

**XIX Международная научная Школа-конференция молодых ученых
по фундаментальным проблемам дистанционного зондирования Земли из космоса**

Тенденции в развитии дистанционных методов при решении задач геологии и экологической безопасности

**Горный
Виктор Иванович**

СПб ФИЦ РАН

**Двадцать первая международная конференция
"СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"**

Москва, ИКИ РАН

2023

Цель лекции

Обратить внимание молодых ученых на перспективные новые направления развития методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в областях обеспечения России минеральными ресурсами и повышения экологической безопасности населения страны.

Актуальность определяется:

- бурным развитием методов и технических средств дистанционного зондирования;
- появлением новых вызовов, связанных с глобальным потеплением климата и ростом населения Земли.

Литературу см. в:

В.И. Горный , О.В. Бровкина , А.В. Киселев , А.А. Тронин. Тенденции развития дистанционных методов при решении задач геологии и экологической безопасности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. №2. С. 9–38.

Пример бурного развития технических средств

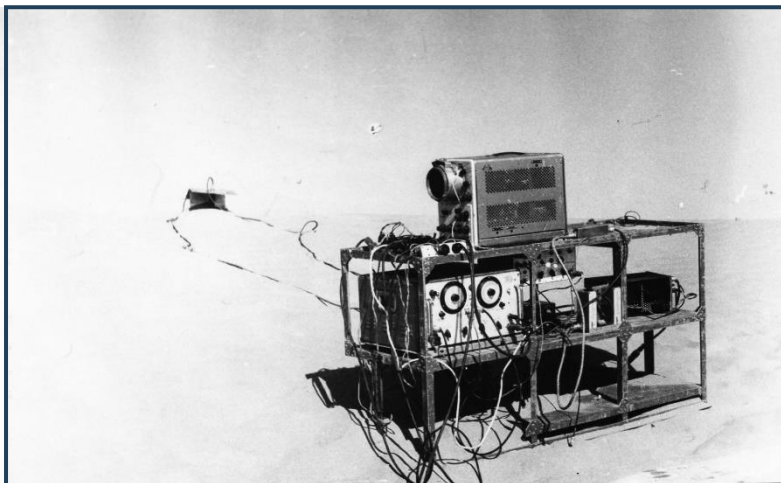
1973 г

Пустыня Каракум, Туркмения

Авиационный вариант



Наземный вариант



Разработка метода
«РАДИОЛОКАЦИОННОГО ПОДПОВЕРХНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ДЛЯ ГЕОЛИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ»

РКИИГА (Рига)

научн. рук. Проф. М.И. Финкельштейн, отв. исп. В.А.Кутев
Лаборатория аэрометодов (Ленинград),
научн. рук. Б.В.Шилин, отв.исп. В.И.Горный

2023 г

Георадар «Око-2»



Основные моменты, определившие бурное развитие ДЗЗ

Появление новых методов ДЗЗ:

- вариационная спутниковая гравиметрия;
- радиолокационная интерферометрия;
- спутниковая видео-гиперспектральная съёмка;
- лидарная съёмка.

Разработка новых технических средств ДЗЗ - цифровых измерительных съёмочных Систем космического базирования различного пространственного разрешения, работающих во всех диапазонах спектра.

Совершенствование систем и методов цифровой обработки материалов космических съёмок;

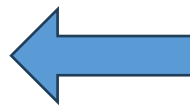
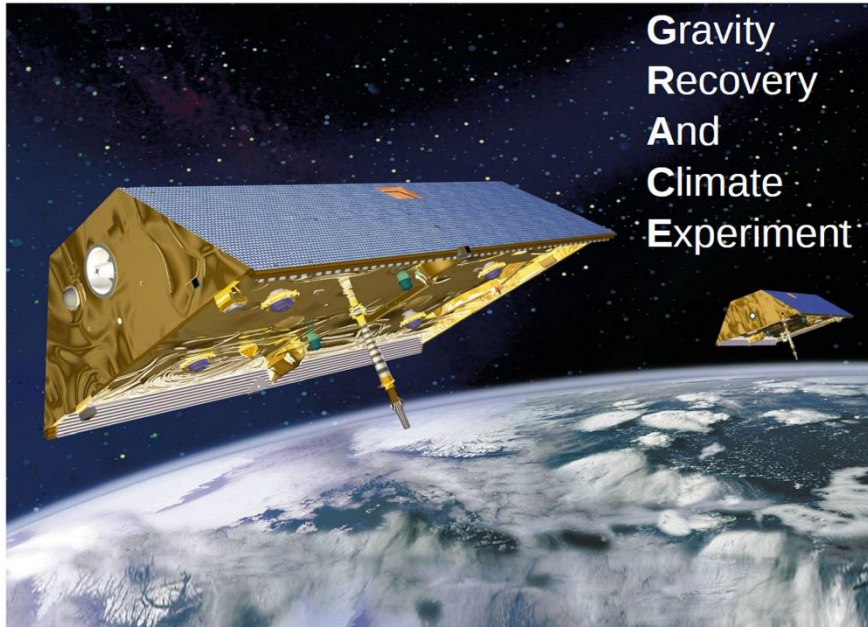
Накопление и подключение к сети Интернет общедоступных многолетних архивов материалов космических съёмок, дополненных инструментарием для их обработки, позволяющих анализировать длинные временные ряды наблюдений;

Создание продуктов высокого уровня обработки, готовых к непосредственному применению при решении различных задач.

Новые методы ДЗЗ

Спутниковая вариационная гравиметрия

17 марта 2002 г. НАСА и Немецкий центр авиации и космонавтики для измерения поля силы тяжести Земли был выведен на орбиту тандем спутников GRACE, а GRACE FO



Измерение вариаций поля силы тяжести Земли тандемом спутников GRACE

Высота орбиты: 300-500 км;

Расстояние между спутниками: 220 км;

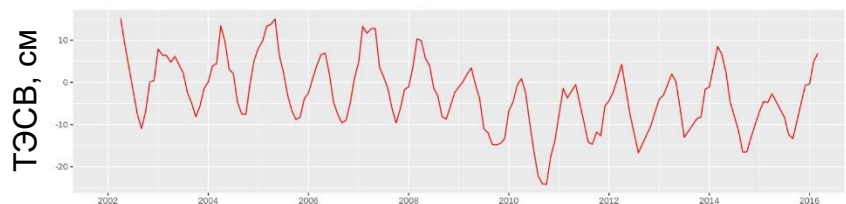
Разрешение на местности: 250x250 км

СКВО = ~ 2 см толщины эффективного слоя влаги (ТЭСВ);

Повторяемость результатов: 1 месяц.

Продолжительность проекта: с 2002 по настоящее время.

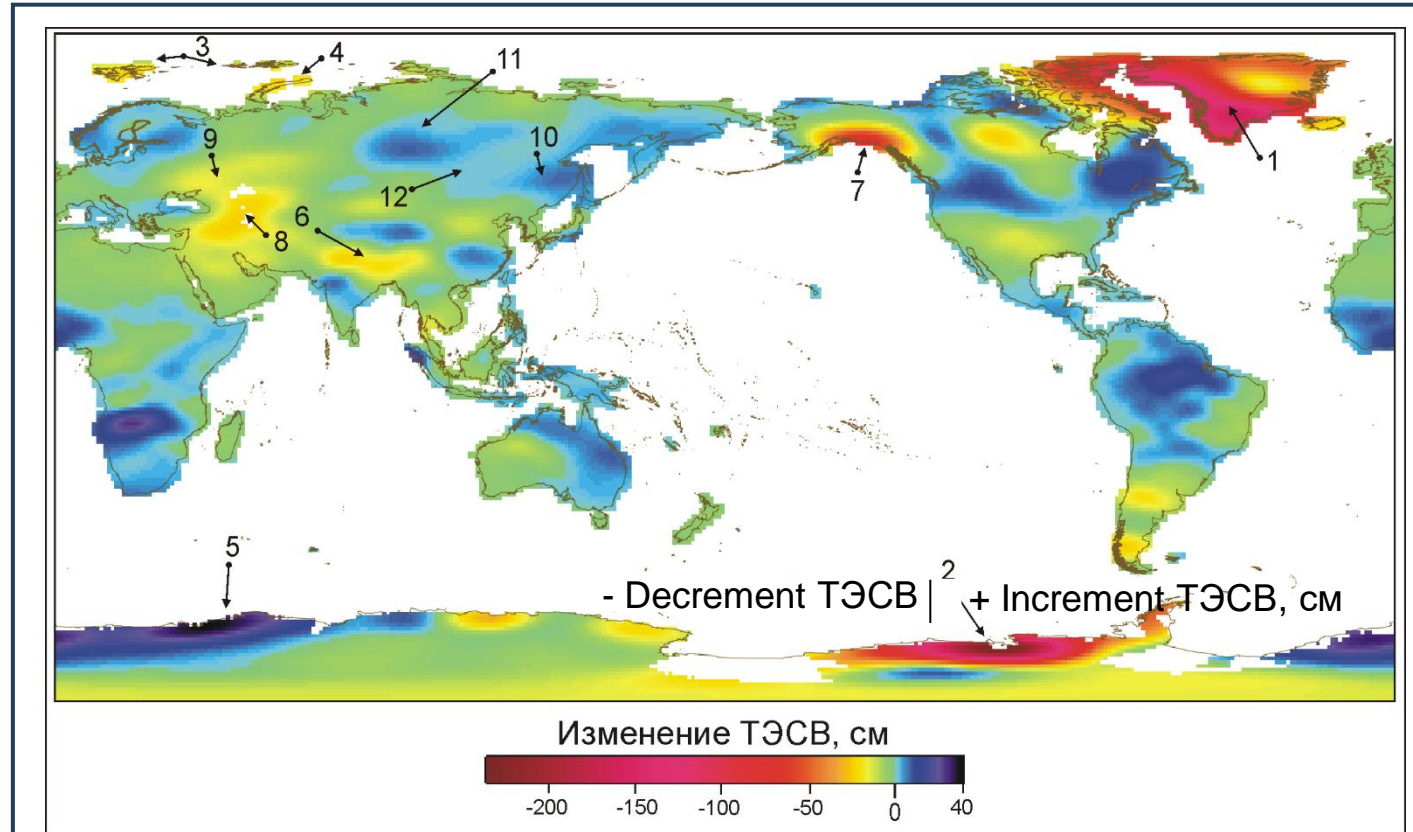
Стандартный продукт



Дата

Тенденции в изменении влагосодержания территорий (по результатам съемок тандемом спутников GRACE)

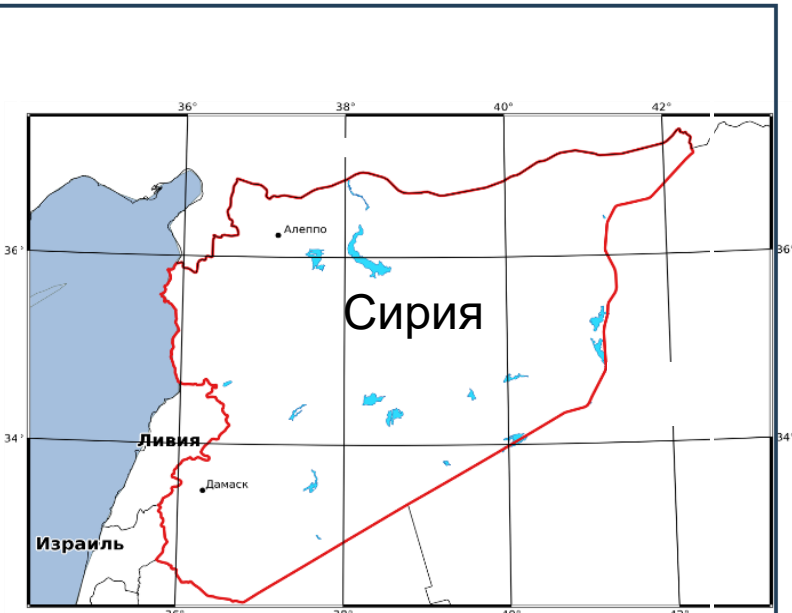
Карта-схема изменения ТЭСВ по материалам съемки
спутниками GRACE



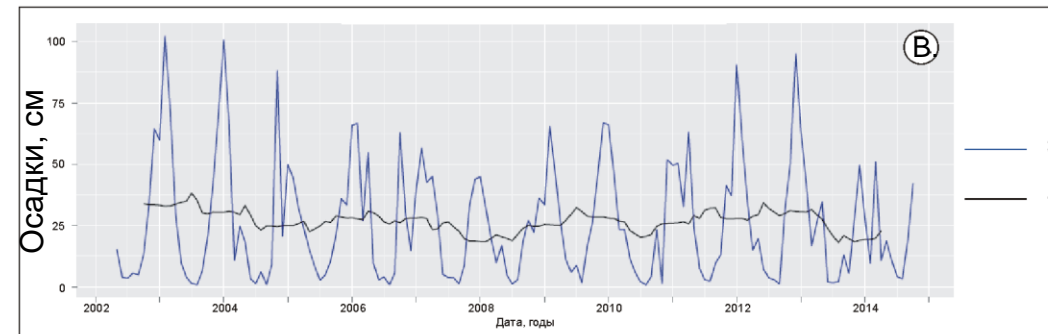
Киселев А. В., Муратова Н. Р., Горный В. И., Тронин А. А. Связь запасов продуктивной влаги в почве с полем силы тяжести Земли (по данным съемок спутниками GRACE) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 7–16. http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2015t6/7-16.pdf.

Засуха на Ближнем Востоке

Схема исследованной территории



Временные ряды дистанционно-измеренных характеристик



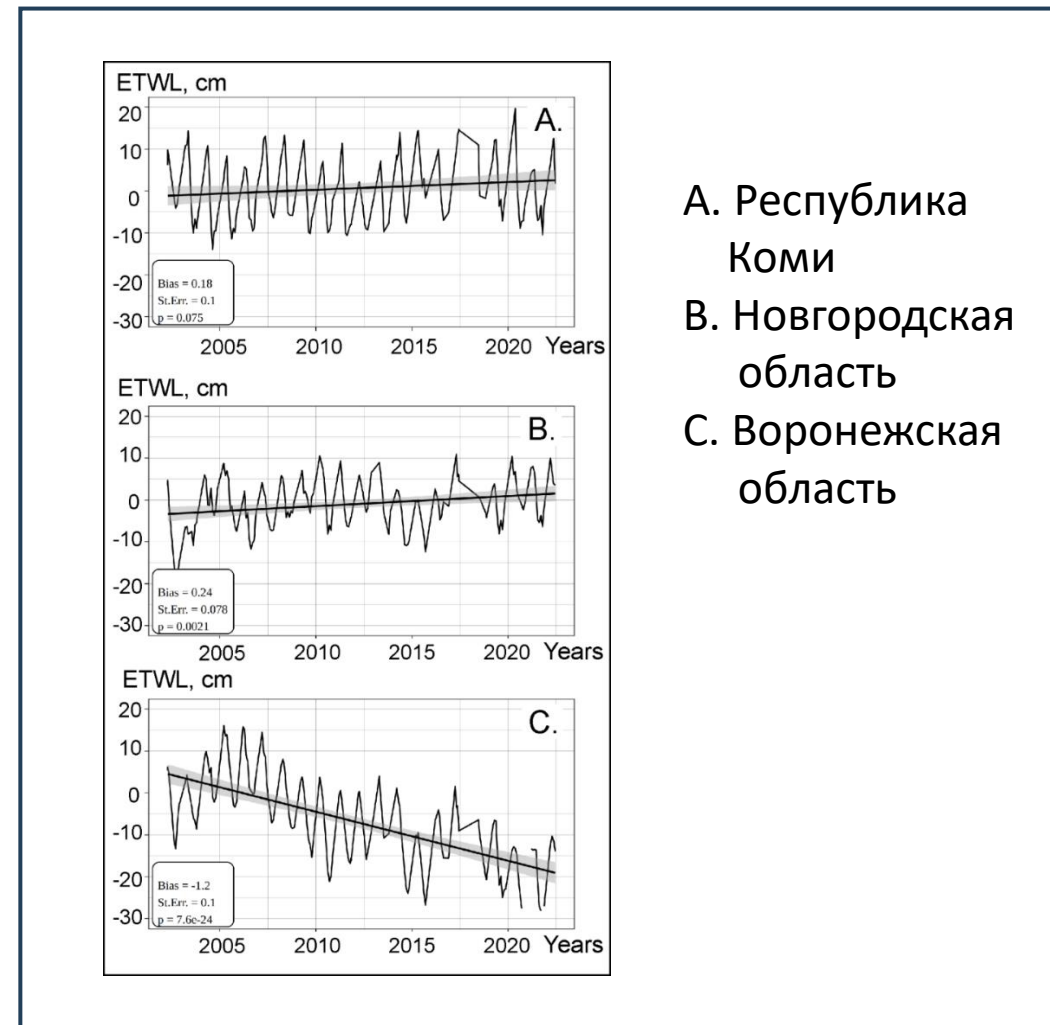
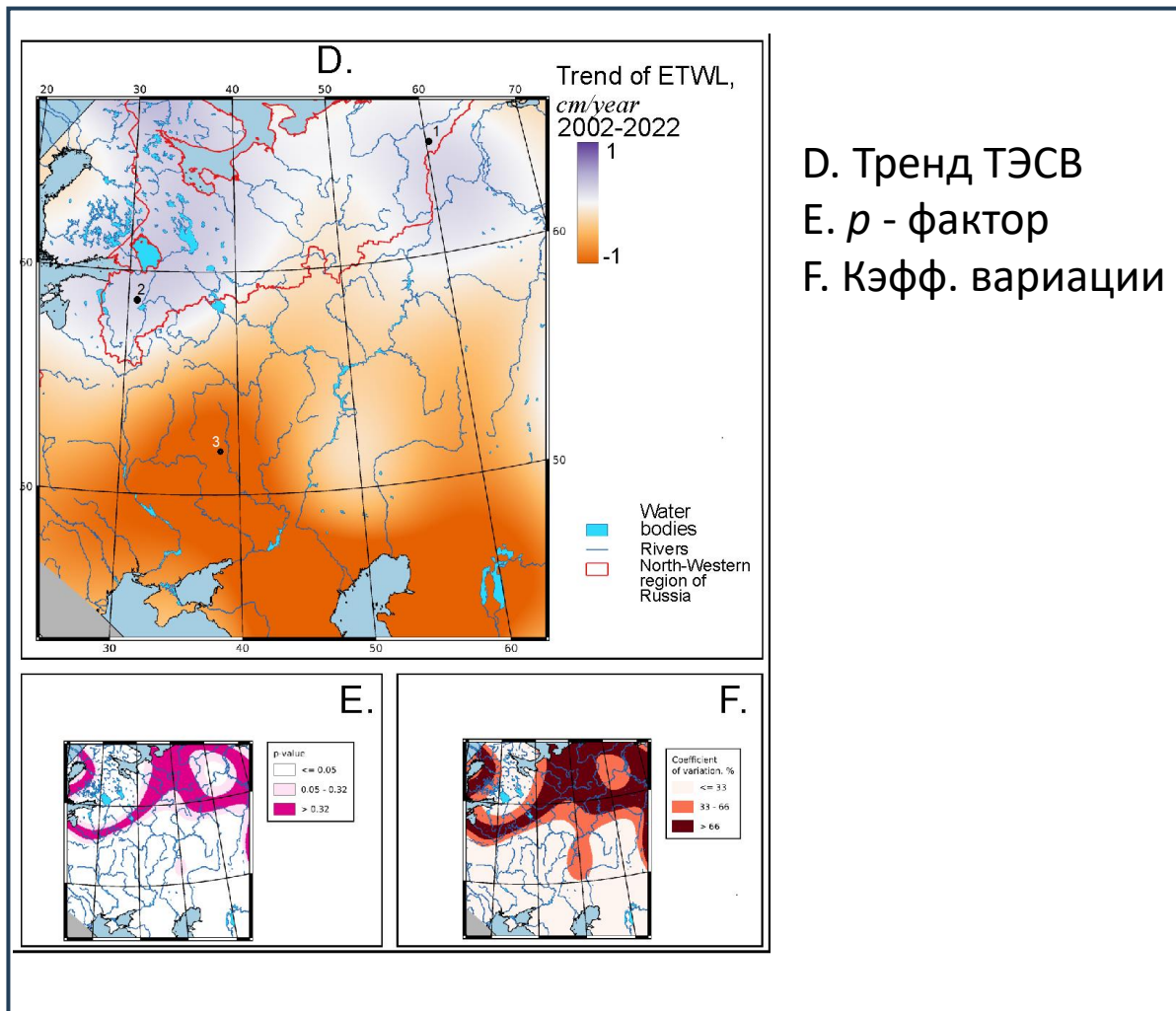
А) ТЭСВ.
В) Осадки.

