анализ динамики физических и химических свойств объектов. Автоматизация включает в себя целый комплекс

процессов регистрации, коррекции, калибровки, интеркалибровки, нормализации данных, решения обратных задач, представления результатов.

- Следует ожидать создания отраслевой информационной системы поддержки принятия управленческих решений по обеспечению экологической безопасности населения страны.
- Наблюдающаяся в последние десятилетия аномально высокая скорость потепления в Арктике позволяет прогнозировать ускорение процесса деградации многолетней мерзлоты. Вследствие этого в следующие десятилетия мониторинг деформаций дневной поверхности, зданий и линейных сооружений приобретёт особую значимость. В результате возрастёт роль спутниковой радиолокационной интерферометрии в мониторинге последствий деградации многолетней мерзлоты. Поэтому в целях информационной безопасности России должны быть созданы отечественные системы радиолокационной спутниковой интерферометрии (мелкомасштабная для регионального мониторинга деградации зоны многолетней мерзлоты и система высокого пространственного разрешения для мониторинга деформаций зданий и сооружений). Для максимальной отдачи этого проекта для экономики России должен быть обеспечен открытый доступ к материалам съёмки данными системами.
- Следует ожидать рост применения беспилотных летательных аппаратов для получения крупномасштабных материалов ДЗЗ и при верификации результатов спутникового мониторинга, что требует целенаправленной ускоренной адаптации аэросъёмочных технологий для их использования на беспилотных летательных аппаратах.

Литература

1. Бабаянц И. П., Барях А. А., Волкова М. С., Михайлов В. О., Тимошкина Е. П., Хайретдинов С. А. Мониторинг оседаний на территории г. Березники (Пермский край) методами спутниковой радарной интерферометрии. I. Дифференциальная интерферометрия // Геофиз. исслед. 2021. Т. 22. № 4. С. 73–89. <https://doi.org/10.21455/gr2021.4-5>.
2. Богданов К. В., Бекетова Е. Б. Применение беспилотных летательных аппаратов в геолого-геофизической разведке месторождений полезных ископаемых // Будущее Арктики начинается здесь: сб. материалов Всероссийской научно-практ. конф. с международ. участием. Апатиты: Изд-во Мурманского арктич. гос. ун-та, филиал в г. Апатиты, 2019. С. 67–79.
3. Васильев Ю. В., Мисюрев Д. А., Филатов А. В. Техногенное влияние разработки Комсомольского месторождения на современные деформационные процессы // Нефть и газ. № 2. 2018. С. 11–20. DOI: 10.31660/0445-0108-2018-2-11-20.
4. Виноградов А. Н., Елизаветин И. В., Куршев Е. П., Парамонов С. В., Белов С. А. Анализ применимости методов дифференциальной интерферометрии для задач геотехнического мониторинга Арктической зоны // Программные системы: теория и приложения. 2018. Т. 9. № 4(39). С. 461–475. DOI: 10.25209/2079-3316-2018-9-4-461-475.
5. Волкова М. С., Михайлов В. О. Модель оседания поверхности пирокластического потока: вулкан Шивелуч (Камчатка), извержение 29.08.2019 г. // Геофиз. исслед. 2022. Т. 23. № 2. С. 73–85. <https://doi.org/10.21455/gr2022.2-5>.
6. Гирина О. А., Мельников Д. В., Маневич А. Г., Лупян Е. А., Крамарева Л. С. Характеристика событий эксплозивного извержения вулкана Безымянный 15 марта 2019 г. по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 102–114. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-102-114.
7. Глубинное строение и геодинамика Южного Урала (проект Уралсейс): моногр. / ред. А. Ф. Морозов. Тверь: Изд-во ГЕРС, 2001. 286 с.
8. Гневанов И. В., Шамин П. В. Оценка деформаций земной поверхности горных отводов ОАО «Уралкалий» в г. Березники методами радарной интерферометрии // Геоматика. 2012. № 1. С. 56–60. <https://sovzond.ru/upload/iblock/212/212d08b8d90670bc2e94334eaf8f3825.pdf>.
9. Горный В. И. Космические измерительные методы инфракрасного теплового диапазона при мониторинге потенциально опасных явлений и объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Т. 1. № 1. С. 10–16. <http://www.iki.rssi.ru/earth/trudi/0-01.pdf>.
10. 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. 182–187. <http://www.iki.rssi.ru/earth/trudi/0-01.pdf>.

11. 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. <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-vol2-225-241.pdf>.
12. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Теплякова Т. Е., Тронин А. А. Измерительная технология спутникового мониторинга саранчовых // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 2. С. 469–476. http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_pdf/2/64.pdf.
13. 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. http://d33.infospace.ru/d33_conf/2009,2/36-45.pdf.
14. 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. http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2010t2/321-332.pdf.
15. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш. Термодинамический подход для дистанционного картографирования нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 179–194. http://d33.infospace.ru/d33_conf/2011v8n2/179-194.pdf.
16. Горный В. И., Attar 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 съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 305–312. http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2012t1/305-312.pdf.
17. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Храмцов В. Н. Верификация крупномасштабных карт термодинамического индекса нарушенности экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 4. С. 201–212. http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2013t4/201-212.pdf.
18. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Оловянный А. Г., Петров С. Д., Тронин А. А. (2014а) О механизме знакопеременных вертикальных движений поверхности городской среды (по результатам спутниковой радиолокационной интерферометрии) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 129–139. http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2014t3/129-139.pdf.
19. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А. (2014б) Особенности минералогической зональности рудно-магматических систем, вмещающих кварцево-жильные месторождения золота (по материалам спутниковой спектроскопии) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 140–156. http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2014t3/140-156.pdf.
20. Горный В. И., Киселев А. В., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А. (2016а) Восстановление рельефа погребенных структур по элементам залегания пластов, измеренным на цифровых спутниковых материалах сверхвысокого геометрического разрешения // 14-я Всероссийская открытая конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»: сб. тез. М., 2016. С. 310. <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5687>.
21. Горный В. И., Селезнев Г. А., Тронин А. А. (2016б) Применение тепловой космической съемки для поисков слаботермальных вод // Разведка и охрана недр. 2016. № 1. С. 49–57.
22. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А., Киселев А. В., Бровкина О. В., Филиппович В. Е., Станкевич С. А., Лубский Н. С. Теплофизические свойства поверхности городской среды (по результатам спутниковых съемок Санкт-Петербурга и Киева) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 51–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-51-66.
23. Горный В. И., Киселев А. В., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А. Термодинамический подход к спутниковому картированию накопленного экологического ущерба лесных экосистем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 124–136. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-124-136.
24. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А. Прогноз температуры поверхности городской среды Санкт-Петербурга на основе спутникового картирования теплофизических свойств // Всероссийская науч. конф. с международ. участием «Земля и космос» к столетию акад. РАН К. Я. Кондратьева: сб. ст. 2020. С. 14–21.
25. Горный В. И., Киселев А. В., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А. Спутниковое картирование тепловой реакции подстилающей поверхности Северной Евразии на изменение климата

- // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 6. С. 155–164. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-155-164.
26. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Манвелова А. Б., Тронин А. А. (2022а) Спутниковое картирование риска перегрева городского воздуха (на примере г. Хельсинки, Финляндия) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 23–34. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-23-34.
27. Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш., Тронин А. А. (2022б) Спутниковое картирование экономического ущерба от смертей городского населения, вызванных перегревом (на примере г. Хельсинки, Финляндия) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 35–46. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-35-46.
28. Дагуров П. Н., Дмитриев А. В., Добрынин С. И., Захаров А. И., Чимиторжиев Т. Н. Радиолокационная интерферометрия сезонных деформаций почвы и фазовая модель обратного рассеяния микроволн двухслойной средой с шероховатыми границами // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 7. С. 585–591. DOI: 10.15372/AOO20160709.
29. Дубянский В. М., Прислегина Д. А., Платонов А. Е. Прогнозирование заболеваемости Крымской геморрагической лихорадкой на основе данных спутникового мониторинга (дистанционного зондирования Земли из космоса) на примере Ставропольского края // Журн. микробиологии, эпидемиологии и иммунобиологии. 2022. Т. 99. № 3. С. 322–335. DOI: 10.36233/0372-9311-213.
30. Захаров А. И., Захарова Л. Н., Митник Л. М. Мониторинг стабильности топливных резервуаров Норильской ТЭЦ-3 методами радарной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 281–288. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-281-285.
31. Захарова Л. Н., Захаров А. И. Наблюдение динамики зоны оползня на реке Бурья по данным интерферометрической съёмки Sentinel-1 в 2017–2018 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 273–277. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-273-277.
32. Златопольский А. А. Новые возможности технологии LESSA и анализ цифровой модели рельефа. Методический аспект // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 38–46. http://d33.infospace.ru/d33_conf/2011v8n3/38-46.pdf.
33. Златопольский А. А. Мультимасштабный анализ ориентации текстуры поверхности Земли. Особые масштабы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 26–37. http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2013t2/295-304.pdf.
34. Зотов Л. В., Фролова Н. Л., Шам С. К. Гравитационные аномалии в бассейнах крупных рек России // Природа. 2016. № 5. С. 3–8. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_26135337_90113351.pdf.
35. Исаев А. С., Ершов Д. В., Лупян Е. А., Кобельков М. Е. Особенности организации спутникового мониторинга массового размножения вредных насекомых в лесах Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Т. 1. № 1. С. 164–174. <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=20>.
36. Калабин Г. В., Моисеенко Т. И., Горный В. И., Крицук С. Г., Соромотин А. В. Спутниковый мониторинг реакции растительного покрова на воздействие предприятия по освоению золоторудного месторождения «Олимпиада», отрабатываемого открытым способом // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 1. С. 177–184. <https://www.sibran.ru/upload/iblock/ca0/ca0e138ae5cd7b9ade8e453de194a5a7.pdf>.
37. Калабин Г. В., Горный В. И., Крицук С. Г. Спутниковый мониторинг реакции растительного покрова на воздействие предприятия по освоению Сорского медно-молибденового месторождения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 1. С. 153–161. <https://www.sibran.ru/upload/iblock/acd/acd142fd72791bbdba102e1ce7c52851.pdf>.
38. Калабин Г. В., Горный В. И., Крицук С. Г. Оценка состояния окружающей среды территории Качканарского ГОКа по данным спутникового мониторинга // Физико-техн. проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 2. С. 179–187. <https://www.sibran.ru/upload/iblock/d37/d37f3ff7a749724d32511f9cded81219.pdf>.
39. Карпов И. К., Зубков В. С., Бычинский В. А., Артименко М. В. Детонация тяжелых углеводородов в мантийных потоках // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 6. С. 754–762.
40. Керчев И. А., Маслов К. А., Марков Н. Г., Токарева О. С. Семантическая сегментация повреждённых деревьев пихты на снимках с беспилотных летательных аппаратов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 116–126. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-116-126.
41. Кирсанов А. А., Смирнов М. Ю., Липияйнен К. Л., Кирсанов Г. А. Новый метод выявления околорудных гидротермально измененных пород по космическим гиперспектральным данным на примере Ломамского потенциально золоторудного района, Республика Саха (Якутия) // Регион. геология и металлогения. 2021. № 86. С. 97–106. DOI: 10.52349/0869-7892_2021_86_97-106.

42. Киселев А. В., Муратова Н. Р., Горный В. И., Тронин А. А. Связь запасов продуктивной влаги в почве с полем силы тяжести Земли (по данным съемок спутниками GRACE) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 7–16. http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2015t6/7-16.pdf.
43. Киселев А. В., Горный В. И., Крицук С. Г., Тронин А. А. Индикация опасных природных явлений вариациями гравитационного поля Земли (по данным спутниковых съемок системой GRACE) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 6. С. 13–28. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-13-28.
44. Колесников А. А. Анализ методов и средств искусственного интеллекта для анализа и интерпретации данных активного дистанционного зондирования // Вестн. Сибирского гос. ун-та геосистем и технологий. 2022. Т. 27. № 3. С. 74–94. DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-3-74-94.
45. Корниенко С. Г. Характеристика антропогенных трансформаций ландшафтов в районе Бованенковского месторождения по данным спутников Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 106–129. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-106-129.
46. Краснощеков К. В., Дергунов А. В., Пономарева Т. В. Геопространственный анализ техногенно-нарушенных экосистем Средней Сибири по спутниковым данным в ИК-диапазоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 203–216. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-203-216.
47. Крицук С. Г., Латыпов И. Ш. Линеamentный анализ данных MODIS и возможности интерпретации его результатов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 45–53. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-45-53.
48. Крицук С. Г., Горный В. И., Калабин Г. В., Латыпов И. Ш. Закономерности сезонных циклов вегетационного индекса экосистем в районе Сорского горно-металлургического комплекса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 228–237. http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2013t1/228-237.pdf.
49. Крицук С. Г., Горный В. И., Латыпов И. Ш. Повышение детальности спутникового картографирования теплофизических характеристик земной поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 277–290. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-277-290.
50. Крицук С. Г., Горный В. И., Латыпов И. Ш., Павловский А. А., Тронин А. А. Спутниковое картирование риска перегрева поверхности городской среды (на примере Санкт-Петербурга) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 34–44. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-34-44.
51. Курганович К. А., Шаликовский А. В., Босов М. А., Кочев Д. В. Применение алгоритмов искусственного интеллекта для контроля паводкоопасных территорий // Водное хоз-во России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 3. С. 6–24. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-3-1.
52. Малахов Д. В., Цычуева Н. Ю., Камбулин В. Е. Экологическое моделирование условий размножения перелетной саранчи (*Locusta migratoria* L.) в Юго-Восточном Казахстане // Russian J. Ecosystem Ecology. 2018. Т. 3. № 10. С. 1–14. DOI: 10.21685/2500-0578-2018-1-5.
53. Манвелова А. Б., Киселев А. В., Неробелов Г. М., Седеева М. С., Махура А. Г., Петухов В. В., Дроздова И. В., Горный В. И. Многолетние изменения дистанционно измеренных характеристик экосистем бассейна реки Луги как реакция на техногенное воздействие // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 40–56. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-40-56.
54. Марков Н. Г., Маслов К. А., Керчев И. А., Токарева О. С. Сверточная нейронная сеть для сегментации пораженных деревьев пихты на снимках с беспилотных летательных аппаратов // Регион. проблемы дистанц. зондирования Земли: материалы 7-й Междунар. науч. конф. Красноярск, 29 сент. – 2 окт. 2020 / науч. ред. Е. А. Ваганов; отв. ред. Г. М. Цибульский. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2020. С. 102–105.
55. Михайлов В. О., Panet I., Haun M., Тимошкина Е. П., Bonvalot S., Ляховский В. Сравнительный анализ временных вариаций глобального гравитационного поля по данным спутников Грейс в областях трех недавних гигантских землетрясений // Физика Земли. 2014. № 2. С. 29–40. DOI: 10.7868/S0002333714020069.
56. Михайлов В. О., Диаман М., Любушин А. А., Тимошкина Е. П., Хайретдинов С. А. Крупномасштабный сейсмический крип в областях сильных землетрясений по данным спутников Грейс о временных вариациях гравитационного поля // Физика Земли. 2016. № 5. С. 70–81. DOI: 10.7868/S0002333716040050.
57. Михайлов В. О., Киселева Е. А., Тимошкина Е. П., Смирнов В. Б., Пономарев А. В., Дмитриев П. Н., Карташов И. М., Хайретдинов С. А., Арора К., Чадда Р., Шринагеш Д. Совместная интерпретация наземных и спутниковых данных для землетрясения Горха, Непал, 25.04.2015 // Современные

- проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 119–127. DOI: 10.21046/2070–7401-2018-15-4-119-127.
58. Михайлов В. О., Киселева Е. А., Барях А. А., Исаев Ю. С., Смольянинова Е. И. Возможности мониторинга динамики развития оседаний земной поверхности на территории г. Березники по снимкам спутника Сентинель // 11-я Всероссийская школа-семинар с международ. участием «Физические основы прогнозирования разрушения горных пород»: тез. докл. Пермь: ГоИ УрО РАН, 2019. С. 35–36.
59. Михайлов В. О., Тимофеева В. А., Волкова М. С. Модель поверхности разрыва Южно-Озерновского землетрясения 29.03.2017 по данным спутниковой радарной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 143–152. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-143-152.
60. Муратова Н. Р., Цычуева Н. Ю., Камбулин В. Е. Космический мониторинг мест обитания азиатской саранчи в Казахстане // Косм. исслед. и технологии. 2012. № 3. С. 20–26. https://epizodyspace.ru/bibl/kosmicheskie_issledovaniya_i_tehnologii/2012/3/kiit2012-4.pdf.
61. Мусихин В. В., Лысков И. А. Применение радарной интерферометрии для определения деформаций трубопроводных систем в условиях тундры // Вестн. Пермского нац. исслед. политехн. ун-та. Геология. Нефтегазовое дело. 2012. № 4. С. 103–110.
62. Павлова И. Г. Геолого-генетические модели молибденовых порфировых месторождений // Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т. 1. Новосибирск: Наука, 1983. С. 127–135.
63. Плюснина И. И. Инфракрасные спектры минералов. М.: МГУ, 1976. 175 с.
64. Пузаченко Ю. Г., Сандлерский Р. Б., Кренке А. Н., Пузаченко Ю. М. Мультиспектральная дистанционная информация в исследовании лесов // Лесоведение. 2014. № 5. С. 13–29.
65. Саворский В. П., Кашицкий А. В., Константинова А. М., Балашов И. В., Крашенинникова Ю. С., Толпин В. А., Маклаков С. М., Савченко Е. В. Возможности анализа гиперспектральных индексов в информационных системах дистанционного мониторинга семейства «Созвездие-Вега» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 28–45. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-28-45.
66. Селиховкин А. В., Смирнов А. П. Лесные пожары, вредители и болезни леса: проблемы и решения // Биосфера. 2015. № 3. С. 315–320. <https://cyberleninka.ru/article/n/lesnye-pozhary-vrediteli-i-bolezni-lesa-problemy-i-resheniya> (дата обращения: 30.01.2023).
67. Смольянинова Е. И., Михайлов В. О., Дмитриев П. Н. Интерактивная карта активных оползневых участков и зон проседания грунтов для Центрального и Адлерского районов большого Сочи по данным спутниковой радарной интерферометрии за 2015–2021 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 141–149. DOI: 10.21046/2070–7401-2022-19-4-141-149.
68. Тимошкина Е. П., Михайлов В. О., Смирнов В. Б., Волкова М. С., Хайретдинов С. А. Модель поверхности разрыва Хубсугульского землетрясения 12.01.2021 по данным спутниковой РСА интерферометрии // Физика Земли. 2022. № 1. С. 83–89. DOI: 10.31857/S0002333722010094.
69. Тронин А. А. Дистанционные методы при решении задач экологической безопасности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 238–245. http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2013t1/238-245.pdf.
70. Тронин А. А. Ранжирование регионов России по уровню экологической безопасности // Регион. экология. 2019. № 1(55). С. 5–12.
71. Тронин А. А., Шилин Б. В. Мониторинг шлейфов городских очистных сооружений Санкт-Петербурга аэрокосмической тепловой съёмкой // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 586–594. http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_pdf/2/79.pdf.
72. Тронин А. А., Токарев Н. К., Антыкова Л. П., Теплякова Т. Е., Крицук С. Г. Дистанционные методы при исследованиях иксодовых клещей-переносчиков природноочаговых инфекций // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: сб. науч. ст. М.: ООО «Азбука-2000», 2008. Вып. 5. Т. 2. С. 376–381. http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_pdf/2/51.pdf.
73. Тронин А. А., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш. Диоксид азота в воздушном бассейне России по спутниковым данным // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: сб. науч. ст. М.: ООО «Азбука-2000», 2009. Вып. 6. Т. 2. С. 217–223. http://d33.infospace.ru/d33_conf/2009,2/217-223.pdf.
74. Тронин А. А., Горный В. И., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш. Спектральные методы дистанционного зондирования в геологии. Обзор // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 23–36. http://d33.infospace.ru/d33_conf/2011v8n4/23-36.pdf.

75. Тронин А. А., Горный В. И., Киселев А. В., Крицук С. Г., Латыпов И. Ш. Прогнозирование вспышек саранчовых на основе материалов спутниковых съемок // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 4. С. 137–150. http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2014t4/137%E2%80%9393150.pdf.
76. Цычуева Н. Ю., Муратова Н. Р., Малахов Д. Б., Камбулин Б. Е., Айсарова А. Космический мониторинг условий гнездования саранчовых вредителей в Казахстане с 2000 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 137–148. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-137-148.
77. Achten W. M. J., Mathijs E., Muys B. Proposing a life cycle land use impact calculation methodology // Proc. 6th Intern. Conf. LCA in the Agri-Food Sector. Zurich, 12–14 Nov. 2008. P. 22–33. <https://www.nature.com/articles/npre.2009.2340.3>.
78. Brovkina O., Novotný J., Navrátilová B., Hanuš J. Forest aboveground biomass assessment using an area-based approach. Technical documentation of the verified technology, with description of the technology, and testing method / Global Change Research Institute CAS. Brno, 2022. 44 p. https://www.czechglobe.cz/wp-content/uploads/2023/01/Verified_technology_AGB_Eng.pdf.
79. Brown L., Chen J. M., Leblanc S. G., Cihlar J. A shortwave infrared modification to the simple ratio for LAI retrieval in boreal forests: An image and model analysis // Remote Sensing of Environment. 2000. No. 71. P. 16–25. http://faculty.geog.utoronto.ca/Chen/Chen's%20homepage/assets/article/Shortwave_IR_modificatn.pdf.
80. Bruckno B. S., Hoppe E., Vaccari A., Acton S. T., Campbell E. Integration and delivery of Interferometric Synthetic Aperture Radar [INSAR] data into stormwater planning within karst terranes // Proc. 14th Multidisciplinary Conf. Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. Rochester, Minnesota, 5–9 Oct. 2015. P. 371–380. DOI: 10.5038/9780991000951.1020.
81. Chen J. L., Tapley B. D., Wilson C. R. Alaskan mountain glacial melting observed by satellite gravimetry // Earth and Planetary Science Letters. 2006. V. 248. P. 368–378. DOI: 10.1002/Grl.50552.
82. Edwards C. S., Piqueux S. The water content of recurring slope lines on Mars // Geophysical Research Letters. 2016. V. 43. P. 8912–8919. DOI: 10.1002/2016GL070179.
83. Geruo A., Velicogna I., Kimball J. S., Kim Y. (2015a) Impact of changes in GRACE derived terrestrial water storage on vegetation growth in Eurasia // Environmental Research Letters. 2015. V. 10. Art. No. 124024. DOI: 10.1088/1748-9326/10/12/124024.
84. Geruo A., Velicogna I., Kimball J. S., Du J., Kim Y., Njoku E. (2015b) Satellite-observed changes in vegetation sensitivities to surface soil moisture and total water storage variations since the 2011 Texas drought // Environmental Research Letters. 2015. V. 10. Art. No. 124024. DOI: 10.1088/1748-9326/10/12/124024.
85. Gornyi V. I. The Mantle Convection and the Drift of Euro-Asian Plate (According the Remote Geothermal Method Data) // Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS). Toronto, Canada, 24–28 June. 2002. V. 4. P. 2029–2035. DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1026435.
86. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. S., Teplyakova T. E., Tronin A. A. Quantitative Approach for Satellite Monitoring of Locust Mass Breeding Areas // Intern. Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives: Proc. ISPRS Commission VII Symp. “Remote Sensing: From Pixels to Processes”. Enschede, The Netherlands, 8–11 May 2006. Hannover, Germany: ISPRS, 2006. <https://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/part7/PDF/091.pdf>.
87. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh. Remote mapping of thermodynamic index of ecosystem health disturbance // J. Environmental Protection. 2010. V. 1. No. 3. P. 242–250. DOI: 10.4236/jep.2010.13029.
88. Gueguen Y., Al Heib M., Deffontaines B., Fruneau B., de Michele M., Raucoules D., Guise Y. The interferometry technics applied on residual subsidence analysis measurement of closure coal mines, example from Nord-Pas-de Calais coal mine, France // Symp. Post-Mining 2008. Nancy, France, 2008. Art. No. ineris-00973294. 4 p. <http://hal-ineris.ccsd.cnrs.fr/ineris-00973294>.
89. Handbook of Ecological Indicators for Assessment of Ecosystem Health / eds. Jorgensen S. E., Costanza R., Xu F. L. Taylor and Frances, 2005. 126 p. https://archive.epa.gov/solec/web/pdf/ecological_indicators.pdf.
90. Kamran Kh. V., Khorram B. A fuzzy multi-criteria decision-making approach for the assessment of forest health applying hyper spectral imageries: A case study from Ramsar forest, North of Iran // Intern. J. Engineering and Geosciences. 2022. V. 7(3). P. 214–220. <https://doi.org/10.26833/ijeg.940166>.
91. Kondratyev K. Ya., Buznikov A. A., Vasilyev O. B., Sevastyanov V. I. Results of spectrophotometric measurements of natural formations from the spacecraft “Soyuz-9” and investigations of environment from space // Remote Sensing of Environment. 1974. V. 3. Iss. 1. P. 15–27.
92. Kotchi S. O., Bouchard C., Brazeau S., Ogden N. H. Earth observation-informed risk maps of the Lyme disease vector ixodes scapularis in Central and Eastern Canada // Remote Sensing. 2021. V. 13(3). Art. No. 524. DOI: 10.3390/rs13030524.
93. Kritsuk S., Gornyy V., Davidan T., Latypov I., Manvelova A., Tronin A., Vasiliev M., Konstantinov P., Varentsov M. Satellite mapping of air temperature under polar night conditions // Geo-Spatial Information Science. 2022. P. 325–336. <https://doi.org/10.1080/10095020.2021.2003166>.