1. ТЭСВ ежемесячные данные.
2. Тренд ТЭСВ.
3. Осадки ежемесячные данные.
4. Осадки осредненные.

Засуха на юге Восточно-Европейской равнины

Скорость изменения ТЭСВ

Временные ряды ТЭСВ

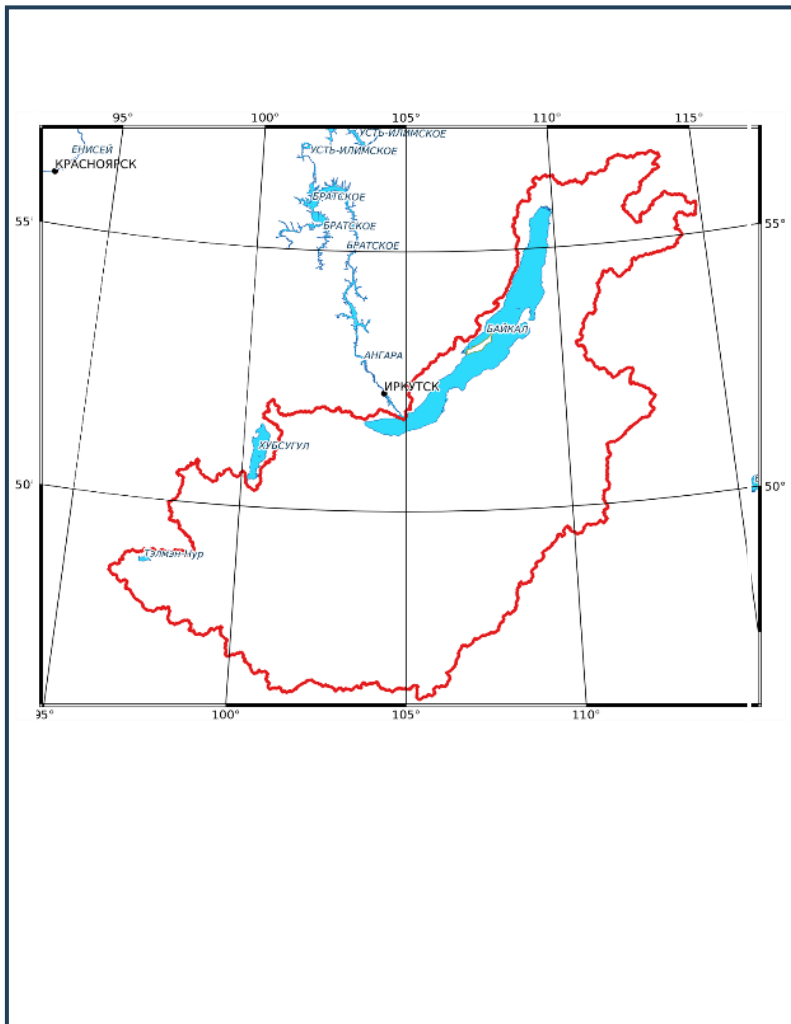


Gornyy V.I., Balun O.V., Kiselev A.V., Kritsuk S.G., Latypov I.Sh., Tronin A.A. Multiyear variations of soil moisture availability in the East European Plain.// GER (в печати)

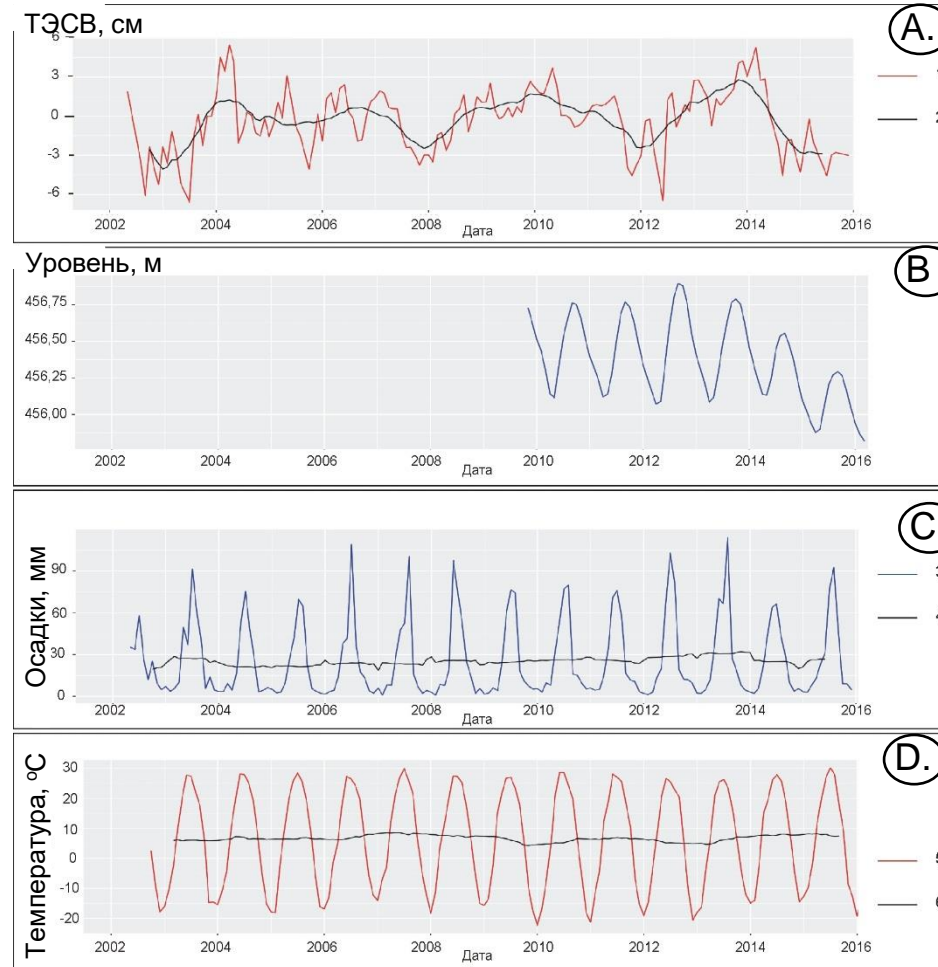
Н. Л. Фролова, В. Ю. Григорьев, И. Н. Крыленко, Е. А. Захарова. Современные возможности использования спутниковой системы GRACE для решения гидрологических задач // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. 2021. Т. 66. Вып. 1. сс. 107-122.

Водосборный бассейн оз. Байкал

Схема водосборного бассейна



Временные ряды дистанционно-измеренных характеристик

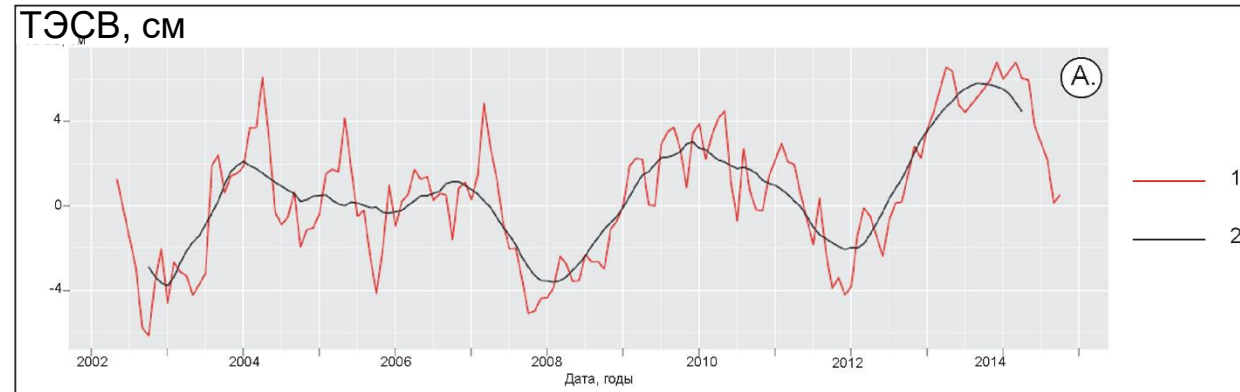


- A) ТЭСВ.
- B) Уровень озера.
- C) Осадки.
- D) Температура земной поверхности (Terra/Aqua).

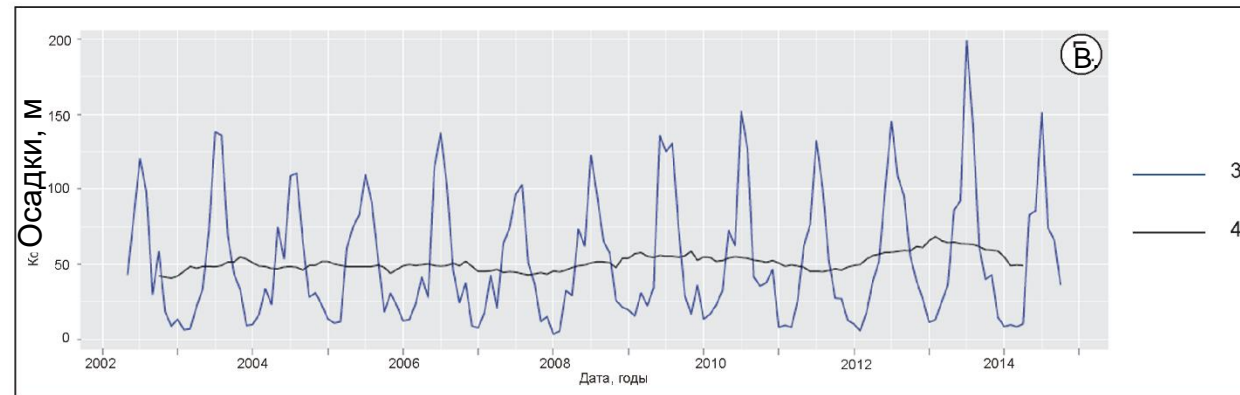
Водосборный бассейн реки Амур

Схема водосборного бассейна

Временные ряды дистанционно-измеренных характеристик



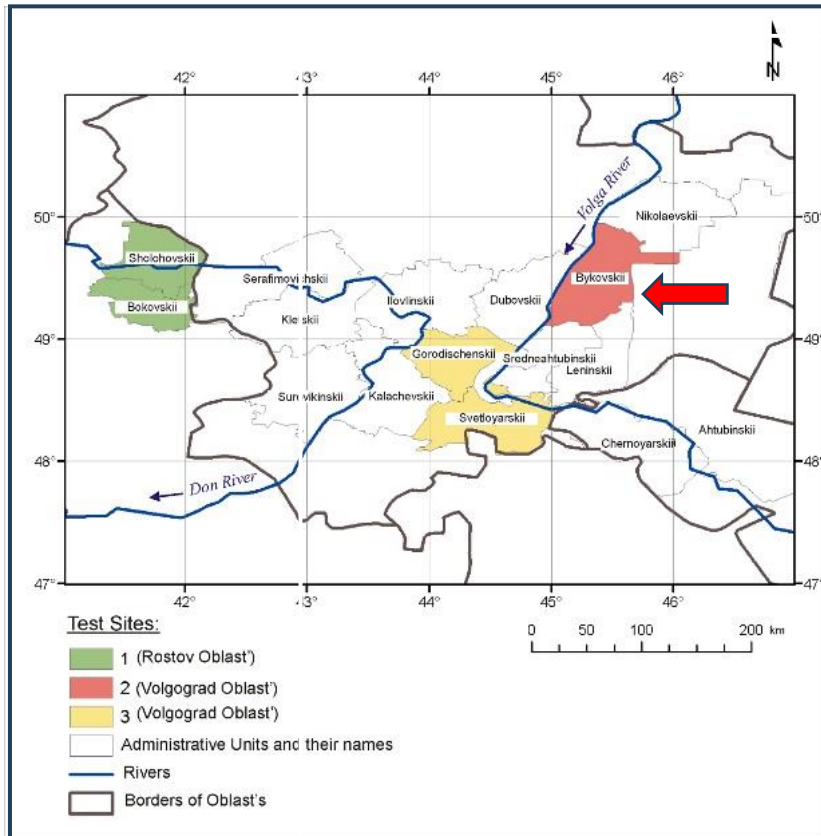
A) ТЭСВ.
B) Осадки



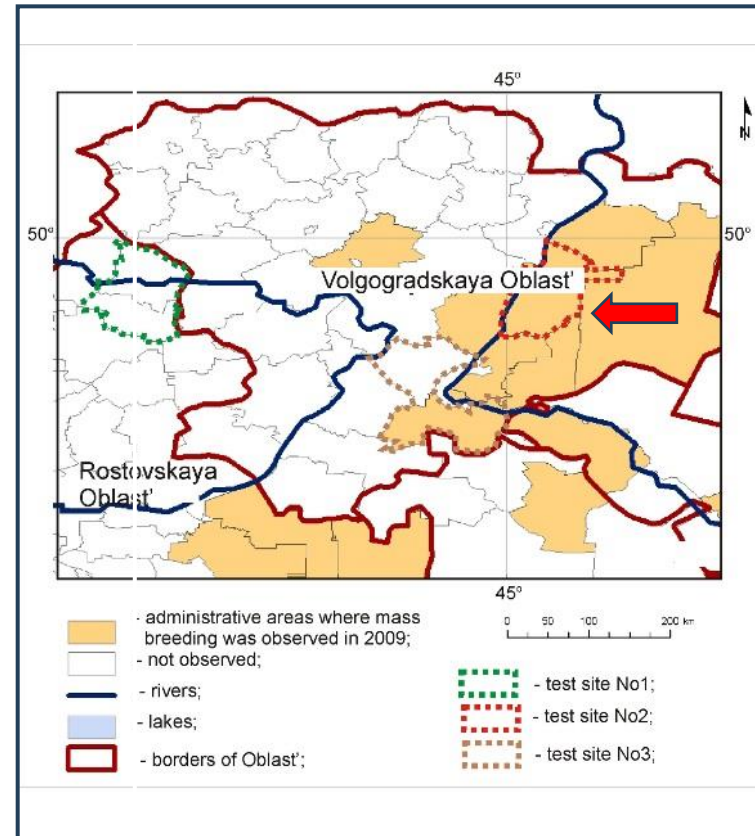
1. ТЭСВ ежемесячные данные.
2. Тренд ТЭСВ.
3. Осадки ежемесячные данные.
4. Осадки осредненные.

Вспышка численности саранчовых в 2009 г. на юге Европейской части России

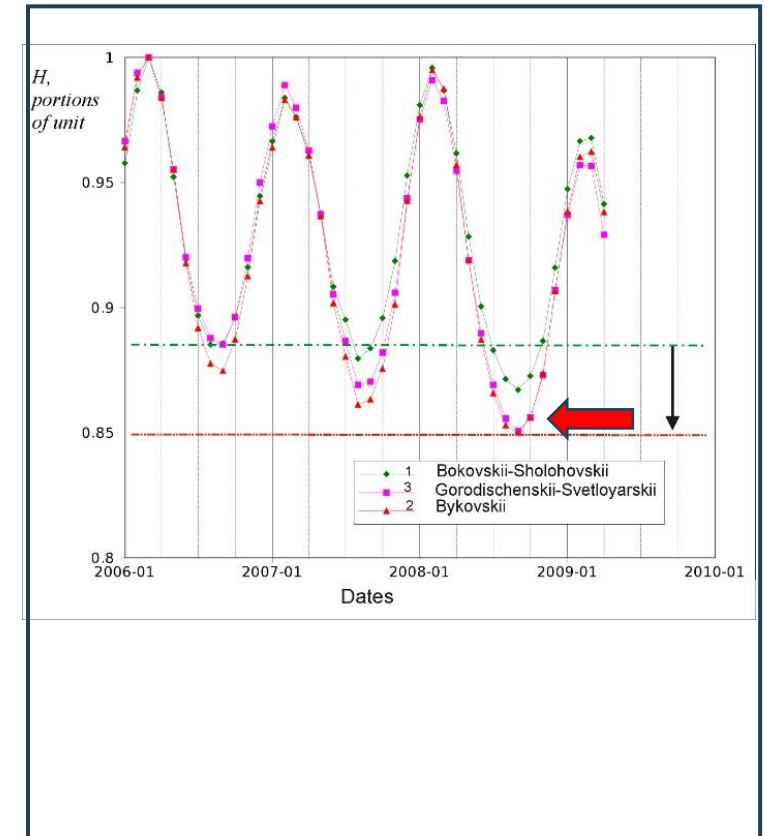
Вспышка в Волгоградской области



Районы вспышки численности



Временной ряд ТЭСВ

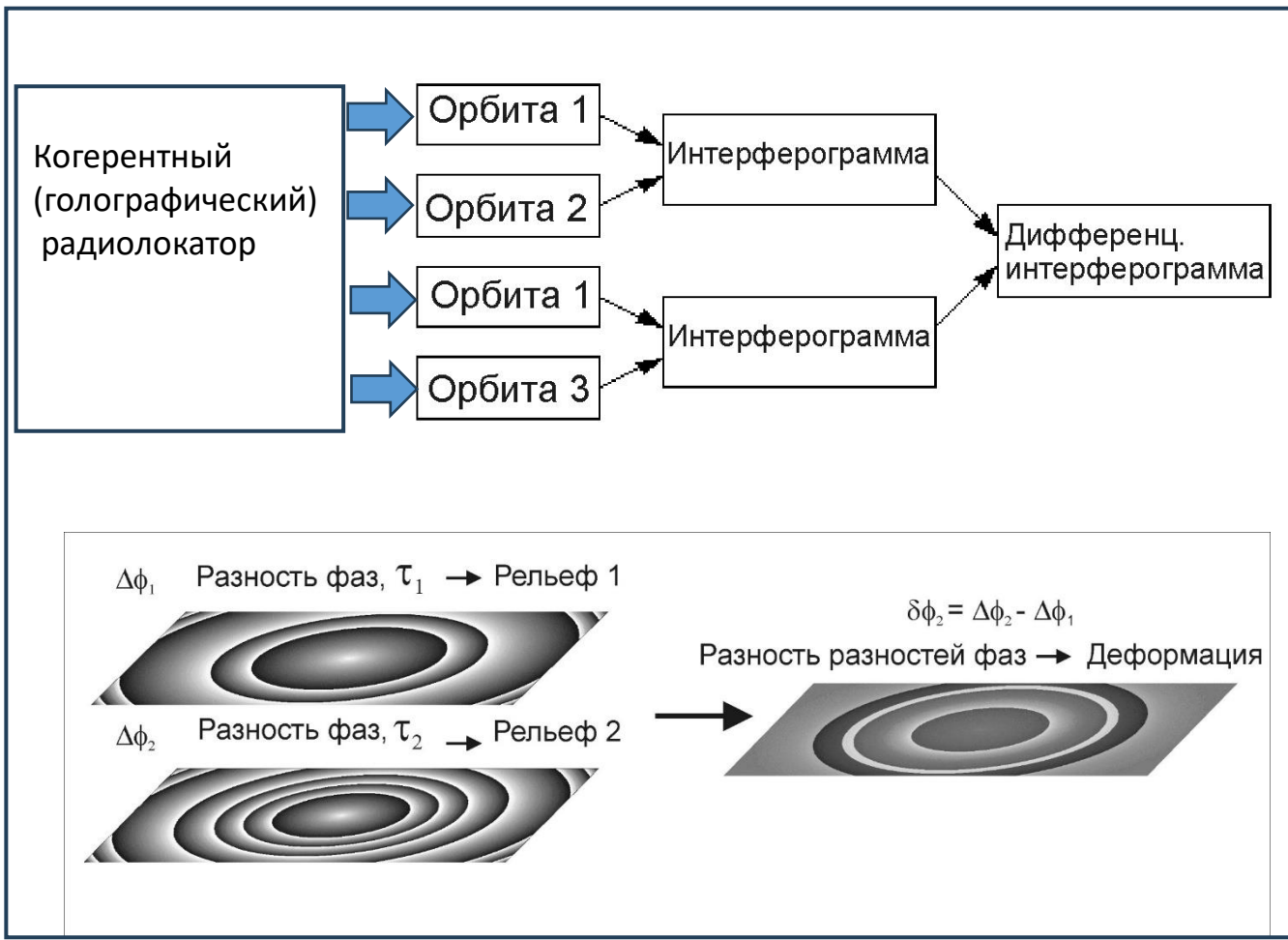


Области применения спутниковой вариационной гравиметрии при мониторинге:

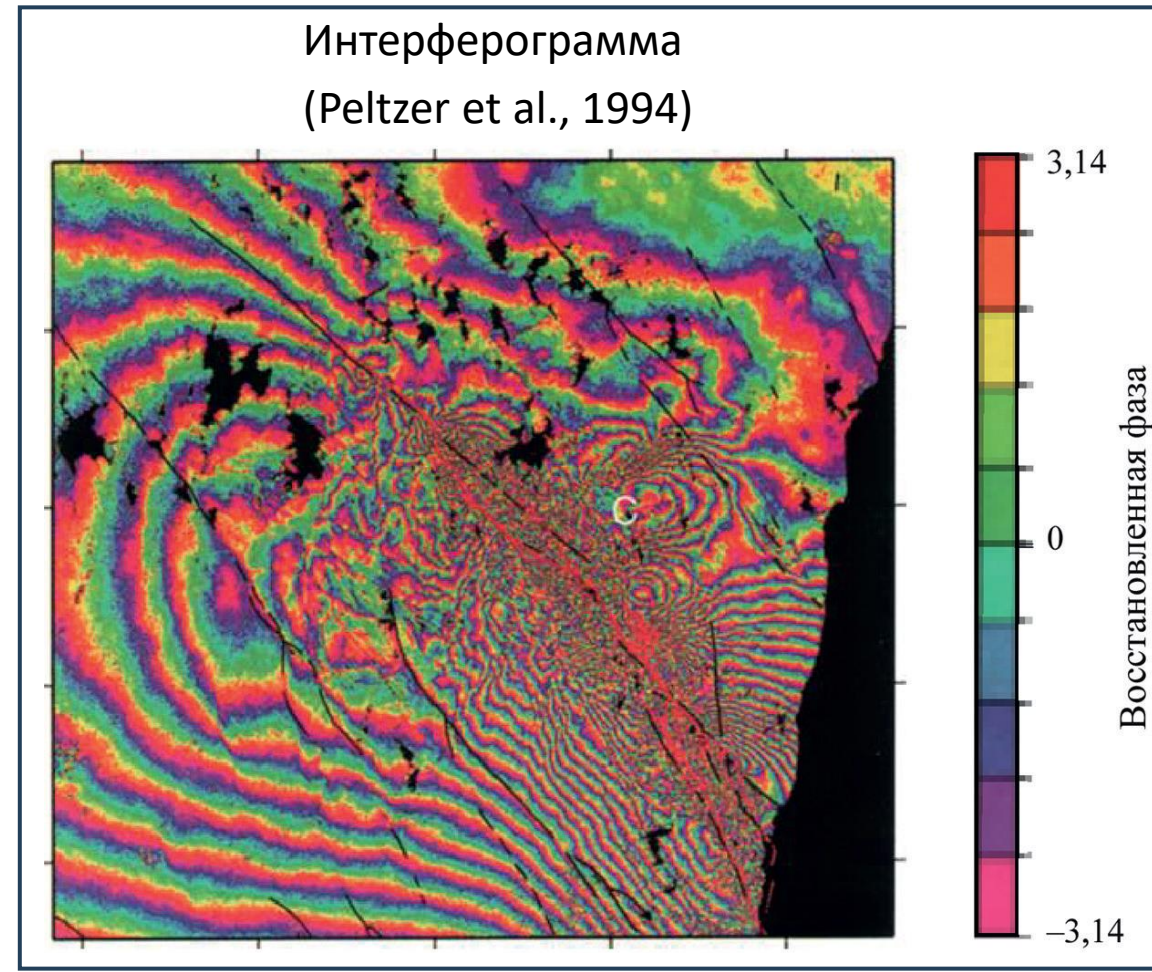
- деградации покровных ледников в Антарктиде, Гренландии, горных ледников в Гималаях и на Аляске, вызванных потеплением климата;
- влагозапаса крупных речных бассейнов, прогнозирование засух и наводнений;
- сейсмической активности, подвижек тектонических плит при крупных землетрясениях;
- постледникового поднятия Балтийского щита;
- влагообеспеченности сельскохозяйственных земель и прироста биомассы.

Спутниковая радиолокационная интерферометрия

Принцип

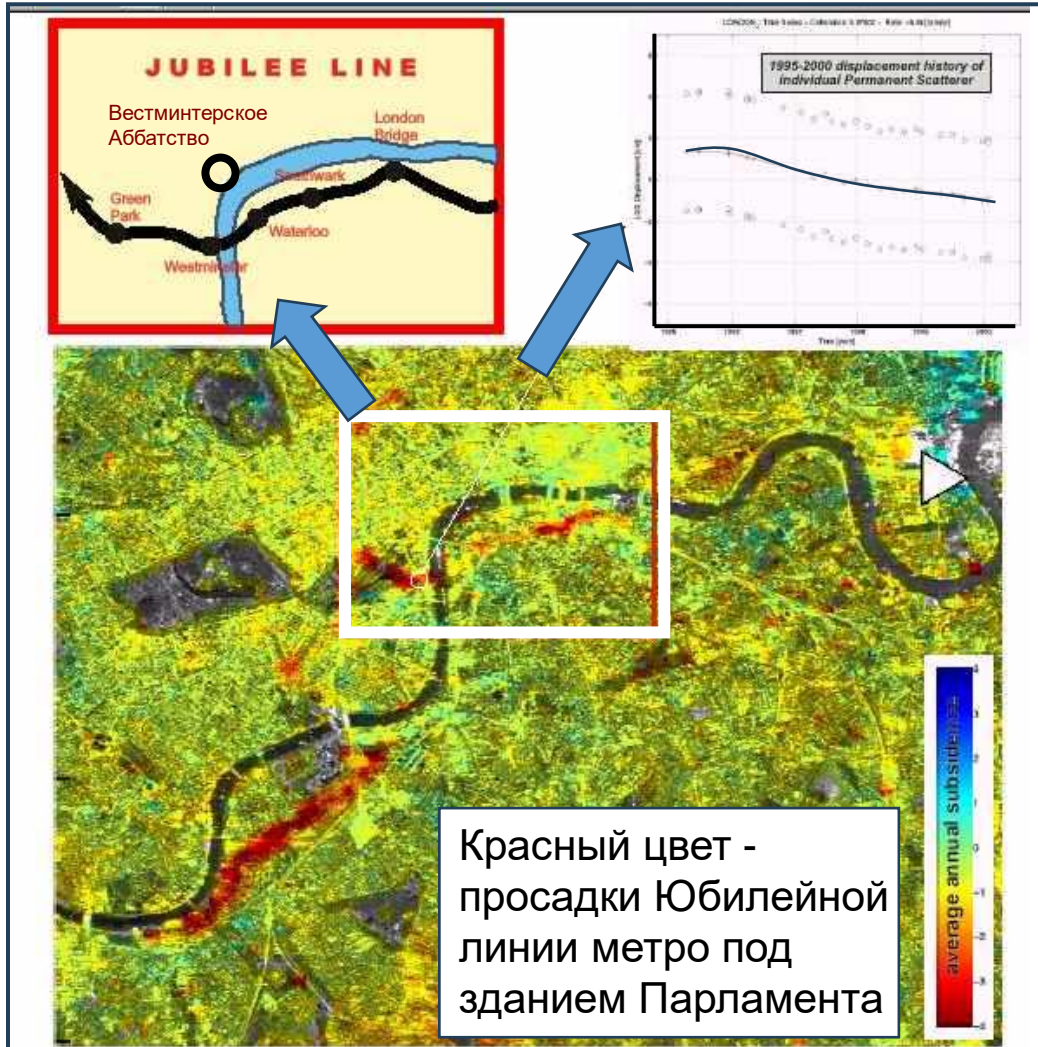


Землетрясение 1992 г. в Калифорнии (магнитуда 7,3)



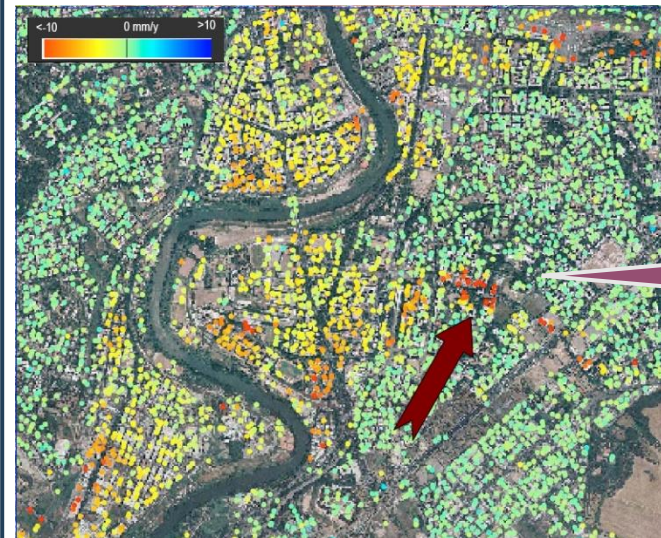
Метод постоянных/устойчивых отражателей (англ.: persistent/permanent scatterers)

Просадки над тоннелем метро в Лондоне
(материалы NPA (Terrafirma))