94. *Landerer F. W., Swenson S. C.* Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates // *Water Resources Research*. 2012. V. 48. Iss. 4. Art. No. W04531. 11 p. DOI: 10.1029/2011WR011453.
95. *Lee Ch.-F., Liu J.-K., Singhroy V., Li J.* Using high-resolution D-InSAR derived from RADARSAT-2 images to monitor regional landslide activity and sediment transportation in mountainous area — a case study in northern Taiwan // *ICEO and SI Conf. Yilan, Taiwan*, 25–27 June, 2017.
96. *Li W.* Mutual information functions versus correlation functions // *J. Statistical Physics*. 1990. V. 60. Iss. 5–6. P. 823–837. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01025996>.
97. *Mahapatra P. S., Samiei-Esfahany S., van der Marel H., Hanssen R. F.* On the use of transponders as coherent radar targets for SAR interferometry // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2014. V. 52(3). P. 1869–1878. DOI: 10.1109/TGRS.2013.2255881.
98. *Massonne D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K., Rabaute T.* The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry // *Nature*. 1993. V. 364. P. 138–142. https://earth-jay.com/earthquakes/19920628_landers/massonnet_etal_1993_insar_landers.pdf.
99. *Melville G., Stone C., Turner R.* Application of LiDAR data to maximize the efficiency of inventory plots in softwood plantations // *New Zealand J. Forestry Science*. 2015. V. 45. Art. No. 9. <https://doi.org/10.1186/s40490-015-0038-7>.
100. *Mishra S., Stumpf R. P., Schaeffe B. A. P., Werdell J., Loftin K. A., Meredith A.* Measurement of cyanobacterial bloom magnitude using satellite remote sensing // *Scientific Reports*. 2019. V. 9(1). Art. No. 18310. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54453-y>.
101. *Moholdt G., Wouters B., Gardner A. S.* Recent mass changes of glaciers in the Russian High Arctic // *Geophysical Research Letters*. 2012. V. 39. Art. No. L10502. DOI: 10.1029/2012GL051466.
102. *Noordermeer L., Bollandsås O. M., Ørka H. O., Næsset E., Gobakken T.* Comparing the accuracies of forest attributes predicted from airborne laser scanning and digital aerial photogrammetry in operational forest inventories // *Remote Sensing of Environment*. 2019. V. 226. P. 26–37. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.027>.
103. *Padró J.-C., Carabassa V., Balagué J., Brotons J. B. L., Alcañiz J. M., Pons X.* Monitoring opencast mine restorations using Unmanned Aerial System (UAS) imagery // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 657. P. 1602–1614. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.156.
104. *Pambudi R. A., Haripta R. I.* DInSAR based land deformation detection in the karst landscape of Gunung Sewu // *E3S Web Conf.* 2020. V. 202. Art. No. 04003. 8 p. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020204003>.
105. *Panet I., Pollitz F., Mikhailov V., Diamant M., Banerjee P., Grijalva K.* Upper mantle rheology from GRACE and GPS postseismic deformation after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2010. V. 11. No. 6. Art. No. Q06008. DOI: 10.1029/2009GC002905.
106. *Peltzer G., Hudnut K., Feigl K.* Analysis of coseismic surface displacement gradients using radar interferometry: New insights into the Landers earthquake // *J. Geophysical Research*. 1994. V. 99. P. 21971–21981.
107. *Puzachenko Yu., Sandlarsky R., Sankovski A.* Methods of evaluating thermodynamic properties of landscape cover using multispectral reflected radiation measurements by the Landsat satellite // *Entropy*. 2013. V. 15. P. 3970–3982. DOI: 10.3390/e15093970.
108. *Racault M.-F., Abdulaziz A., George G., Menon N., Jasmin C., Punathil M., McConville K., Loveday B., Platt T., Sathyendranath S., Vijayan V.* Environmental reservoirs of vibrio cholerae: Challenges and opportunities for ocean-color remote sensing // *Remote Sensing*. 2019. V. 11. Art. No. 2763. <https://doi.org/10.3390/rs11232763>.
109. *Sellers P. J.* Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration // *Intern. J. Remote Sensing*. 1985. V. 6. P. 1335–1372. <https://doi.org/10.1080/01431168508948283>.
110. *Steffen H., Gitlein O., Denker H., Müller J., Timmen L.* Present rate of uplift in Fennoscandia from GRACE and absolute gravimetry // *Tectonophysics*. 2009. V. 474. P. 69–77. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.01.012>.
111. *Stenberg P., Rautiainen M., Manninen T., Voipio P., Smolander H.* Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in Finnish pine and spruce stands // *Silva Fennica*. 2004. V. 38(1). P. 3–14. <https://doi.org/10.14214/sf.431>.
112. *Swenson S. C., Wahr J.* Post-processing removal of correlated errors in GRACE data // *Geophysical Research Letters*. 2006. V. 33. Art. No. L08402. DOI: 10.1029/2005GL025285.
113. *Tucker C. J.* Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote Sensing of Environment*. 1979. V. 8. P. 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
114. *van Geffen J. H. G. M., Eskes H. J., Compernelle S., Pinardi G., Verhoelst T., Lambert J.-C., Sneepe M., ter Linden M., Ludewig A., Boersma K. F., Veeffkind J. P.* Sentinel-5P TROPOMI NO₂ retrieval: impact of version v2.2 improvements and comparisons with OMI and ground-based data // *Atmospheric Measurement Techniques*. 2022. V. 15. P. 2037–2060. DOI: 10.5194/amt-15-2037-2022.
115. *Xu H., Dvorkin J., Nur A.* Linking oil production to surface subsidence from satellite radar interferometry // *Geophysical Research Letters*. 2001. V. 28. No. 7. P. 1307–1310. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1029/2000GL012483>.

116. Xun Zh., Zhao Ch., Kang Ya, Liu X., Liu Y., Du Ch. Automatic extraction of potential landslides by integrating an optical remote sensing image with an InSAR-derived deformation map // *Remote Sensing*. 2022. V. 14(11). Art. No. 2669. <https://doi.org/10.3390/rs14112669>.
117. Zakharov A. I., Zakharova L. N., Krasnogorskii M. G. Monitoring landslide activity by radar interferometry Using Trihedral Corner Reflectors // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2018. V. 54. P. 1110–112. <https://doi.org/10.1134/S0001433818090451>.
118. Zlatopolsky A. A. Description of texture orientation remote sensing data using LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical // Analysis. 1997. V. 23. No. 1. P. 45–62. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(96\)00053-2](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(96)00053-2).

Trends in remote sensing methods for geological and environmental applications

V. I. Gornyy¹, O. V. Brovkina², A. V. Kiselev¹, A. A. Tronin¹

¹ *Saint Petersburg Scientific Research Centre for Ecological Safety RAS
Saint Petersburg 197110, Russia
E-mail: v.i.gornyy@mail.ru*

² *Global Change Research Institute CAS, Brno 60300, Czech Republic*

The 20th anniversary international conference “Current problems in remote sensing of the Earth from space” held on November 14–18, 2022, aimed to summarize the scientific and technological progress in remote sensing methods for geology and ecological safety applications over the past twenty years. The objective of this review was to identify trends in this area and to focus research and production organizations on the most promising new areas for the next decade. The significance of this review was motivated by the need to assess the progress of satellite remote sensing methods and to address the new environmental challenges arising from global warming. The review highlights that the introduction of new remote sensing methods such as variational satellite gravimetry, radar interferometry, and hyperspectral imaging at the beginning of the 21st century has significantly advanced the field. The use of modern remote sensing methods for determination the characteristics of celestial bodies has reached a new level, and the number of projects has increased. Regarding environmental safety, remote sensing is currently being used for information support of the management decision-making system. This requires remote sensing products to have a quantitative character, statistical averaging of information over a certain period, and the possibility of obtaining economic assessments. New areas of satellite remote sensing methods application have emerged, including satellite monitoring of biohazards and analysis of the impact of climate warming and air pollution on human health and ecosystems. In geology, there is a growing trend towards integrating remote sensing materials with geophysical and geochemical survey materials. Physical models are increasingly being used for geological interpretation of remote sensing results and for determining the parameters of geological bodies. Finally, a forecast is given for the development of remote sensing methods in the next decade. The review predicts that the integration of new technologies and methods, such as artificial intelligence and machine learning, will further enhance remote sensing capabilities for geology and environmental safety applications.