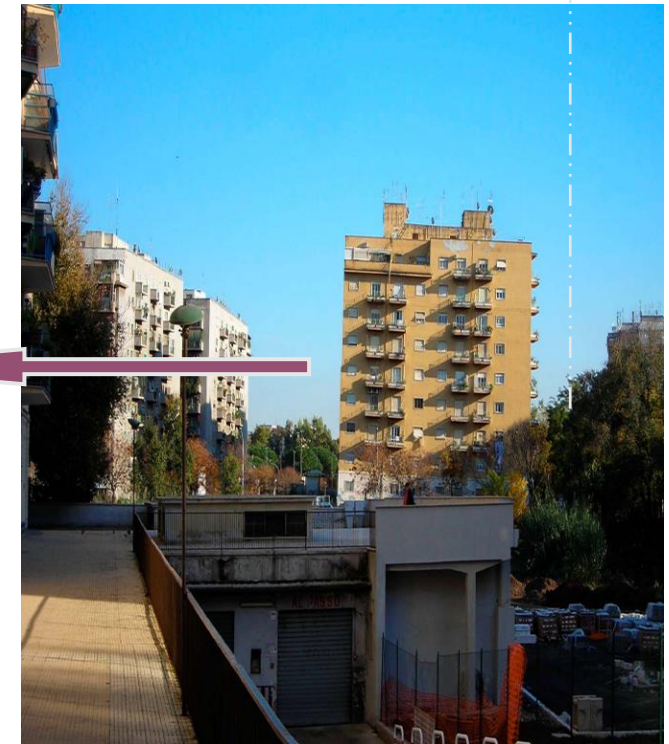


Деформации зданий в Риме

Схема деформаций
земной поверхности
КРДИ ПО



Аварийное здание

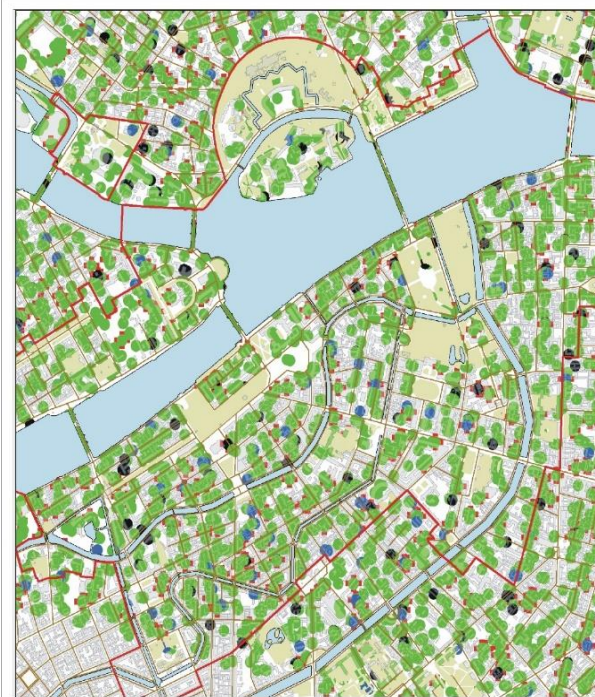
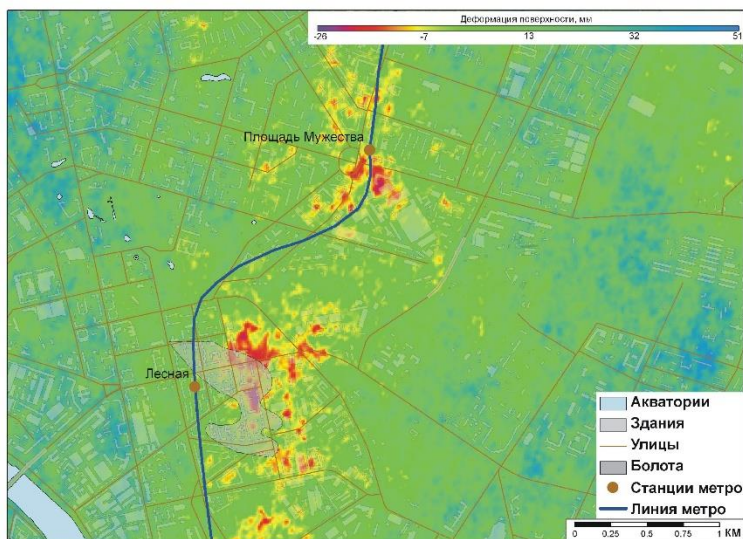


Применение радиолокационной интерферометрии Санкт-Петербург

Дифференциальная
интерферометрия
Эпоха: 1995 – 2007 гг.

Карта
вертикальных смещений
постоянных отражателей
Санкт-Петербург

Пл. Мужества



- Воздымание
- Стабильность
- Проседание
- ⊕ Знакопеременные движения

Применение радиолокационной интерферометрии при мониторинге:

деформаций подстилающей поверхности, вызванных природными факторами:

- получение количественной информации о параметрах сейсмических событий с целью уточнения моделей землетрясений;
- оползни – мониторинг скоростей смещений для оценки риска схода оползня;
- деградация ледников из-за потепления климата;
- картирование карстовой опасности;
- деформация поверхности при деградации многолетней мерзлоты.

деформаций подстилающей поверхности, имеющих техногенную природу (горные выработки (шахтные поля, просадки дневной поверхности при откачках углеводородов на нефтегазовых промыслах и на системах водоснабжения подземными водами, деформации зданий и сооружений)

В следующие десятилетия особенно актуальной проблемой может стать **деградация многолетней мерзлоты** под влиянием потепления климата - **радиолокационный мониторинг угроз разрушения зданий и сооружений**

Спектрометрия

Задача: - восстановление вещественного состава земной поверхности и атмосферы.

Развитие шло в направлении повышения спектрального и пространственного разрешения аппаратуры, динамического диапазона, освоения теплового диапазона электромагнитного спектра.

Появились термины – гиперспектральная съёмка, видео-гиперспектральная съёмка.

Пример:

Гиперспектрометр Hyperion (спутник EO-1, *англ.* Earth Observing)

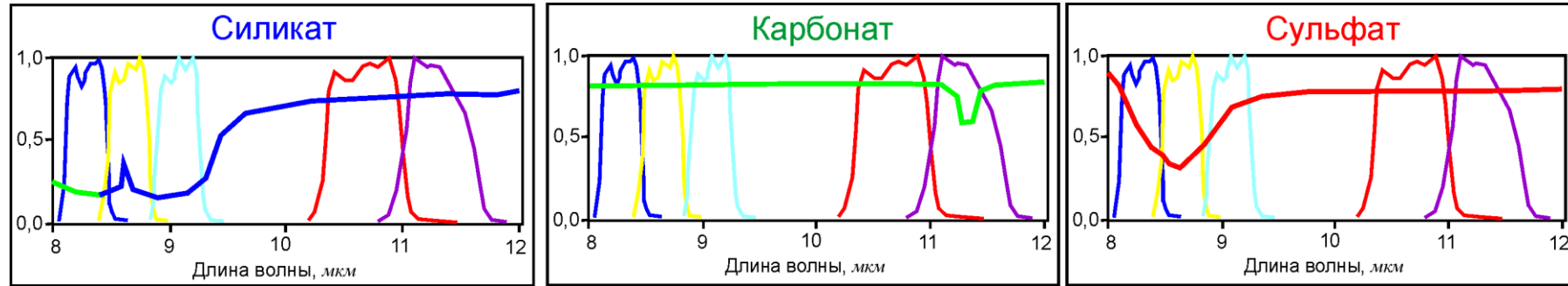
- ширина спектральных каналов - 10 нм;
- квантование сигнала – 12 бит;
- разрешению на местности - 30 м.

Атмосферный спектрометр TROPOMI (*англ.* TROPospheric Ozone-Monitoring Instrument) (спутник Sentinel-5P):

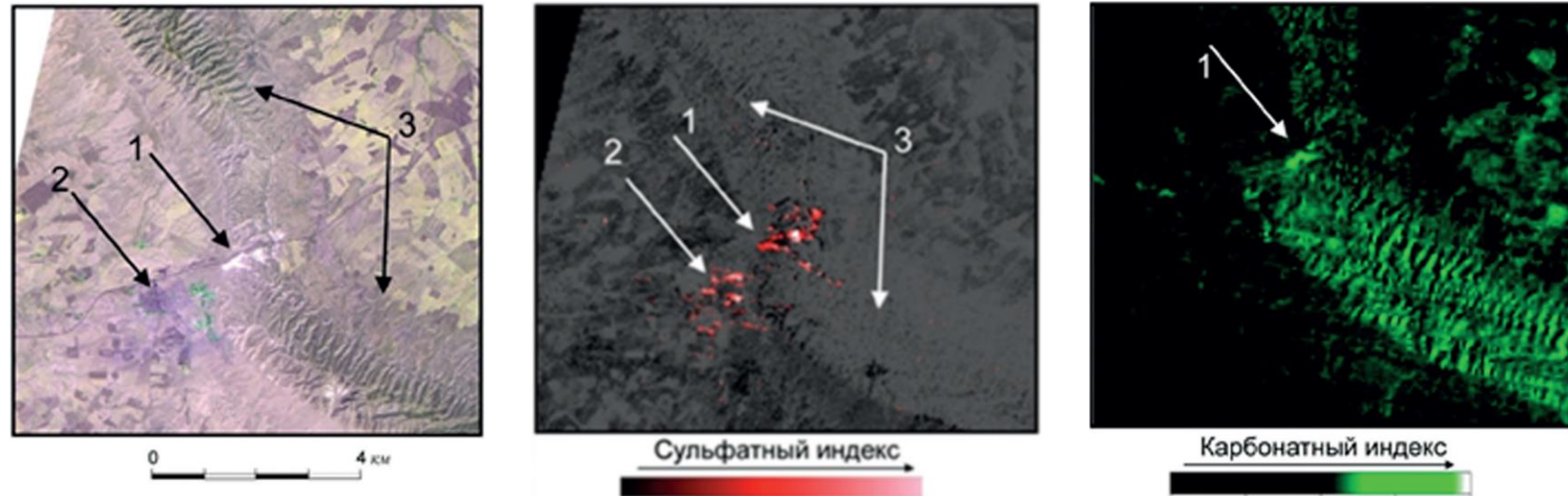
- спектральное разрешение 0,25 нм;
- квантование сигнала – 14 бит;
- пространственное разрешение - 7 км

Спектрорадиометр ASTER. 14 спектральных каналов 0,52 – 11,65 мкм

ИК-спектры основных породобразующих минералов



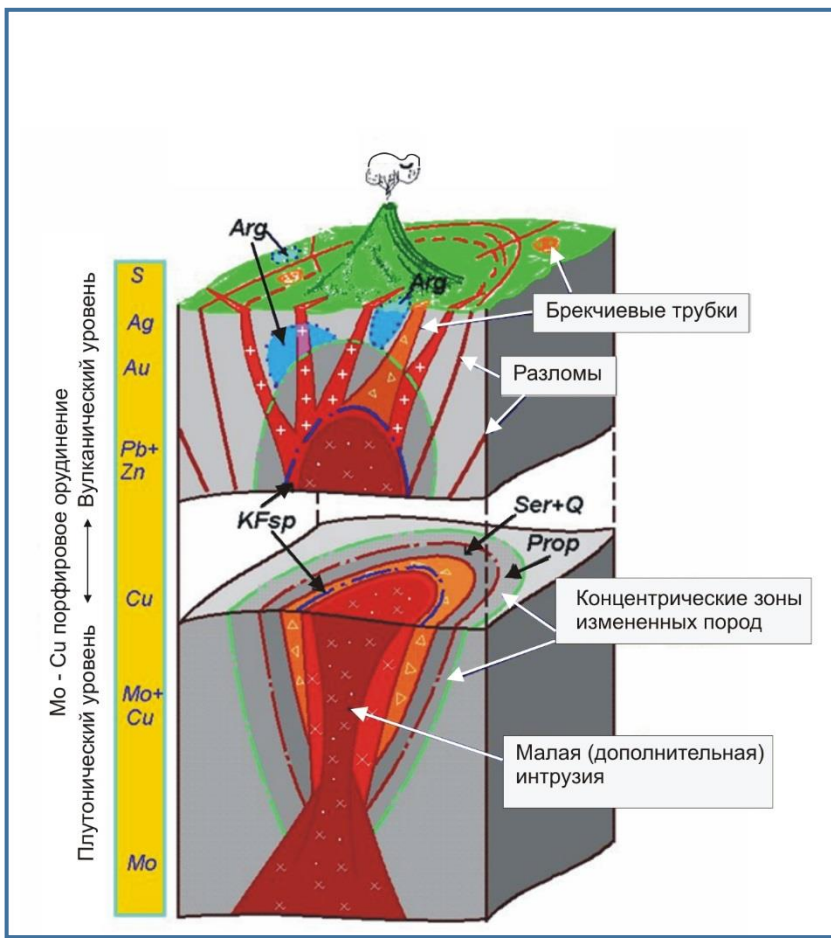
Загрязнение почвы сульфатами при добыче гипса и известняка открытым способом в районе г. Махмур (англ. Makhmour), Ирак:



1 — гипсовый карьер; 2 — сульфатное загрязнение почвы в районе г. Махмур;
3 — гряда Джабал Кварц Чанг, сложенная карбонатам

Порфировые рудно-магматические системы

Модель порфировой РМС
(по И.Г.Павловой, 1983).

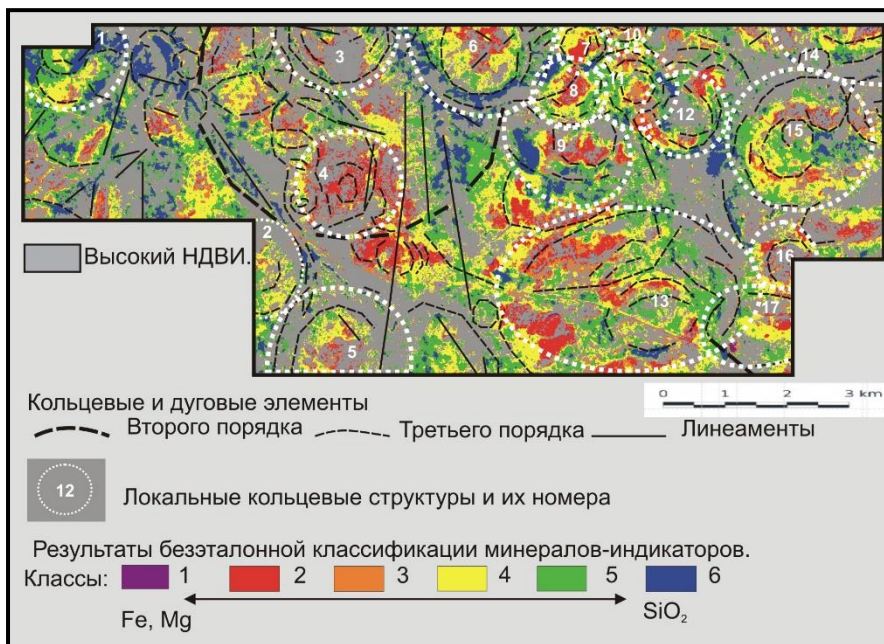


Метасоматиты: *KFsp* – калишпатовые;
Ser+Q – кварц-серицитовые;
Arg – аргиллизиты и вторичные кварциты;
Prop – пропиллиты.

Поисковые признаки:

- иерархическая система кольцевых структур: - мантийный диапир;
- промежуточный магматический очаг; - малая (дополнительная) интрузия $\varnothing \sim 1-2,5$ км.
- монокварцевые штоки и жилы на флангах и в верхней части РМС;
- зональное размещение гидротермально-метасоматических изменений.
- турмалинизация, огипсование, ангидритизация, цеолитизация и др.;
- зоны окисления сульфидов – железные шляпы.

Классификация

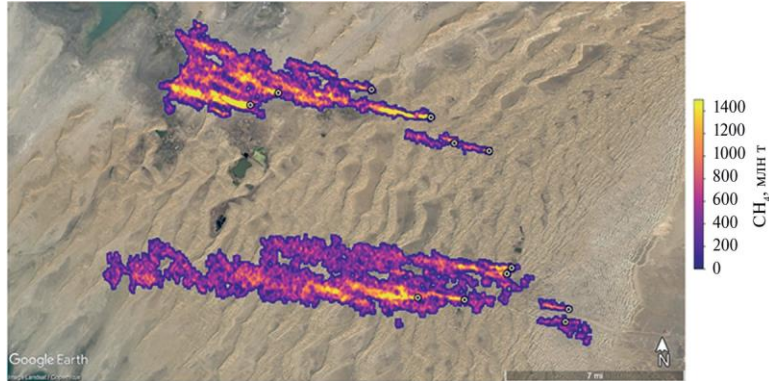


Горный В. И. и др. Особенности минералогической зональности рудно-магматических систем, вмещающих кварцево-жильные месторождения золота (по материалам спутниковой спектроскопии) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 140–156. http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2014t3/140-156.pdf.

Мониторинг газовой-пылевой загрязненности атмосферы

Видеоспектрометр EMIT
(англ. Earth Surface Mineral Dust Source Investigation) на МКС

Шлейфы метана п-ов Челекен, Туркмения



Разрешение:

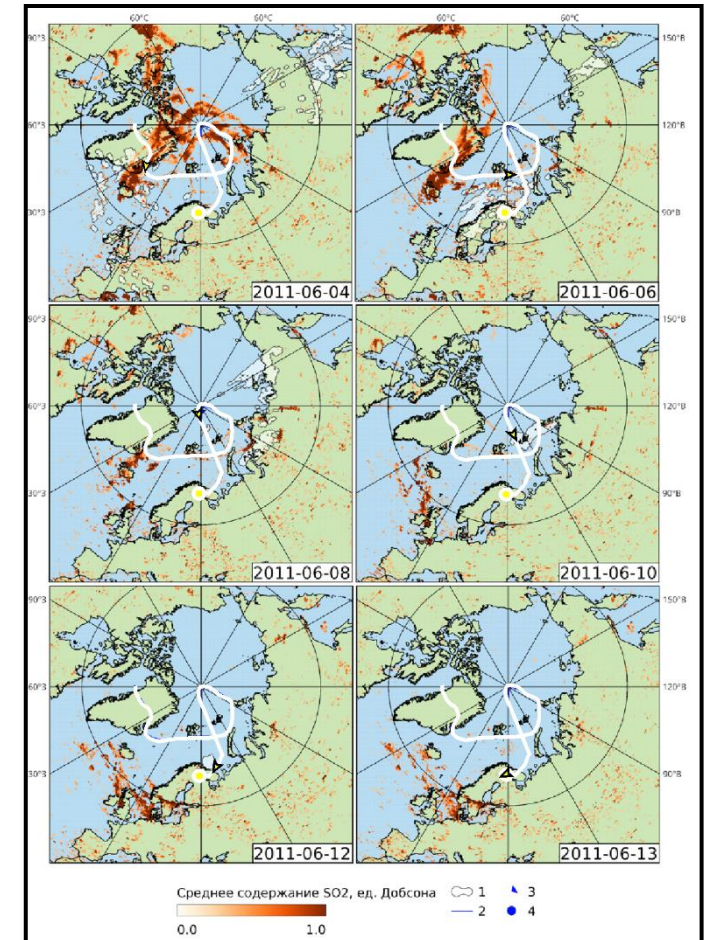
- пространственное 60 м;
- - спектральное - 7,4 нм.
- спектральный диапазон 380–2500 нм

(<https://www.nasa.gov/feature/jpl/methane-super-emitters-mapped-by-nasa-s-new-earth-space-mission>)

Тенденции в спектрометрии:
появление универсальных
(для атмосферы и
подстилающей поверхности)
приборов с рекордными
спектральными и
пространственными
характеристиками;

Комплексирование с
моделями

Вулканическая природа повышения
SO₂ в атмосфере северной Фенноскандии
(OMI)



Е. Д. Дрюкова и др. Известия РАН. АНАЛИЗ ПРИРОДЫ ПОВЫШЕННЫХ СОДЕРЖАНИЙ ДИОКСИДА СЕРЫ В ПРИЗЕМНОМ ВОЗДУХЕ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ФИНЛЯНДИИ ПРИ ПОМОЩИ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Физика атмосферы и океана, 2023, Т. 59, № 4, стр. 450-460

Анализ данных Д33

Формализованные методы анализа материалов ДЗЗ

Недостатки визуального дешифрирования:

- трудность количественной оценки достоверности результатов;
- зависимость результатов от опыта специалиста-дешифровщика;
- мозг человека не может одновременно сравнивать более двух изображений.

Многоспектральные съемочные системы ДЗЗ сделали невозможным применение визуального дешифрирования материалов таких съемок. Потребовалась разработка формализованных методов анализа.

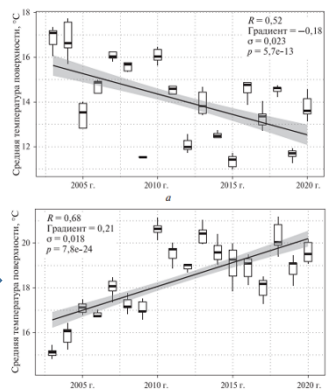
Простейший подход: разработка индексов (НДВИ, Водный, Силикатный, Сульфатный, Карбонатный и т.д.)

Основная проблема – как подобрать оптимальную комбинацию дистанционно-измеряемых характеристик?

И.М. Михайленко, В.Н. Тимошин. Развитие индексной парадигмы в дистанционном зондировании почвенно-растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. №6. С. 138–150

Архивы - анализ временных рядов

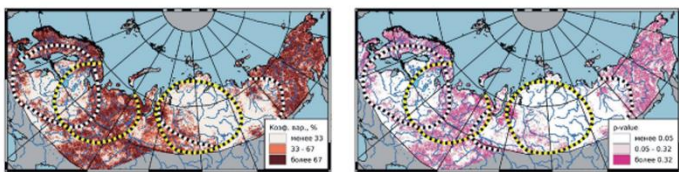
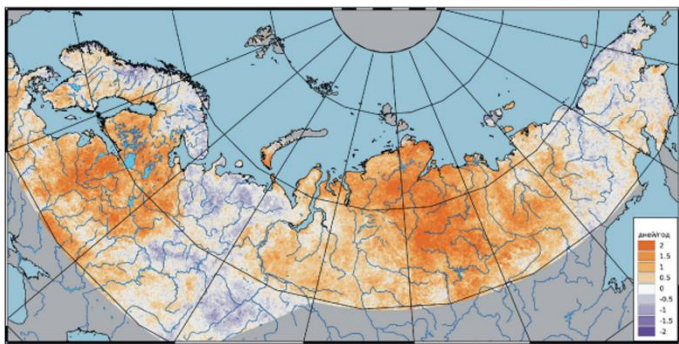
Скорость изменения температур поверхности



Республика Коми

Воронежская область

Скорость изменения продолжительности вегетационного периода Северной Евразии

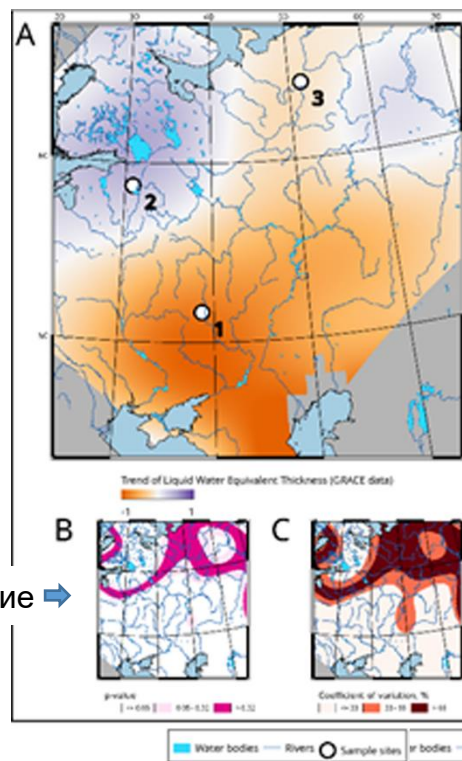


p-значение

Коэфф. вариации

Горный В. И. и др. Спутниковое картирование тепловой реакции подстилающей поверхности Северной Евразии на изменение климата // Современные проблемы ДЗЗ из космоса, 20(2), 2023

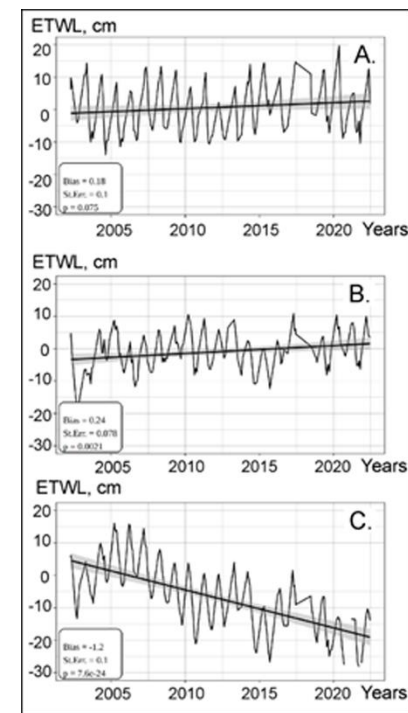
Скорость изменения Эквивалентного слоя влаги (GRACE, GRACE FO)



p-значение

Коэфф. вариации

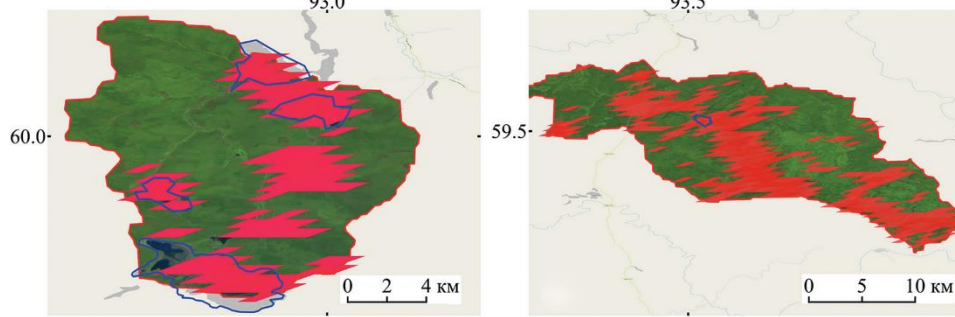
Gornyy V.I. Multiyear variations of soil moisture availability in the East European Plain // 2023. GER. (в печати).



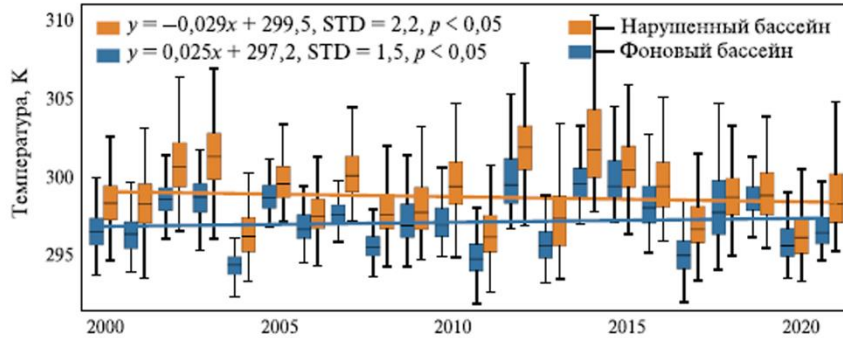
Статистическое направление

Статистический принцип картирования техногенно-нарушенных экосистем

Красные участки – превышение температуры выше порогового уровня

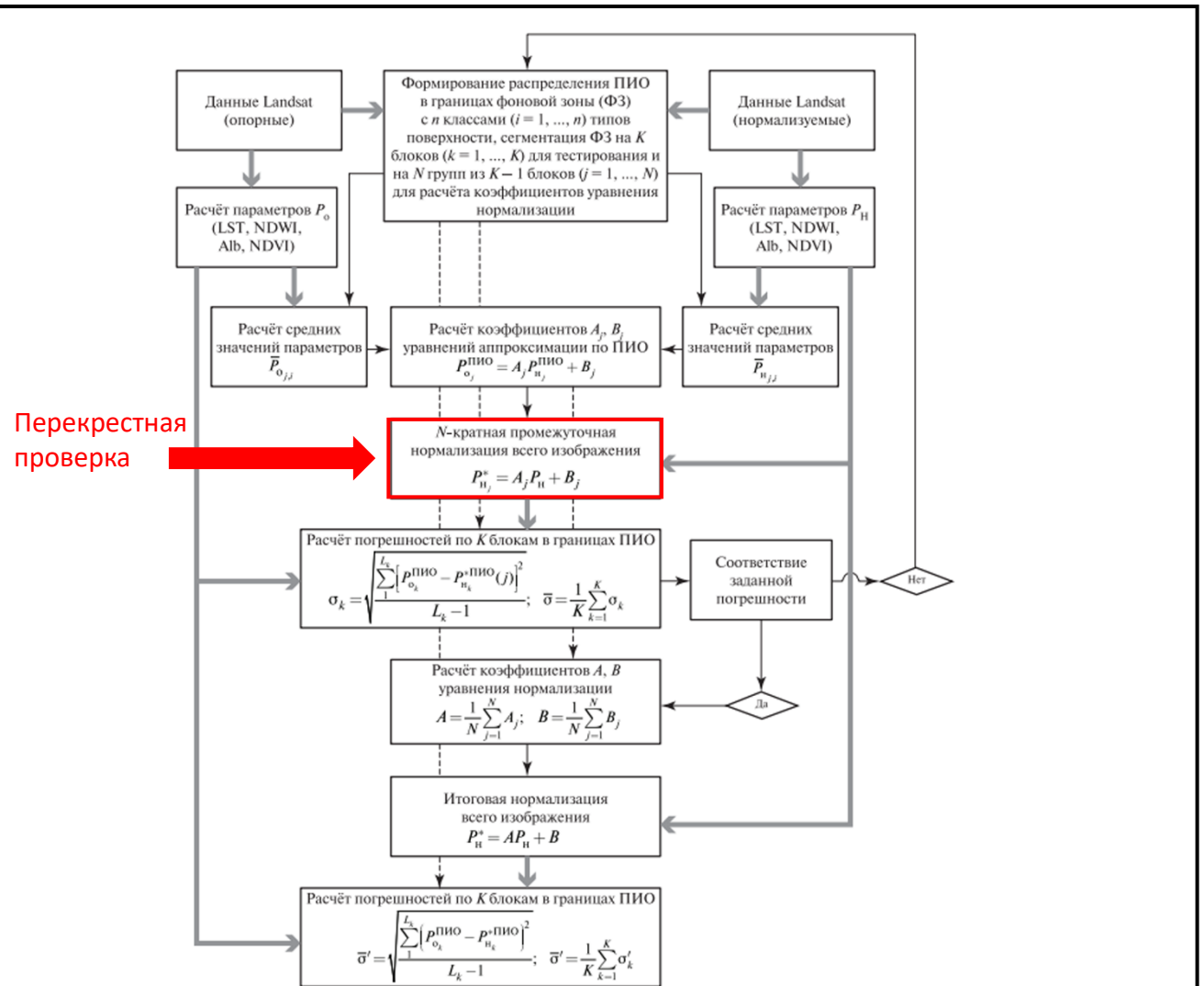


Изменения средней температуры поверхности техногенно-нарушенных и фоновых областей за 2000–2021 гг.



Краснощечков К. В., и др. 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.

Схема информационных потоков при нормализации изображений Landsat с использованием метода K -блочной перекрестной проверки

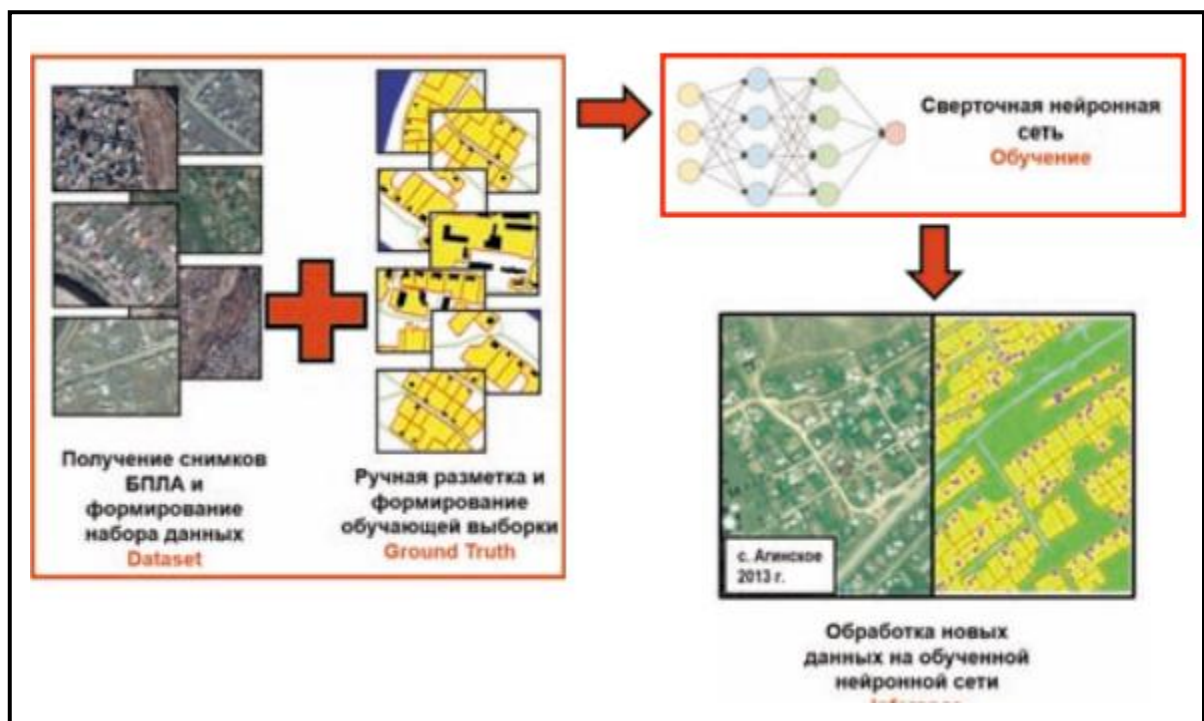


Корниенко С. Г. Характеристика антропогенных трансформаций ландшафтов в районе Бованенковского месторождения по данным спутников Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 106–129.