Keywords: remote sensing, geology, environmental safety, development, trends, promising directions

Accepted: 31.03.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-9-38

References

1. Babayantz I. P., Baryakh A. A., Volkova M. S., Mikhailov V. O., Timoshkina E. P., Khairtudinov S. A., Monitoring of subsidence in Berezniki (Perm Region) by SAR interferometry: I. Differential interferometry, *Geophysical Research*, 2021, Vol. 22, No 4, pp. 73–89 (in Russian), <https://doi.org/10.21455/gr2021.4-5>.

2. Bogdanov K. V., Beketova E. B., Application of uncleaned aircraft in geological and geophysical development of mineral deposits, *Budushchee Arktiki nachinaetsya zdes'* (The future of the Arctic begins here), Proc. All-Russia Scientific-Practical Conf. with Intern. Participation, Apatity: Murmansk Arctic State University, Apatity Branch, 2019, pp. 67–79 (in Russian).
3. Vasilev Yu. V., Misuyev D. A., Filatov A. V., Anthropogenic influence of the Komsomolsk oil and gas condensate field on modern deformation processes, *Oil and gas*, 2018, No. 2, pp. 11–20 (in Russian), DOI: 10.31660/0445-0108-2018-2-11-20.
4. Vinogradov A. N., Elizavetin I. V., Kurshev E. P., Paramonov S. V., Belov S. A., Analysis of the differential interferometry methods applicability for geotechnical monitoring of the Arctic zone, *Program systems: Theory and applications*, 2018, Vol. 9, No. 4(39), pp. 461–475 (in Russian) DOI: 10.25209/2079-3316-2018-9-4-461-475.
5. Volkova M. S., Mikhailov V. O., Model of pyroclastic flow surface subsidence: Shiveluch volcano (Kamchatka), eruption on 29.08.2019, *Geophysical Research*, 2022, Vol. 23, No. 2, pp. 73–85 (in Russian), <https://doi.org/10.21455/gr2022.2-5>.
6. Girina O. A., Melnikov D. V., Manevich A. G., Loupian E. A., Kramareva L. S., The characteristics of Bezymianny volcano explosive eruption events on March 15, 2019, inferred from satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 102–114 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-102-114.
7. *Glubinnoe stroenie i geodinamika Yuzhnogo Urala (proekt Uralseis)* (Deep structure and geodynamics of the Southern Urals (Uralseis project)), Tver: GERS, 2001, 286 p. (in Russian).
8. Gnevanov I. V., Shamin P. V., Evaluation of land surface deformation of “Uralkaliy” JSC mining areas near Berezniki city using methods of radar interferometry, *Geomatics*, 2012, No. 1, pp. 56–60 (in Russian), <https://sozond.ru/upload/iblock/212/212d08b8d90670bc2e94334eaf8f3825.pdf>.
9. Gornyy V. I., Spaceborn measurement methods in the infrared thermal range for monitoring potentially hazardous phenomena and objects, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Vol. 1, No. 1, pp. 10–16 (in Russian), available at: <http://www.iki.rssi.ru/earth/trudi/0-01.pdf>.
10. Gornyy V. I., Mineragenic regularities as a result of plate motion and mantle convection (using spaceborn measurements), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Vol. 2, No. 2, pp. 182–187 (in Russian), available at: <http://www.iki.rssi.ru/earth/trudi/0-01.pdf>.
11. Gornyy V. I., Karaev N. A., Van Genderen D. L., Frolov V. S., Camoufflet explosions as a reason for the formation of structures indicating diamond-bearing regions (using remote sensing and geophysical data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol. 3, No. 2, pp. 225–241 (in Russian), <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-vol2-225-241.pdf>.
12. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tepliakova T. E., Tronin A. A., Measurement technology for satellite monitoring of locust, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 5, No. 2, pp. 469–476 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_pdf/2/64.pdf.
13. Gornyy V. I., Latypov I. Sh., Tepliakova T. E., Voyakina E. Yu., Verification of remote geothermal method results at the big Solovetskii Island while investigation of reasons of extrazonal ecosystem formation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 6, No. 2, pp. 36–45 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/2009,2/36-45.pdf.
14. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Olovyannyy A. G., Tronin A. A., Vertical sign-variable movements of land surface according satellite radar survey data (on an example of Saint-Petersburg), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 2, pp. 321–332 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2010t2/321-332.pdf.
15. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Thermodynamic approach for remote apping of ecosystem disturbance, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 179–194 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/2011v8n2/179-194.pdf.
16. Gornyy V. I., Ammar O., Kafri A., Kiselev A. V., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Minini H., Regional geological structure of the Northern part of Arabian Plate and hydrocarbon perspective of Syrian territory according to complex processing of satellite and gravimetric data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 305–312 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2012t1/305-312.pdf.
17. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Khramtsov V. N., Verification of Large scale maps of thermodynamic index ecosystem health disturbance, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 4, pp. 201–212 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2013t4/201-212.pdf.
18. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Olovyannyy A. G., Petrov S. D., Tronin A. A. (2014a), On the mechanism of land surface vertical oscillations in urban areas (by satellite radar interferometry), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 129–139 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2014t3/129-139.pdf.
19. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A. (2014b), Regularities of rock alteration assemblages of ore-magmatic systems containing quartz-vein manifestations of gold (by Satellite Spectrometry),

- Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 140–156 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2014t3/140-156.pdf.
20. Gornyy V. I., Kiselev A. V., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A. (2016a), Restoration of the relief of buried structures by the elements of occupation of formations measured on digital satellite materials of ultra-high geometric resolution, *14-ya Vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (14th All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Book of Abstracts, Moscow, 2016, p. 310 (in Russian), <http://conf.rse.geosmis.ru/thesisshow.aspx?page=133&thesis=5687>.
 21. Gornyy V. I., Seleznev G. A., Tronin A. A. (2016b), Application of infrared-thermal satellite flown survey on the low temperature thermal water exploration, *Prospect and protection of mineral resources*, 2016, No. 1, pp. 49–57 (in Russian).
 22. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A., Kiselev A. V., Brovkina O. V., Filippovich V. E., Stankevich S. A., Lubskii N. S., Thermophysical properties of land surface in urban area (by satellite remote sensing of Saint Petersburg and Kiev), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 51–66 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-51-66.
 23. Gornyy V. I., Kiselev A. V., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A., Thermodynamic approach to satellite mapping of accumulated ecological losses of forest ecosystems, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 124–136, (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-124-136.
 24. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A., Forecast of the surface temperature of the urban environment of St. Petersburg, based on satellite mapping of thermophysical properties, *Vserossiiskaya nauchnaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem "Zemlya i kosmosa" k stoletiyu akademika RAN K. Ya. Kondrat'eva* (All-Russia Scientific Conf. with Intern. Participation "Earth and Space" Dedicated to the Centenary of Academician of the Russian Academy of Sciences K. Ya. Kondratiev), Proc. Conf., 2020, pp. 14–21 (in Russian).
 25. Gornyy V. I., Kiselev A. V., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A., Satellite mapping of the thermal response of ecosystems of Northern Eurasia to climate change, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 6, pp. 155–164 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-6-155-164.
 26. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Manvelova A. B., Tronin A. A. (2022a), Satellite risk mapping of urban air overheating (by the example of Helsinki, Finland), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 23–34 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-23-34.
 27. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Tronin A. A. (2022b), Satellite mapping of economic damage from urban deaths caused by overheating (by example of Helsinki, Finland), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 35–46 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-35-46.
 28. Dagurov P. N., Dmitriev A. V., Dobrynin S. I., Zakharov A. I., Chimitdorzhiev T. N., Radar interferometry of the soil's seasonal deformations and the phase model of backscattering of microwaves by a two-layer medium with rough boundaries, *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2016, Vol. 29, No. 7, pp. 585–591 (in Russian), DOI: 10.15372/AOO20160709.
 29. Dubyanskiy V. M., Prislegina D. A., Platonov A. E., Predicting incidence of Crimean-Congo hemorrhagic fever using satellite monitoring (remote sensing) data in the Stavropol territory, *Zhurnal mikrobiologii, epidemiologii i immunobiologii*, 2022, Vol. 99, No. 3, pp. 322–335 (in Russian), DOI: 10.36233/0372-9311-213.
 30. Zakharov A. I., Zakharova L. N., Mitnik L. M., Monitoring of the Norilsk Tpp-3 fuel tanks stability by means of radar interferometry technique, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 281–285 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-281-285.
 31. Zakharova L. N., Zakharov A. I., Interferometric observation of landslide area dynamics on the Bureya river by means of Sentinel-1 radar data in 2017–2018, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 273–277 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-273-277.
 32. Zlatopolsky A. A., New Lessa technology resources and digital terrain map analysis. Methodology, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 3, pp. 38–46 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/2011v8n3/38-46.pdf.
 33. Zlatopolsky A. A., Multyscale earth surface texture orientation analysis. Special scales, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 26–37 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2013t2/295-304.pdf.
 34. Zotov L. V., Frolova N. L., Shum S. K., Gravity anomalies in the basins of major Russian rivers, *Priroda*, 2016, No. 5, pp. 3–8 (in Russian).
 35. Isaev A. S., Ershov D. V., Lupyan E. A., Kobelkov M. E., Features of the organization of satellite monitoring of mass reproduction of harmful insects in the forests of Siberia, *Sovremennye problemy distantsionnogo*

- zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2004, Vol. 1, No. 1, pp. 164–174 (in Russian), <http://jr.rse.cosmos.ru/article.aspx?id=20>.
36. Kalabin G. V., Moiseenko T. I., Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Soromotin A. V., Satellite monitoring of natural environment at Olimpiada gold open-cut mine, *J. Mining Science*, 2013, No. 1, pp. 177–184 (in Russian), <https://www.sibran.ru/upload/iblock/ca0/ca0e138ae5cd7b9ade8e453de194a5a7.pdf>.
37. Kalabin G. V., Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Satellite monitoring of vegetation mantle response to the Sorsk copper-molybdenum mine impact, *J. Mining Science*, 2014, No. 1, pp. 153–161 (in Russian), <https://www.sibran.ru/upload/iblock/acd/acd142fd72791bbdba102e1ce7c52851.pdf>.
38. Kalabin G. V., Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Environmental appraisal of the area of Kachkanar mining-and-processing plant by satellite monitoring data, *J. Mining Science*, 2016, No. 2, pp. 179–187 (in Russian), <https://www.sibran.ru/upload/iblock/d37/d37f3ff7a749724d32511f9cded81219.pdf>.
39. Karpov I. K., Zubkov V. S., Bychinskii V. A., Artimenko M. V., Detonation of heavy hydrocarbons in mantle flows, *Geologiya i geofizika*, 1998, Vol. 39, No. 6, pp. 754–762 (in Russian).
40. Kerchev I. A., Maslov K. A., Markov N. G., Tokareva O. S., Semantic segmentation of damaged fir trees in unmanned aerial vehicle images, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 1, pp. 116–126 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-116-126.
41. Kirsanov A. A., Smirnov M. Yu., Lipiyaynen 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 Metallogeny*, 2021, No. 86, pp. 97–106 (in Russian), DOI: 10.52349/0869-7892_2021_86_97-106.
42. Kiselev A. V., Muratova N. R., Gornyy V. I., Tronin A. A., Relation between available water content in soil and gravity force (from GRACE data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 7–16 (in Russian).
43. Kiselev A. V., Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Tronin A. A., Indication of natural hazards using terrestrial gravity field variations observed by GRACE system, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 6, pp. 13–28 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2015t6/7-16.pdf.
44. Kolesnikov A. A., Analysis of methods and tools of artificial intelligence for analysis and interpretation of active remote sensing data, *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies*, 2022, Vol. 27, No. 3, pp. 74–94 (in Russian).
45. Kornienko S. G., Characteristics of anthropogenic transformations of landscapes in the area of Bovanenkovo gas field based on Landsat satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 2, pp. 106–129 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-106-129.
46. Krasnoshchekov K. V., Dergunov A. V., Ponomareva T. V., Geospatial analysis of technogenically disturbed ecosystems in Central Siberia using satellite data in the IR range, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 203–216 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-203-216.
47. Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Lineament analysis of MODIS data and its results interpretation capabilities, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 45–53 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-45-53.
48. Kritsuk S. G., Gornyy V. I., Kalabin G. V., Latypov I. Sh., Regularities of vegetation index annual cycles in the region of Sorsk mining and metallurgical complex, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 228–237 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2013t1/228-237.pdf.
49. Kritsuk S. G., Gornyy V. I., Latypov I. Sh., Spatial resolution improvement of satellite mapping of thermal properties of land surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 5, pp. 277–290 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-277-290.
50. Kritsuk S. G., Gornyy V. I., Latypov I. Sh., Pavlovskii A. A., Tronin A. A., Satellite risk mapping of urban surface overheating (by the example of Saint Petersburg), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 34–44 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-34-44.
51. Kurganovich K. A., Shalikovskiy A. V., Bosov M. A., Kochev D. V., Application of artificial intelligence algorithms to control the use of flood-prone areas, *Water sector of Russia: problems, technologies, management*, 2021, No. 3, pp. 6–24 (in Russian), DOI: 10.35567/1999-4508-2021-3-1.
52. Malakhov D. V., Tsyhuyeva N. Yu., Kambulin V. E., Ecological modeling of *Locusta migratoria* L. breeding conditions in South-Eastern Kazakhstan, *Russian J. Ecosystem Ecology*, 2018, Vol. 3, No. 1, pp. 1–14 (in Russian), DOI: 10.21685/2500-0578-2018-1-5.
53. Manvelova A. B., Kiselev A. V., Nerobelov G. M., Sedeeva M. S., Makhura A. G., Petukhov V. V., Drozdova I. V., Gornyy V. I., Long-term changes in remotely measured characteristics of ecosystems of the Luga river basin as a reaction to technogenic impact, *Sovremennye problemy dis-*

- tantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 40–56 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-40-56.
54. Markov N.G., Maslov K.A., Kerchev I.A., Tokareva O.S., Svertochnaya neironnaya set' dlya segmentatsii porazhennykh derev'ev pikhty na snimkakh s bespilotnykh letatel'nykh apparatov (A convolutional neural network for segmentation of damaged fir trees in UAV imagery), *Regional'nye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli: materialy 7-i Mezhdunarnoi nauchnoi konferentsii* (Regional Problems of Earth Remote Sensing: Proc. 7th Intern. Scientific Conf.), Krasnoyarsk, Sept. 29–Oct. 2, 2020, E.A. Vaganov, G.M. Tsubulsky (eds.), Krasnoyarsk: Siberian Federal Univ., 2020, pp. 102–105.
55. Mikhailov V.O., Timoshkina E.P., Hayn M., Diamant M., De Viron O., Panet I., Bonvalot S., Lyakhovsky V., Comparative study of temporal variations in the Earth's gravity field using GRACE gravity models in the regions of three recent giant earthquakes, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014, Vol. 50, No. 2, pp. 177–191 (in Russian), <https://doi.org/10.1134/S1069351314020062>.
56. Mikhailov V.O., Lyubushin A.A., Timoshkina E.P., Khairtdinov S.A., Diamant M., Large-scale aseismic creep in the areas of the strong earthquakes revealed from the GRACE data on the time variations of the Earth's gravity field, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2016, Vol. 52, No. 5, pp. 692–703 (in Russian), DOI: 10.7868/S0002333714020069.
57. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Timoshkina E.P., Smirnov V.B., Ponomarev A.V., Dmitriev P.N., Kartashov I.M., Khairtdinov S.A., Arora K., Chadha R., Srinagesh D., Joint inversion of the GPS and SAR data for the Gorkha, Nepal Earthquake of 25.04.2015, *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 119–130 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-119-127.
58. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Baryakh A.A., Isaev Yu.S., Smol'yaninova E.I., Vozmozhnosti monitoringa dinamiki razvitiya osedaniy zemnoi poverkhnosti na territorii g. Berezniki po snimkam sputnika Sentinel (Possibilities of monitoring the dynamics of the development of subsidence of the earth's surface on the territory of the city of Berezniki from the images of the Sentinel satellite), *11-ya Vserossiiskaya shkola-seminar s mezhdunarodnym uchastiem "Fizicheskie osnovy prognozirovaniya razrusheniya gornykh porod* (11th All-Russia School Workshop with Intern. Participation "Physical Bases of Rock Crushing Predicting), Book of Abstr., 2019, pp. 35–36 (in Russian).
59. Mikhailov V.O., Timofeeva V.A., Volkova M.S., Model of the Rupture Surface of the March 29, 2017, South-Ozernoy earthquake from satellite radar interferometry data, *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 3, pp. 143–152 (in Russian), DOI: 10.31857/S0002333722010094.
60. Muratova N.R., Tsycheva N.Yu., Kambulin V.E., Kosmicheskii monitoring mest obitaniya aziatskoi saranchi v Kazakhstane (Satellite monitoring of asian locust habitat in Kazakhstan), *Kosmicheskie issledovaniya i tekhnologii*, 2012, No. 3, pp. 20–26 (in Russian), https://epizodyspace.ru/bibl/kosmicheskie_issledovaniya_i_tekhnologii/2012/3/kiit2012-4.pdf.
61. Musikhin V.V., Lyskov I.A., Application of the radar interferometer for detection of the pipe range strain-ing systems in the fenland conditions, *Perm J. Petroleum and Mining Engineering*, 2012, No. 4, pp. 103–110 (in Russian).
62. Pavlova I.G., Geologo-geneticheskie modeli molibdenovykh porfirovykh mestorozhdenii (Genetic models of endogenous ore formations), In: *Geneticheskie modeli endogennykh rudnykh formatsii*, Vol. 1, Novosibirsk: Nauka, 1983, pp. 127–135 (in Russian).
63. Plyusnina I.I., *Infrakrasnye spektry mineralov* (Infrared spectra of minerals), Moscow: MGU, 1976, 175 p. (in Russian).
64. Puzachenko Yu.G., Sandlersky R.B., Krenke A.N., Puzachenko Yu.M., Multispectral remote information in forest research, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, No. 7, pp. 838–854 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-28-45.
65. Savorskiy V.P., Kashnitskiy A.V., Konstantinova A.M., Balashov I.V., Krashenninnikova Yu.S., Tolpin V.A., Maklakov S.M., Savchenko E.V., Capabilities of hyperspectral indices analysis of the Vega-Constellation remote monitoring information systems, *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 28–45 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-3-28-45.
66. Selikhovkin A.V., Smirnov A.P., Forest fires, forest pests and diseases: problems and solutions, *Biosfera*, 2015, No. 3, pp. 315–320 (in Russian), <https://cyberleninka.ru/article/n/lesnye-pozhary-vrediteli-i-bolezni-lesa-problemy-i-resheniya>.
67. Smolianinova E.I., Mikhailov V.O., Dmitriev P.N., Interactive map of active landslides and subsiding areas for the Central and Adler Regions of the Big Sochi based on INSAR data for the period 2015–2021, *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 4, pp. 141–149 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-141-149.
68. Timoshkina E.P., Mikhailov V.O., Smirnov V.B., Volkova M.S., Khairtdinov S.A., Model of the rupture surface of the Khuvsgul earthquake of January 12, 2021 from INSAR data, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2022, Vol. 58, No. 1, pp. 74–79 (in Russian), DOI: 10.31857/S0002333722010094.

69. Tronin A. A., Remote sensing in ecological safety, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No. 1, pp. 238–245 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2013t1/238-245.pdf.
70. Tronin A. A., Environmental ranking of Russian Federal subjects, *Regional Ecology*, 2019, No. 1(55), pp. 5–12 (in Russian).
71. Tronin A. A., Shilin B. V., Monitoring of plumes of urban sewage treatment plants of St. Petersburg by aerospace thermal imaging, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 2, No. 5, pp. 586–594 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_pdf/2/79.pdf.
72. Tronin A. A., Tokarevich N. K., Antykova L. P., Teplyakova T. E., Kritsuk S. G., Remote methods in the study of ixodid ticks — carriers of natural focal infection, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Vol. 2, No. 5, pp. 376–381 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/2008_pdf/2/51.pdf.
73. Tronin A. A., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Nitrogen dioxide in the air basin of Russia according to satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2009, Vol. 2, No. 6, pp. 217–223 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/2009,2/217-223.pdf.
74. Tronin A. A., Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Spectral remote sensing for mineral exploration. A Review, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 23–36 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/2011v8n4/23-36.pdf.
75. Tronin A. A., Gornyy V. I., Kiselev A. V., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Forecasting of locust mass breeding by using satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 4, pp. 137–150 (in Russian), http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2014t4/137%E2%80%93150.pdf.
76. Tsyhuyeva N. Yu., Muratova N. R., Malakhov D. V., Kambulin V. E., Aisarova A., Space monitoring of the nesting areas of locust species in Kazakhstan Since 2000, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 137–148 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-137-148.
77. Achten W. M. J., Mathijs E., Muys B., Proposing a life cycle land use impact calculation methodology, *Proc. 6th Intern. Conf. LCA in the Agri-Food Sector*, Zurich, 12–14 Nov., 2008, pp. 22–33, <https://www.nature.com/articles/npre.2009.2340.3>.
78. Brovkina O., Novotný J., Navrátilová B., Hanuš J., *Forest aboveground biomass assessment using an area-based approach, Technical documentation of the verified technology, with description of the technology, and testing method*, Global Change Research Institute CAS, Brno, 2022, 44 p., available at: https://www.czech-globe.cz/wp-content/uploads/2023/01/Verified_technology_AGB_Eng.pdf.
79. Brown L., Chen J. M., Leblanc S. G., Cihlar J., A shortwave infrared modification to the simple ratio for LAI retrieval in boreal forests: An image and model analysis, *Remote Sensing of Environment*, 2000, No. 71, pp. 16–25, http://faculty.geog.utoronto.ca/Chen/Chen's%20homepage/assets/article/Shortwave_IR_modificatn.pdf.
80. Bruckno B. S., Hoppe E., Vaccari A., Acton S. T., Campbell E., Integration and delivery of interferometric synthetic aperture radar [INSAR] data into stormwater planning within karst terranes, *Proc. 14th Multidisciplinary Conf. Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst*, Rochester, Minnesota, 5–9 Oct., 2015, pp. 371–380, DOI: 10.5038/9780991000951.1020.
81. Chen J. L., Tapley B. D., Wilson C. R., Alaskan mountain glacial melting observed by satellite gravimetry, *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, Vol. 248, pp. 368–378, DOI: 10.1002/Grl.50552.
82. Edwards C. S., Piqueux S., The water content of recurring slope lineae on Mars, *Geophysical Research Letters*, 2016, Vol. 43, pp. 8912–8919, DOI: 10.1002/2016GL070179.
83. Geruo A., Velicogna I., Kimball J. S., Kim Y. (2015a), Impact of changes in GRACE derived terrestrial water storage on vegetation growth in Eurasia, *Environmental Research Letters*, 2015, Vol. 10, Art. No. 124024, DOI: 10.1088/1748–9326/10/12/124024.
84. Geruo A., Velicogna I., Kimball J. S., Du J., Kim Y., Njoku E. (2015b), Satellite-observed changes in vegetation sensitivities to surface soil moisture and total water storage variations since the 2011 Texas drought, *Environmental Research Letters*, 2015, Vol. 10, Art. No. 124024, DOI: 10.1088/1748–9326/10/12/124024.
85. Gornyy V. I., The mantle convection and the drift of Euro-Asian plate (according the remote geothermal method data), *Proc. IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. (IGARSS)*, Toronto, Canada, 24–28 June, 2002, Vol. 4, pp. 2029–2035, DOI: 10.1109/IGARSS.2002.1026435.
86. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. S., Teplyakova T. E., Tronin A. A., Quantitative Approach for Satellite Monitoring of Locust Mass Breeding Areas, *Intern. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences — ISPRS Archives, Proc. ISPRS Commission VII Symp. “Remote Sensing: From Pixels to Processes”*, Enschede, The Netherlands, 8–11 May 2006, Hannover, Germany: ISPRS, 2006, <https://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/part7/PDF/091.pdf>.
87. Gornyy V. I., Kritsuk S. G., Latypov I. Sh., Remote mapping of thermodynamic index of ecosystem health disturbance, *J. Environmental Protection*, 2010, Vol. 1, No. 3, pp. 242–250, DOI: 10.4236/jep.2010.13029.