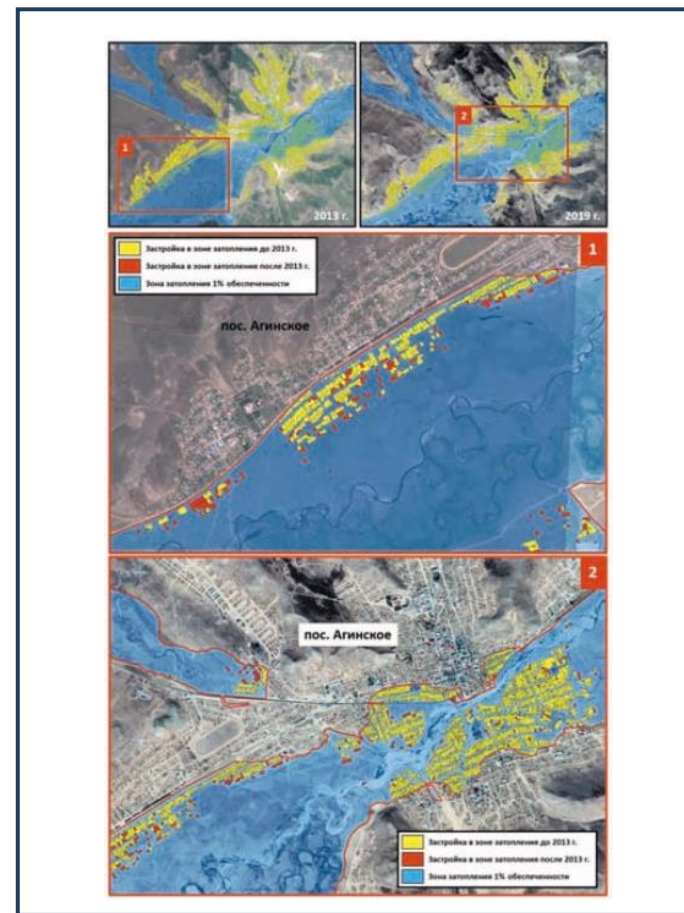
Анализ материалов ДЗЗ с применением искусственного интеллекта

Новое, интересное направление

Семантическая сегментация спутниковых изображений населенных пунктов, подверженных затоплению



Застройка с зоной затопления

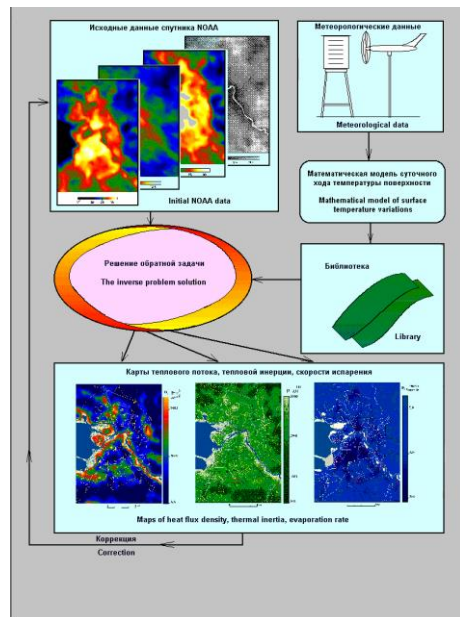


Измерительное направление

Обращение физических моделей

измерение: - концентраций газов в атмосфере; - тепловой инерции, скорости испарения влаги, теплового потока на подстилающей поверхности.

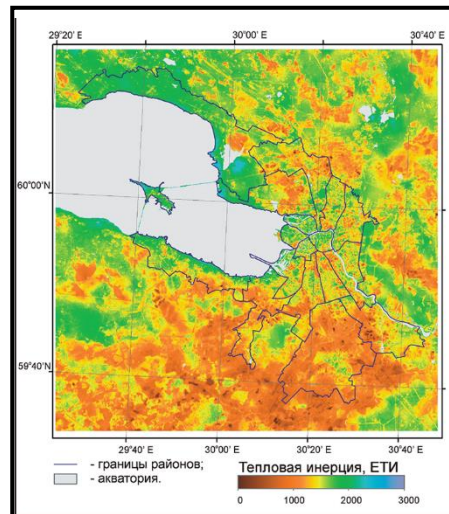
Алгоритм дистанционного картирования тепловой инерции, теплового потока и скорости испарения



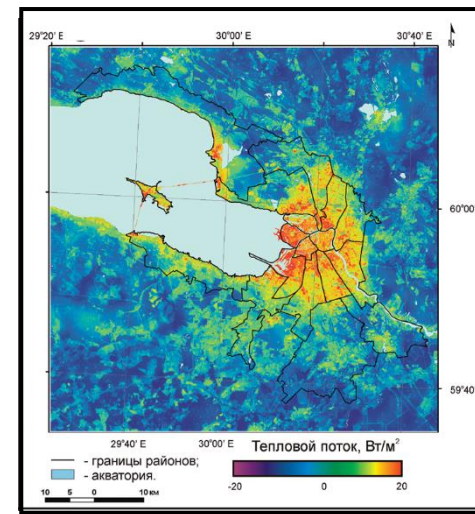
Горный В. И. Космические измерительные методы инфракрасного теплового диапазона при мониторинге потенциально опасных явлений и объектов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2004. Т. 1. № 1. С. 10–16.

Теплофизические свойства поверхности Санкт-Петербурга

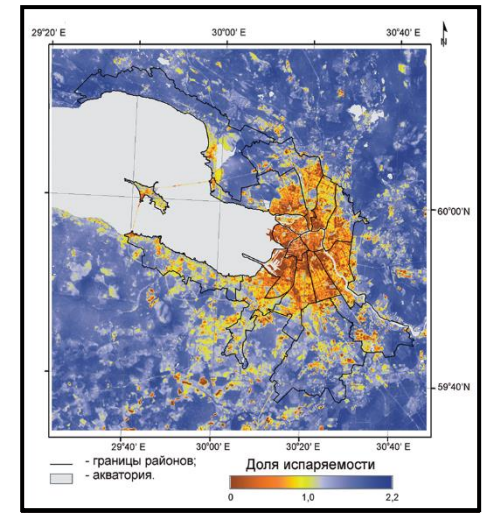
Тепловая инерция



Тепловой поток



Скорость испарения



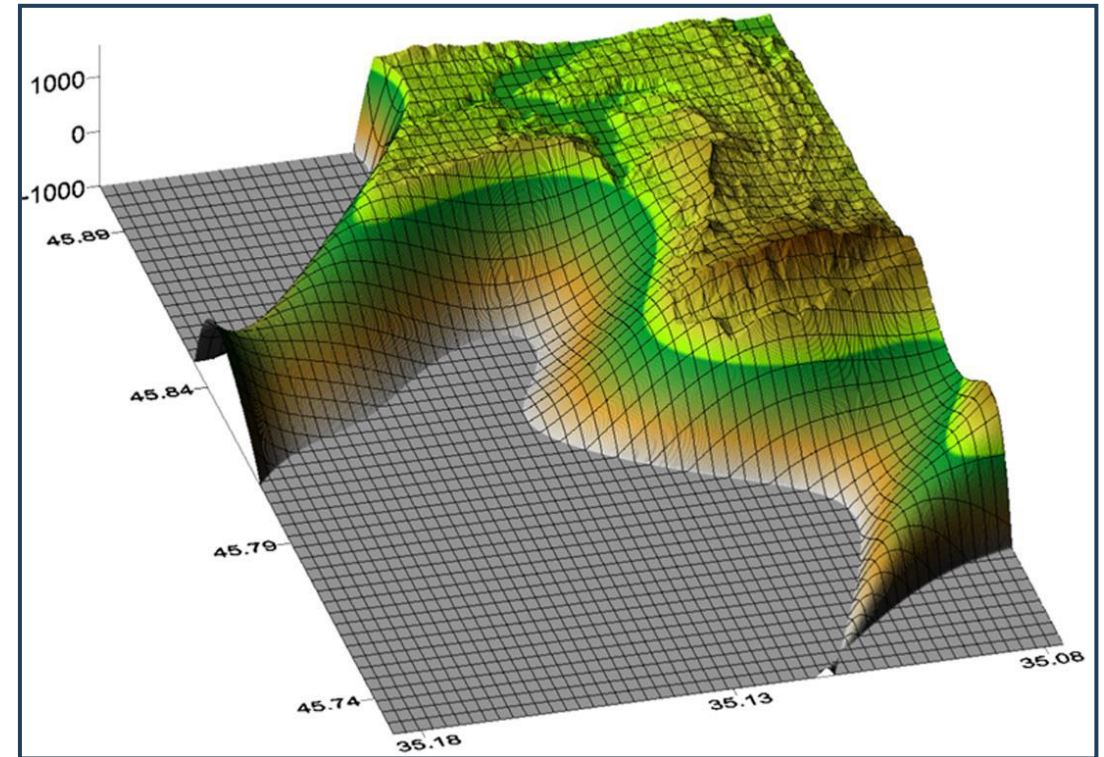
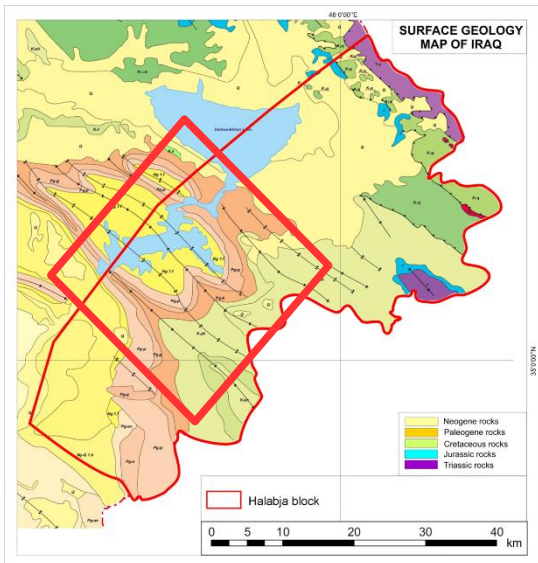
Горный В. И., и др. Теплофизические свойства поверхности городской среды (по результатам спутниковых съемок Санкт-Петербурга и Киева) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 51–66.

Построение моделей погребенных трехмерных геологических структур по материалам стереоскопической съемки

Модель складчатой структуры
(по результатам измерений элементов
залегания пластов)

Материалы:

- снимки Pleiades (разрешение 0,5 м);
 - цифровая модель рельефа дневной поверхности (шаг по высоте 1 м) - по этим стереопарам.
- Элементы залегания - пакет программ GDAL – 1 1000 элементов залегания пластов.



Сверхразрешение

Основные вопросы:

Как повысить пространственное разрешение съемочной системы ДЗЗ не уменьшая угол зрения объектива?

Можно ли преодолеть критерий Рэля?

Критерий Рэля

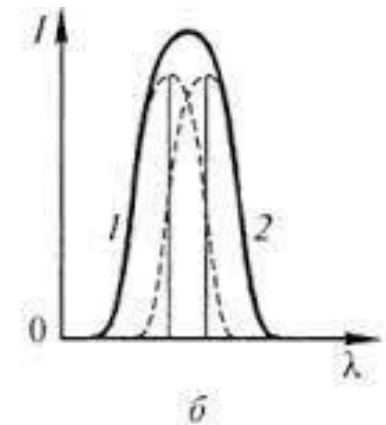
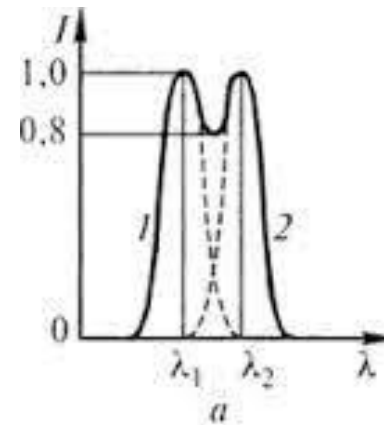
$$\sin \Delta\varphi = 1.22 \lambda / D.$$

$\Delta\varphi$ – угловое разрешение съемочной системы.

λ – длина волны.

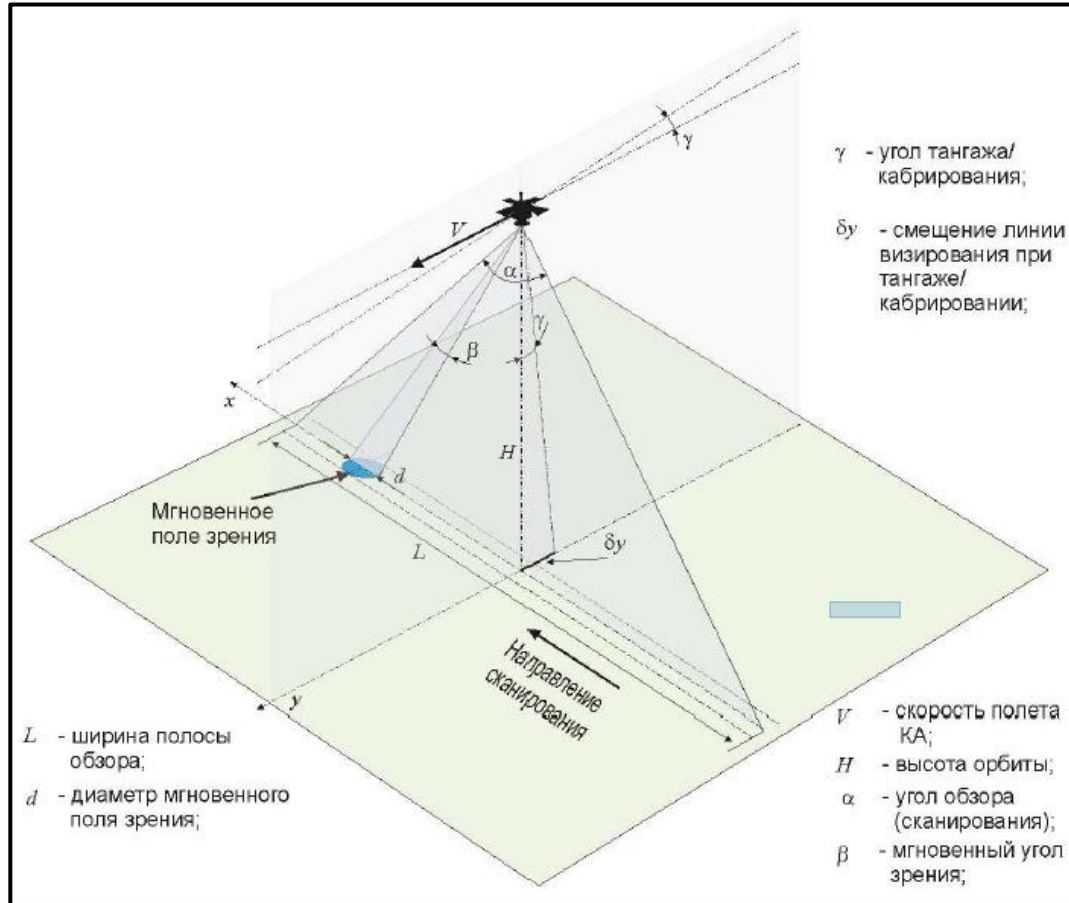
D – диаметр объектива - апертура.

Условие разрешения двух пиков



Новая схема сканирования местности

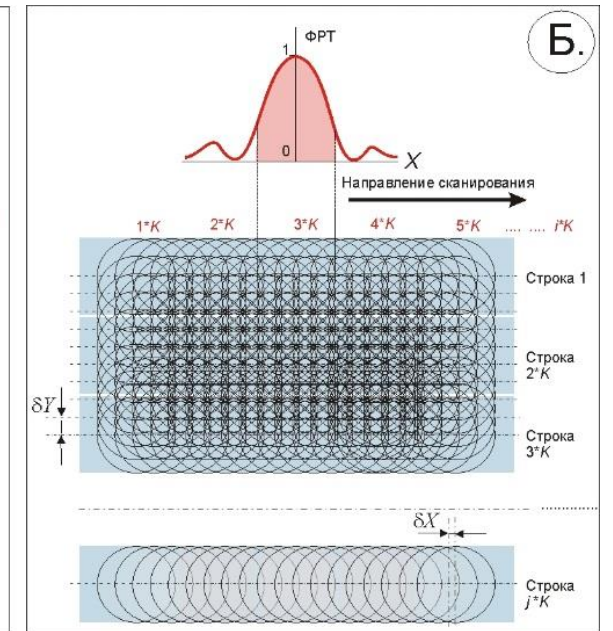
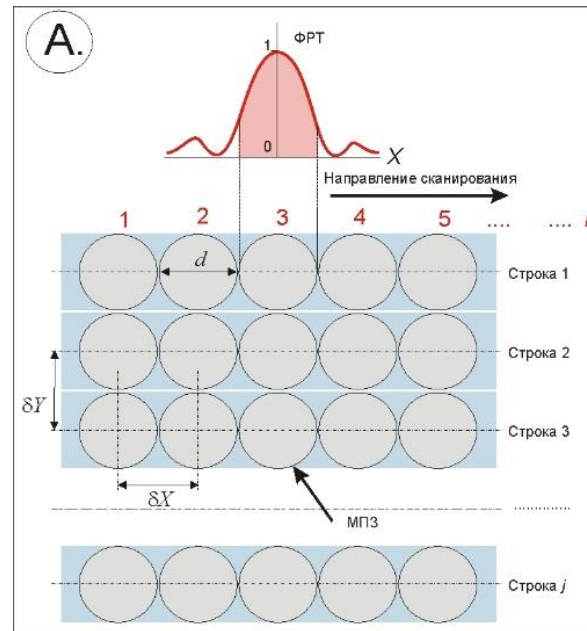
Схема построения изображения подстилающей поверхности



Сканирования подстилающей поверхности:

В обычном режиме

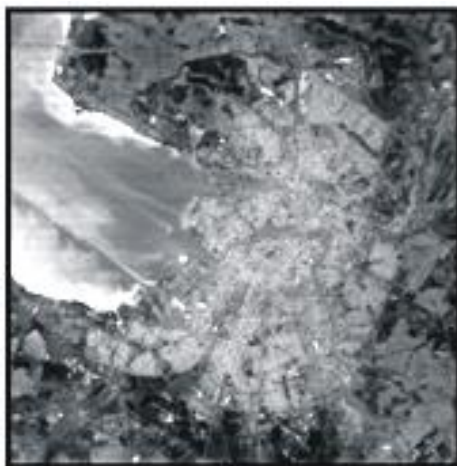
В режиме синтезирования апертуры



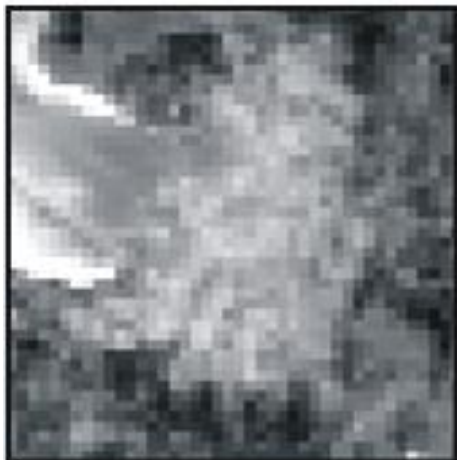
В. И. Горный, И. Ш. Латыпов, В. Н. Груздев; М. И. Кислицкий. ВОЗМОЖНОСТЬ СИНТЕЗИРОВАНИЯ АПЕРТУРЫ СПУТНИКОВОГО ТЕПЛОВИЗОРА // Оптический журнал, 82, 7, 2015. сс. 25-36.