88. Gueguen Y., Al Heib M., Deffontaines B., Fruneau B., de Michele M., Raucoules D., Guise Y., The interferometry technics applied on residual subsidence analysis measurement of closure coal mines, example from Nord-Pas-de Calais coal mine, France, *Symp. Post-Mining*, Nancy, France, 2008, Art. No. ineris-00973294, 4 p., <http://hal-ineris.ccsd.cnrs.fr/ineris-00973294>.
89. *Handbook of Ecological Indicators for Assessment of Ecosystem Health*, Jorgensen S. E., Costanza R., Xu F. L. (eds.), Taylor and Frances, 2005, 126 p., https://archive.epa.gov/solec/web/pdf/ecological_indicators.pdf.
90. Kamran Kh. V., Khorram B., A fuzzy multi-criteria decision-making approach for the assessment of forest health applying hyper spectral imageries: A case study from Ramsar forest, North of Iran, *Intern. J. Engineering and Geosciences*, 2022, Vol. 7(3), pp. 214–220, <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijeg>.
91. Kondratyev K. Ya., Buznikov A. A., Vasilyev O. B., Sevastyanov V. I., Results of spectrophotometric measurements of natural formations from the spacecraft “Soyuz-9” and investigations of environment from space, *Remote Sensing of Environment*, 1974, Vol. 3, Issue 1, pp. 15–27.
92. Kotchi S. O., Bouchard C., Brazeau S., Ogden N. H., Earth observation-informed risk maps of the Lyme disease vector ixodes scapularis in Central and Eastern Canada, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13(3), Art. No. 524, DOI: 10.3390/rs13030524.
93. Kritsuk S., Gornyy V., Davidan T., Latypov I., Manvelova A., Tronin A., Vasiliev M., Konstantinov P., Varentsov M., Satellite mapping of air temperature under polar night conditions, *Geo-Spatial Information Science*, 2022, pp. 325–336, <https://doi.org/10.1080/10095020.2021.2003166>.
94. Landerer F. W., Swenson S. C., Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates, *Water Resources Research*, 2012, Vol. 48, Issue 4, Art. No. W04531, 11 p., DOI: 10.1029/2011WR011453.
95. Lee Ch.-F., Liu J.-K., Singhroy V., Li J., Using high-resolution D-InSAR derived from RADARSAT-2 images to monitor regional landslide activity and sediment transportation in mountainous area — a case study in northern Taiwan, *ICEO and SI Conf.*, Yilan, Taiwan, 25–27 June, 2017.
96. Li W., Mutual information functions versus correlation functions, *J. Statistical Physics*, 1990, Vol. 60, Issue 5–6, pp. 823–837.
97. Mahapatra P. S., Samiei-Esfahany S., van der Marel H., Hanssen R. F., On the use of transponders as coherent radar targets for SAR interferometry, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2014, Vol. 52, No. 3, pp. 1869–1878, DOI: 10.1109/TGRS.2013.2255881.
98. Massonne D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K., Rabaute T., The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 1993, Vol. 364, pp. 138–142, https://earthjay.com/earthquakes/19920628_landers/massonnet_et_al_1993_insar_landers.pdf.
99. Melville G., Stone C., Turner R., Application of LiDAR data to maximize the efficiency of inventory plots in softwood plantations, *New Zealand J. Forestry Science*, 2015, Vol. 45, Art. No. 9, <https://doi.org/10.1186/s40490-015-0038-7>.
100. Mishra S., Stumpf R. P., Schaeffer B. A., Werdell J., Loftin K. A., Meredith A., Measurement of cyanobacterial bloom magnitude using satellite remote sensing, *Scientific Reports*, 2019, No. 9, Art. No. 18310, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-54453-y>.
101. Moholdt G., Wouters B., Gardner A. S., Recent mass changes of glaciers in the Russian High Arctic, *Geophysical Research Letters*, 2012, Vol. 39, Art. No. L10502, DOI: 10.1029/2012GL051466.
102. Noordermeer L., Bollandsås O. M., Ørka H. O., Næsset E., Gobakken T., Comparing the accuracies of forest attributes predicted from airborne laser scanning and digital aerial photogrammetry in operational forest inventories, *Remote Sensing of Environment*, 2019, Vol. 226, pp. 26–37, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.027>.
103. Padró J.-C., Carabassa V., Brotons J. B. L., M. Alcañiz J., Monitoring opencast mine restorations using Unmanned Aerial System (UAS) imagery, *Science of the Total Environment*, 2019, Vol. 657, pp. 1602–1614, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.156.
104. Pambudi R. A., Haripa R. I., DInSAR based land deformation detection in the karst landscape of Gunung Sewu, *E3S Web Conf.*, 2020, Vol. 202, Art. No. 04003, 8 p., <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020204003>.
105. Panet I., Pollitz F., Mikhailov V., Diamant M., Banerjee P., Grijalva K., Upper mantle rheology from GRACE and GPS postseismic deformation after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2010, Vol. 11, No. 6, Art. No. Q06008, DOI: 10.1029/2009GC002905.
106. Peltzer G., Hudnu K., Feigl K., Analysis of coseismic surface displacement gradients using radar interferometry: new insights into the Landers earthquake, *J. Geophysical Research*, 1994, Vol. 99, pp. 21971–21981.
107. Puzachenko Yu., Sandlersky R., Sankovski A., Methods of evaluating thermodynamic properties of landscape cover using multispectral reflected radiation measurements by the Landsat satellite, *Entropy*, 2013, Vol. 15, pp. 3970–3982, DOI: 10.3390/e15093970.
108. Racault M.-F., Abdulaziz A., George G., Menon N., Jasmin C., Punathil M., McConville K., Loveday B., Platt T., Sathyendranath S., Vijayan V., Environmental reservoirs of vibrio cholerae: Challenges and opportunities for ocean-color remote sensing, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, Art. No. 2763, <https://doi.org/10.3390/rs11232763>.

109. Sellers P.J., Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration, *Intern. J. Remote Sensing*, 1985, Vol. 6, pp. 1335–1372, <https://doi.org/10.1080/01431168508948283>.
110. Steffen H., Gitlein O., Denker H., Müller J., Timmen L., Present rate of uplift in Fennoscandia from GRACE and absolute gravimetry, *Tectonophysics*, 2009, Vol. 474, pp. 69–77, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.01.012>.
111. Stenberg P., Rautiainen M., Manninen T., Voipio P., Smolander H., Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in Finnish pine and spruce stands, *Silva Fennica*, 2004, Vol. 38, No. 1, pp. 3–14, <https://doi.org/10.14214/sf.431>.
112. Swenson S.C., Wahr J., Post-processing removal of correlated errors in GRACE data, *Geophysical Research Letters*, 2006, Vol. 33, Art. No. L08402, DOI: 10.1029/2005GL025285.
113. Tucker C.J., Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 1979, No. 8, pp. 127–150, [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
114. van Geffen J.H.G.M., Eskes H.J., Compennolle S., Pinardi G., Verhoelst T., Lambert J.-C., Sneep M., ter Linden M., Ludewig A., Boersma K.F., Veefkind J.P., Sentinel-5P TROPOMI NO₂ retrieval: impact of version v2.2 improvements and comparisons with OMI and ground-based data, *Atmospheric Measurement Techniques*, 2022, Vol. 15, pp. 2037–2060, DOI: 10.5194/amt-15-2037-2022.
115. Xu H., Dvorkin J., Nur A., Linking oil production to surface subsidence from satellite radar interferometry, *Geophysical Research Letters*, 2001, Vol. 28, No. 7, pp. 1307–1310, <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1029/2000GL012483>.
116. Xun Zh., Zhao Ch., Kang Ya, Liu X., Liu Y., Du Ch., Automatic extraction of potential landslides by integrating an optical remote sensing image with an InSAR-derived deformation map, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 11, Art. No. 2669, <https://doi.org/10.3390/rs14112669>.
117. Zakharov A.I., Zakharova L.N., Krasnogorskii M.G., Monitoring landslide activity by radar interferometry using trihedral corner reflectors, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, Vol. 54, pp. 1110–1120, <https://doi.org/10.1134/S0001433818090451>.
118. Zlatopolsky A.A., Texture orientation description of remote sensing data using LESSA (Lineament Extraction and Stripe Statistical), *Analysis*, 1997, Vol. 23, No. 1, pp. 45–62, [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(96\)00053-2](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(96)00053-2).