Деконволюция цифрового изображения, полученного в режиме синтезирования апертуры – некорректная обратная задача

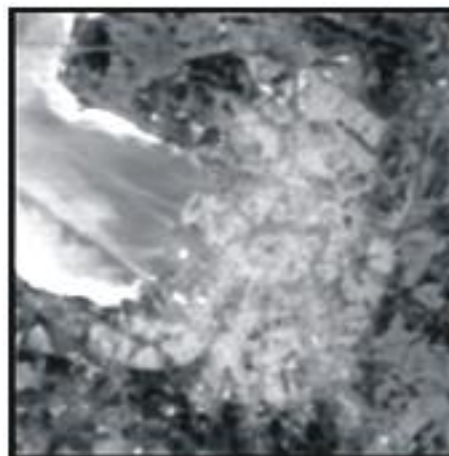
Ночной тепловой снимок
Спутника Landsat TM



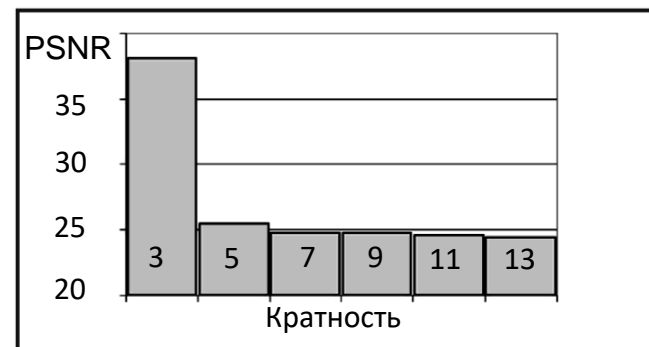
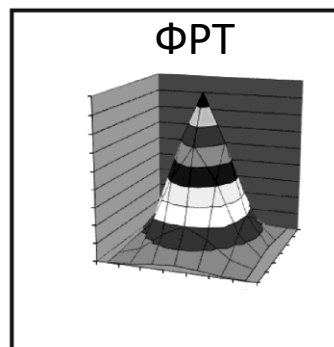
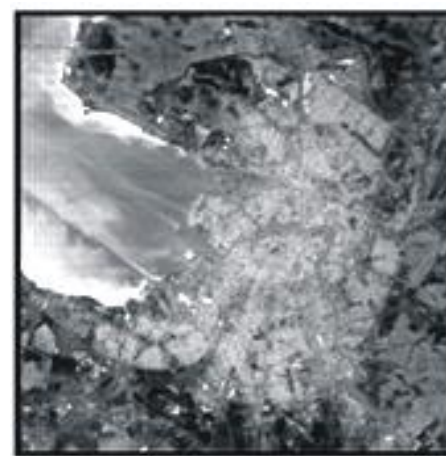
7-кратное
увеличение МПЗ (Обычный режим)



7-кратное
увеличение МПЗ
(Режим синтезирования)



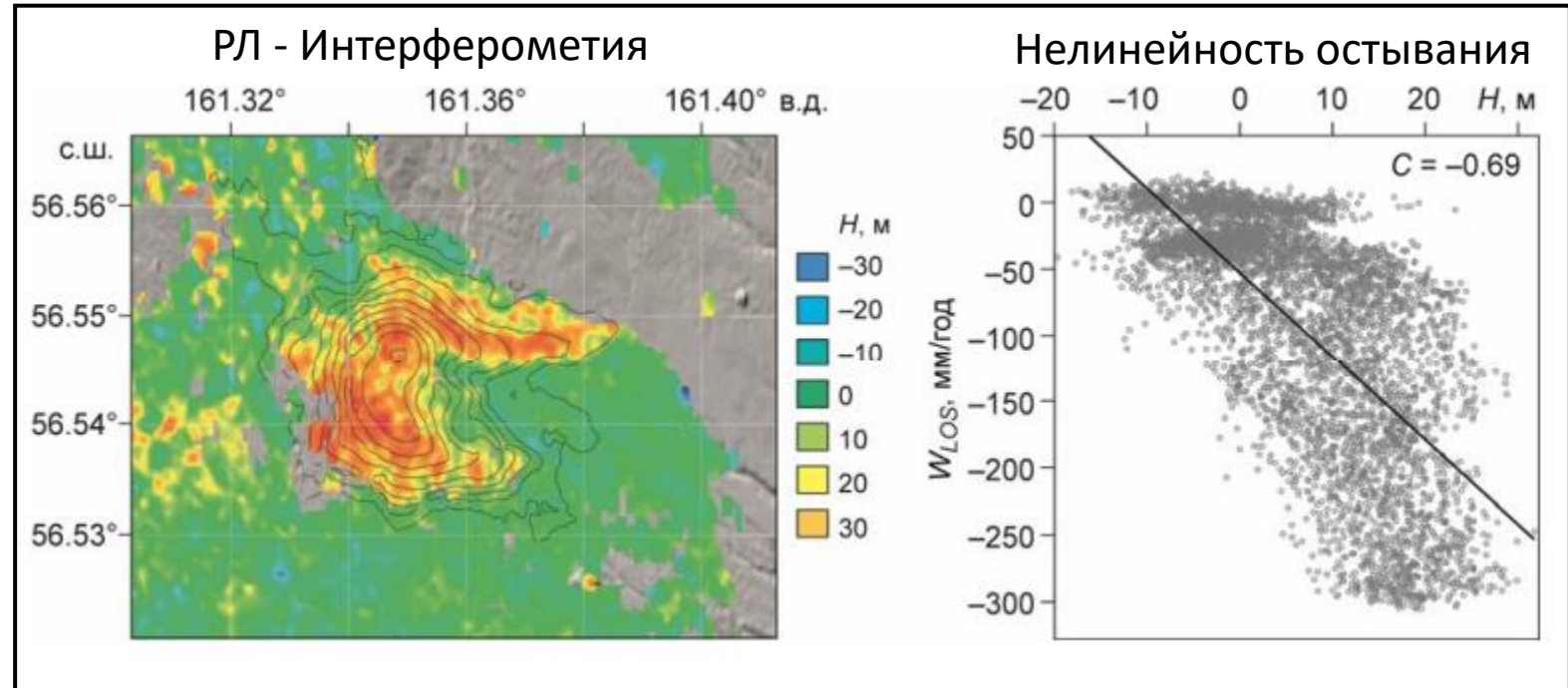
7-кратное
увеличение МПЗ
Деконволюция



В.И. Горный, М.И. Кислицкий, И.Ш. Латыпов. Оценка эффективности алгоритмов синтезирования апертуры сканирующего радиометра // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 7. С. 14–15.

Сравнение результатов ДЗЗ с данными моделирования

Остывание пирокластического потока

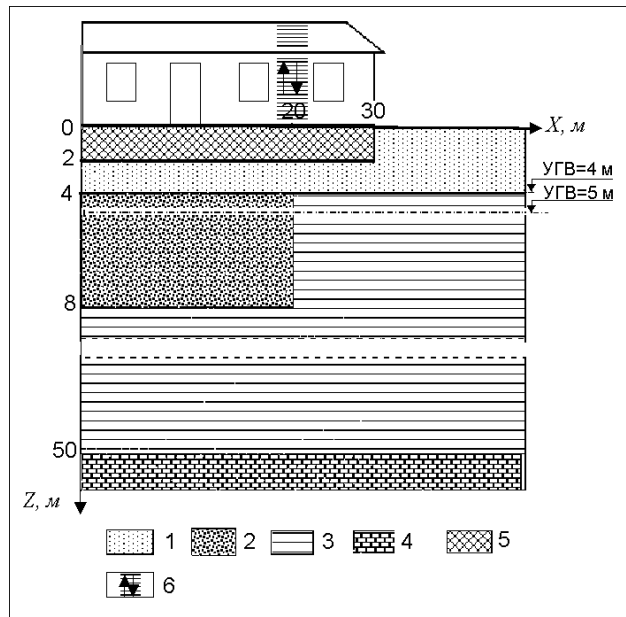


Вывод: - аномально-высокие опускания могут быть вызваны обрушением полостей в лавовом потоке

Знакопеременные вертикальные смещения дневной поверхности РЛ-интерферометрия

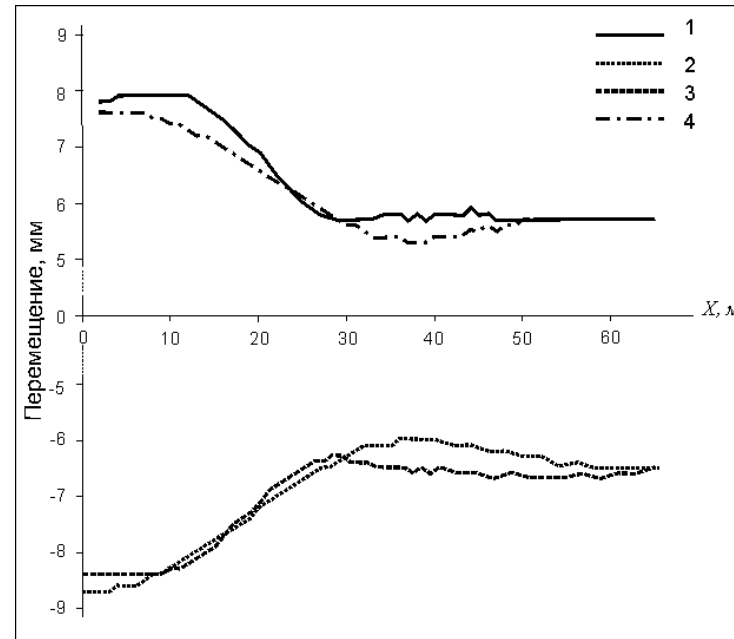
Причина деформаций зданий в Санкт-Петербурге

Модель среды

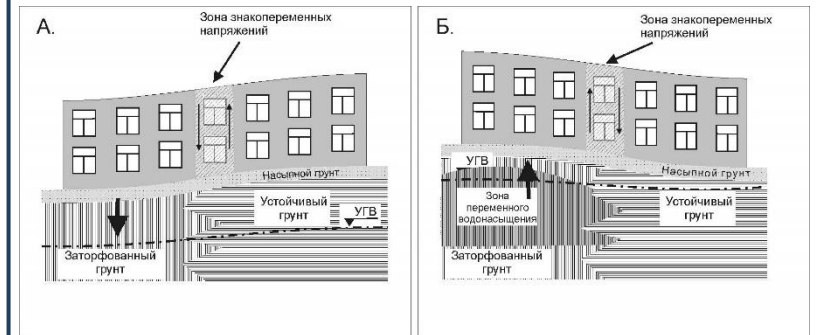


1 – песок; 2 – торф; 3 – глина;
4 – кристаллические породы;
5 – ленточный фундамент здания;
6 – зона возникающих в здании
знакопеременных напряжений

Результаты моделирования



Знакопеременные напряжения



Горный В.И., и др. **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

Для чего применяются модели в ДЗЗ?

Качественные модели:

- для выявления пространственных закономерностей отражения искомых объектов на материалах ДЗЗ.

Математические модели:

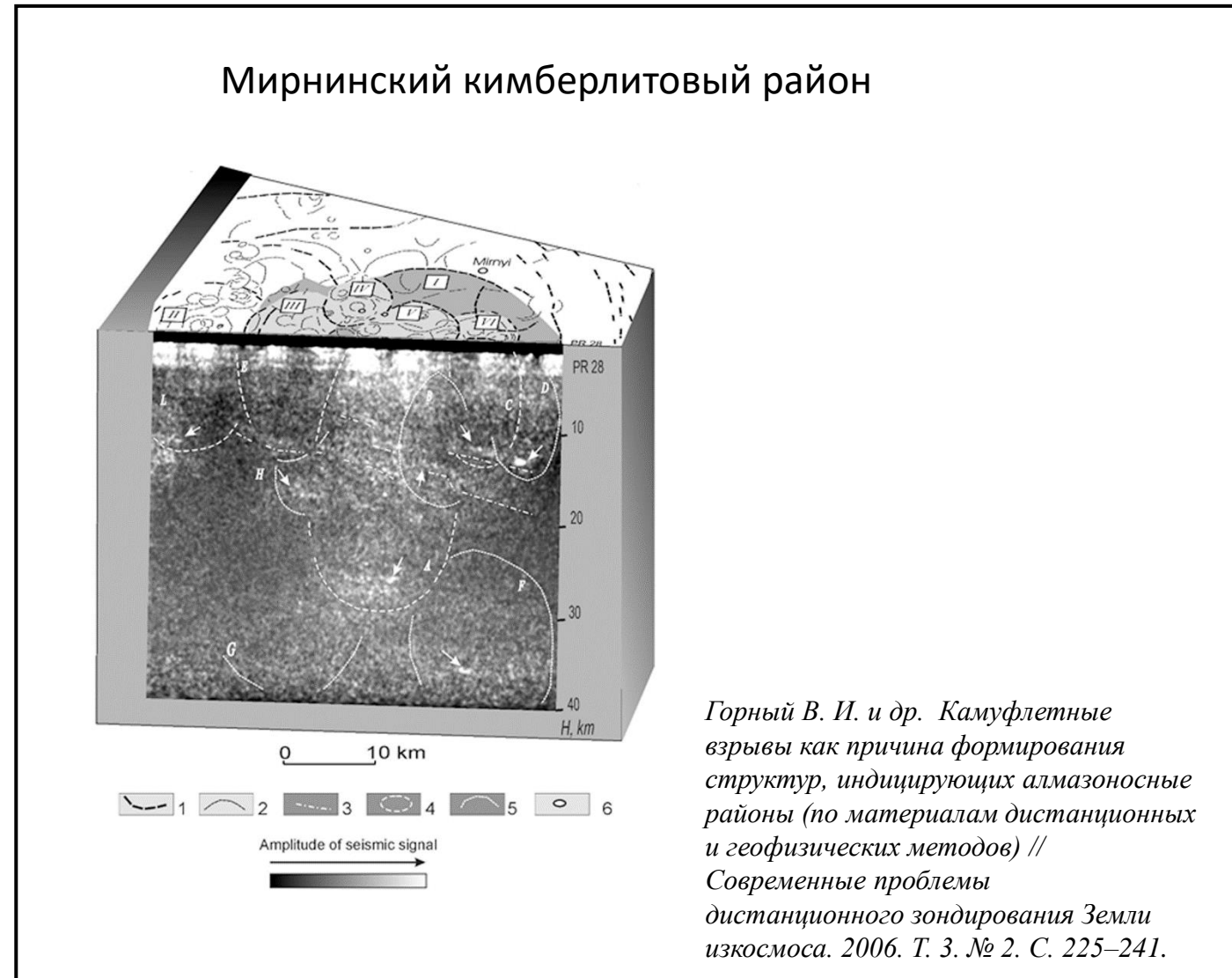
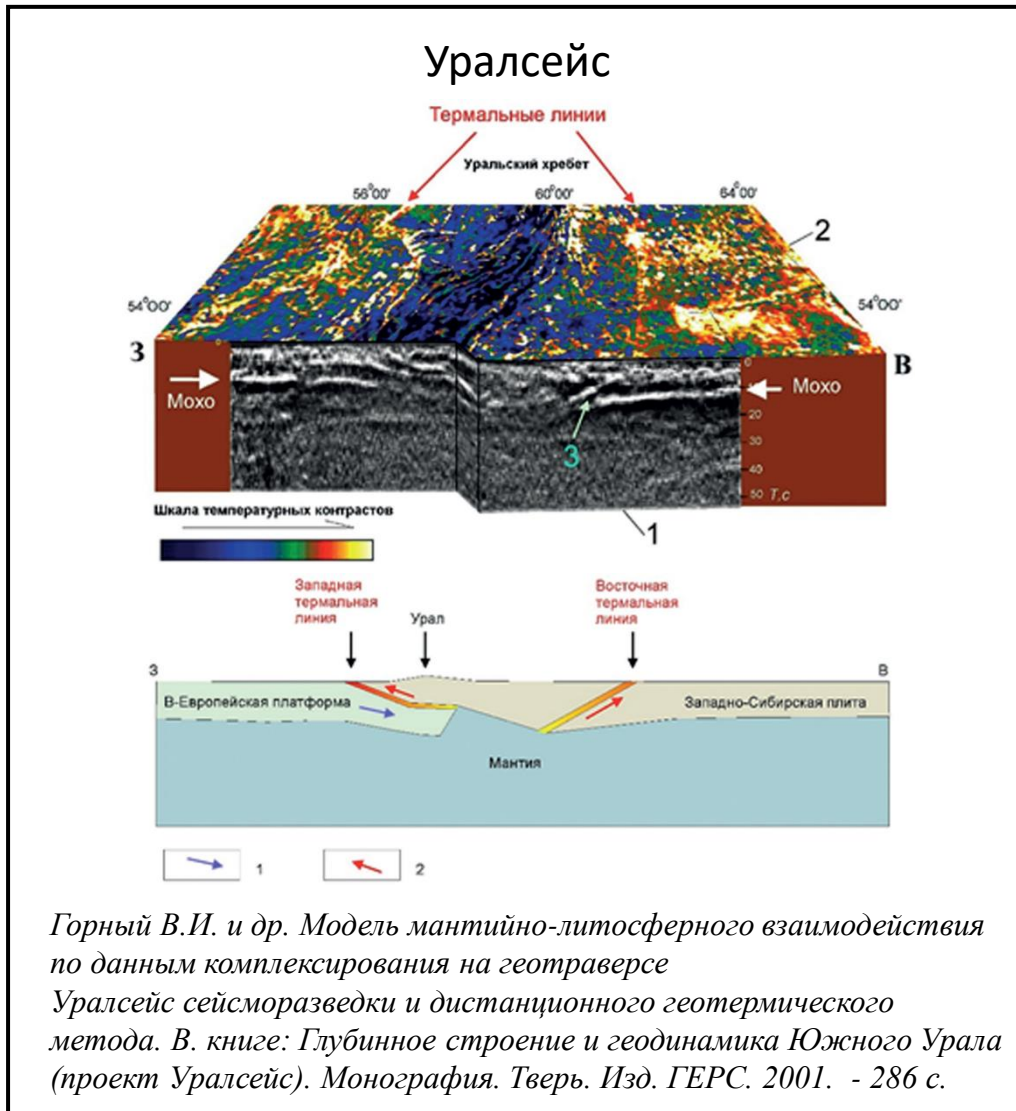
- для подтверждения построенной на основе анализа материалов ДЗЗ гипотезы;
- для выявления неизвестных существенных факторов, которые не учитываются моделью*.

*Народная мудрость :

«Если теория подтверждается наблюдениями – это замечательно! А если не подтверждается, то это интересно»

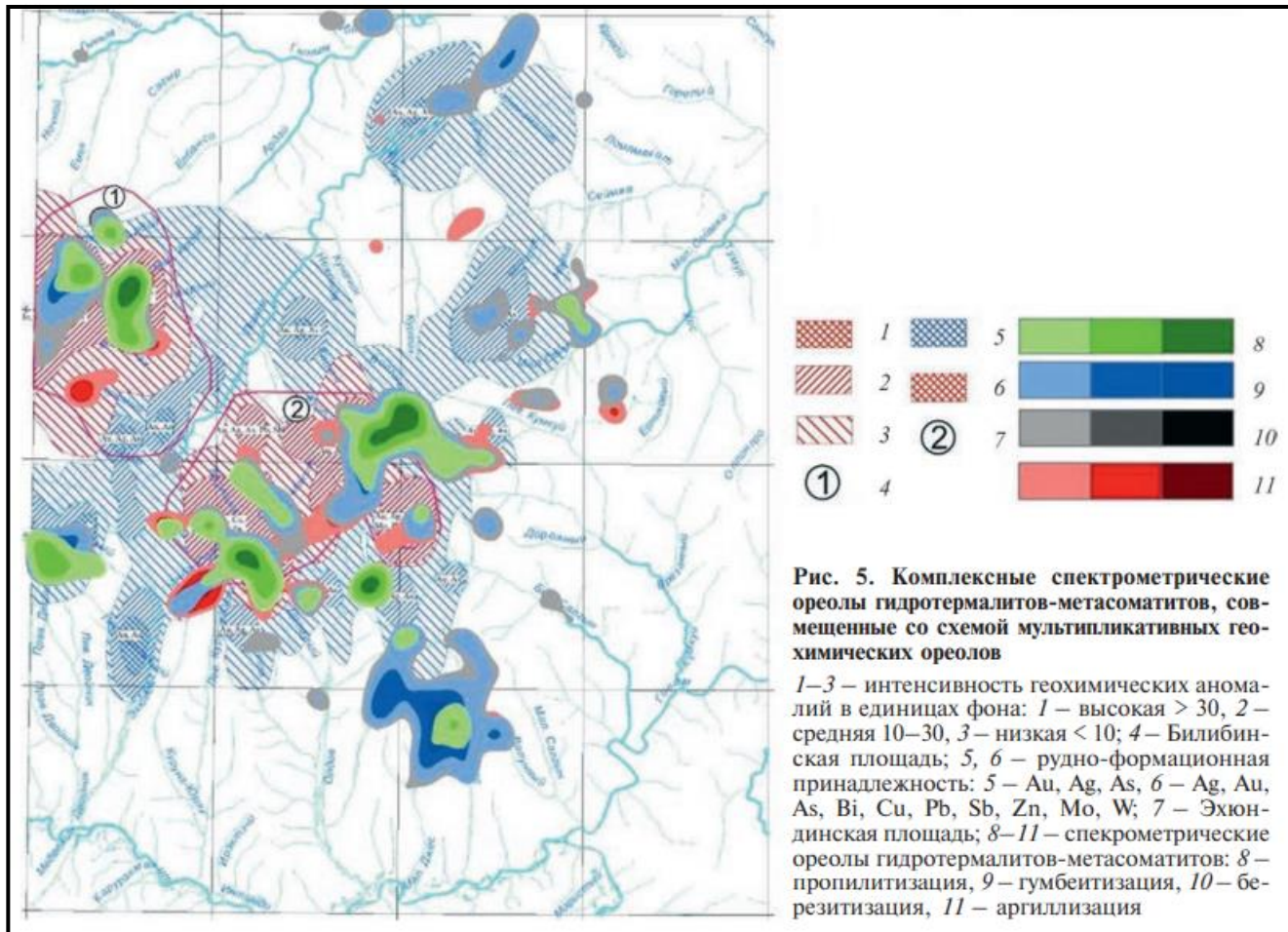
Комплексирование спутниковых материалов с результатами геофизических и геохимических съёмок

Сейсморазведка +ДЗЗ = трехмерные модели геологической среды



Комплексирование спутниковой спектрометрии с материалами геохимических съемок при выявлении околорудных гидротермально измененных пород

Ломамский потенциально золоторудный район
Республика Саха (Якутия)



А. А. КИРСАНОВ, и др. Новый метод выявления околорудных гидротермально измененных пород по космическим гиперспектральным данным на примере Ломамского потенциально золоторудного района, Республика Саха (Якутия) // Региональная геология и металлогения № 86/2021

Изучение строения небесных тел

Проект «Фобос». Съемочная система «Термоскан». Съемка Марса 26.03.1989 г

Главный конструктор
Арнольд Сергеевич Селиванов
(1935—2019)

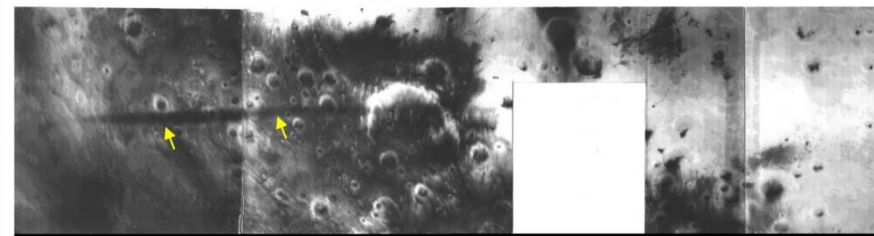


В 1966 г первые съемки лунной поверхности;
В 1975 и 1982 г. съемки поверхности Венеры
в 1971, 1973 и 1989 годах — съемки поверхности Марса

Задача:
Построение карты тепловой инерции Марса

Марсианские Снимки «Термоскана»

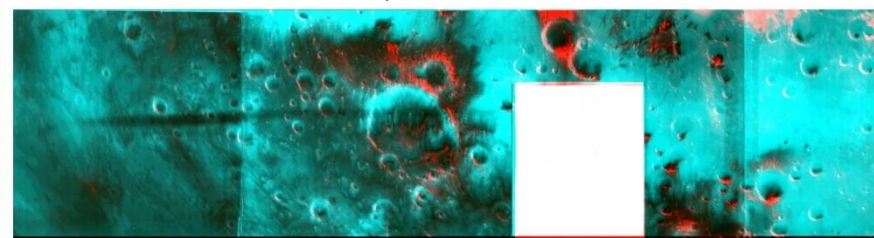
Видимый диапазон



ИК-тепловой диапазон

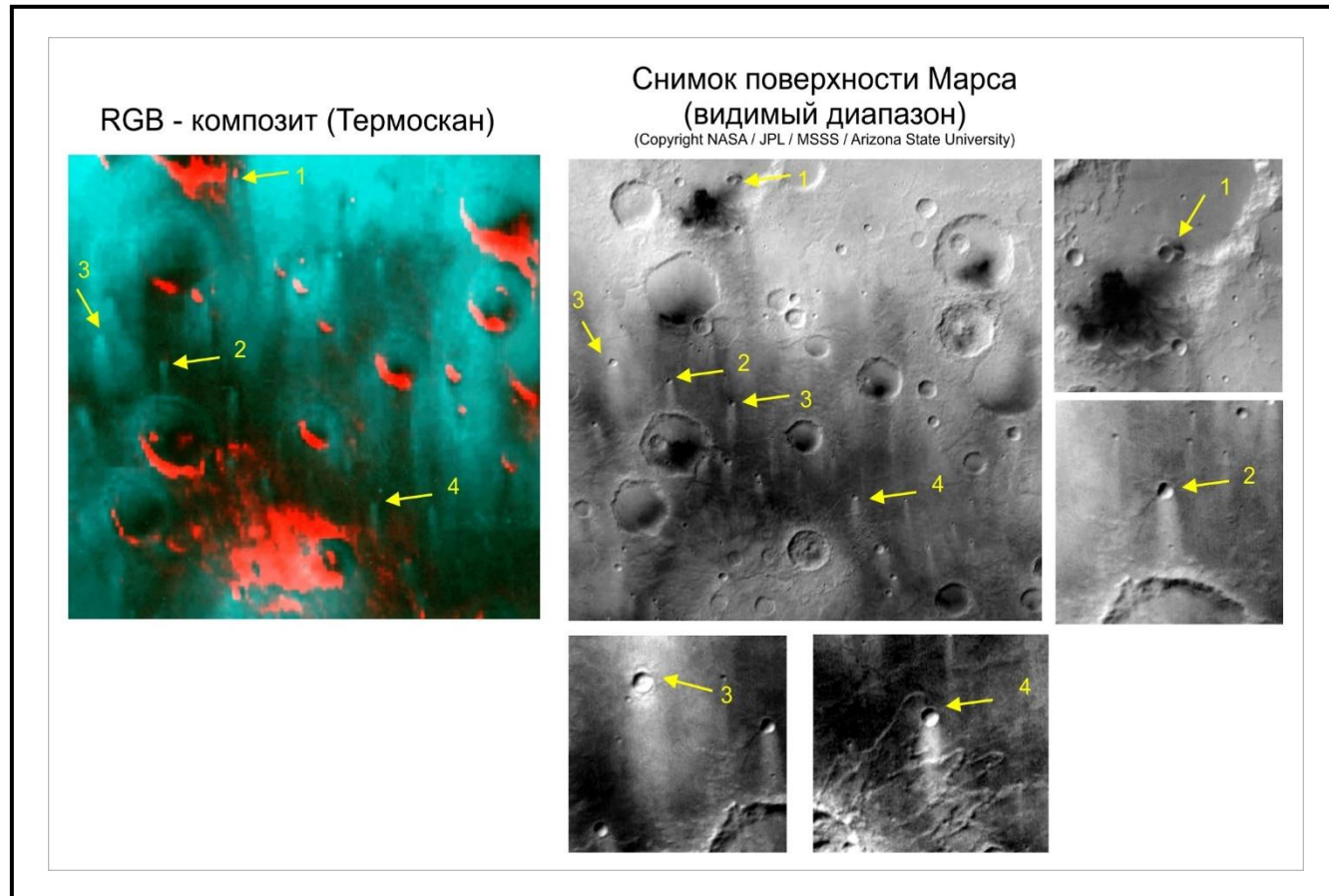


RGB цветовой композит



(Red - ИК-тепловой, G и B - видимый диапазоны)

Результат миссии «Фобос»



Гипотеза:

- шлейфы являются результатом испарения углекислоты или воды в результате повышения температуры поверхности Марса.

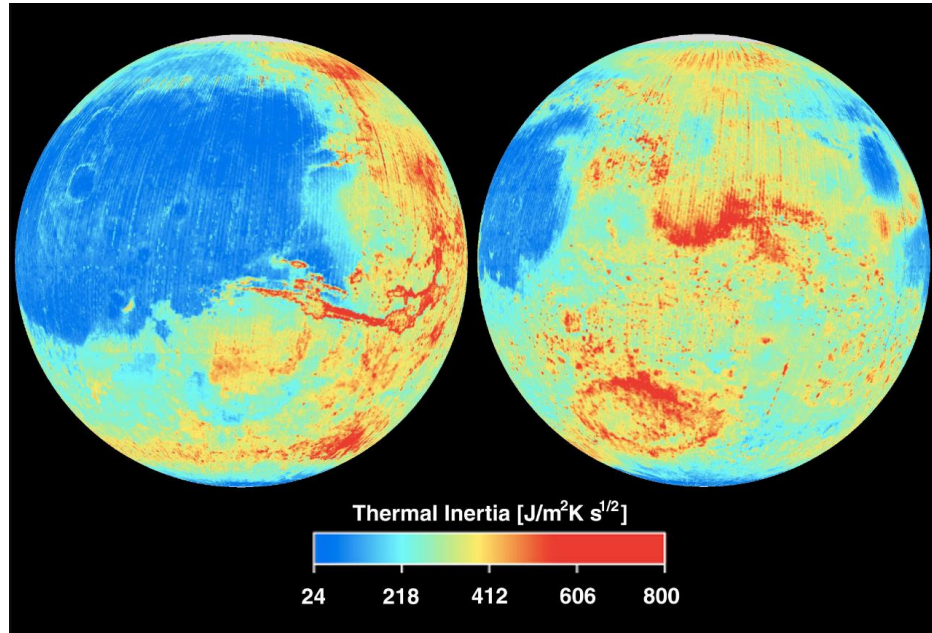
25 лет спустя

Большое количество зондов было направлено к Марсу

Карта тепловой инерции Марса

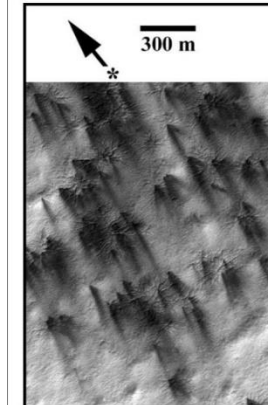


Jan. 17, 2001



На Марсе активно ведутся поиски воды, имеющей высокую тепловую инерцию. В кратер Гейла со спутника Mars Odyssey участки с высокой тепловой инерцией – глина с содержанием воды - до 6%.

Снимок высокого разрешения полярной шапки Марса (по: Greg Orme)



Модель формирования газово-пылевых гейзеров в полярных областях Марса (по: Sylvain Piqueux)

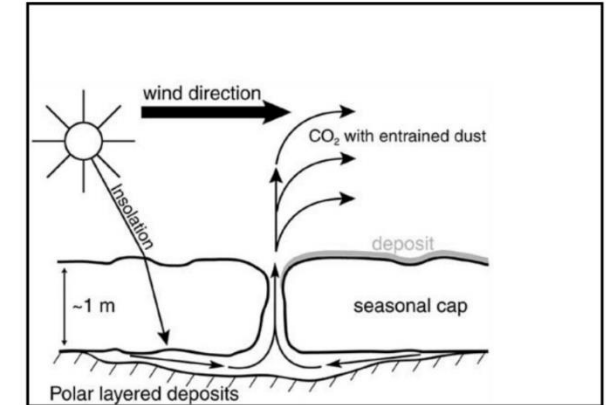


Иллюстрация Рона Миллера (Ron Miller), NASA гипотезы о газово-пылевых гейзерах, возникающих весной в полярных областях Марса



Новые направления применения ДЗЗ

Измерительный спутниковый мониторинг биоопасностей

Опасности:

- угрожающие человеку: – трансмиссивные заболевания человека, возбудители - паразиты, вирусы и бактерии передаваемые переносчиками.

Примеры картирования:

- *риск заболевания боррелиозом в Канаде;*
- *риск заражения холерой по данным спутника цвета и температуры океана;*
- *мест размножения комаров - переносчиков малярии, Конго-крымской лихорадки.*

- сельское хозяйство:

- лесные экосистемы:

- картирование лесов;
- повреждённых сибирским шелкопрядом, короедом-типографом.

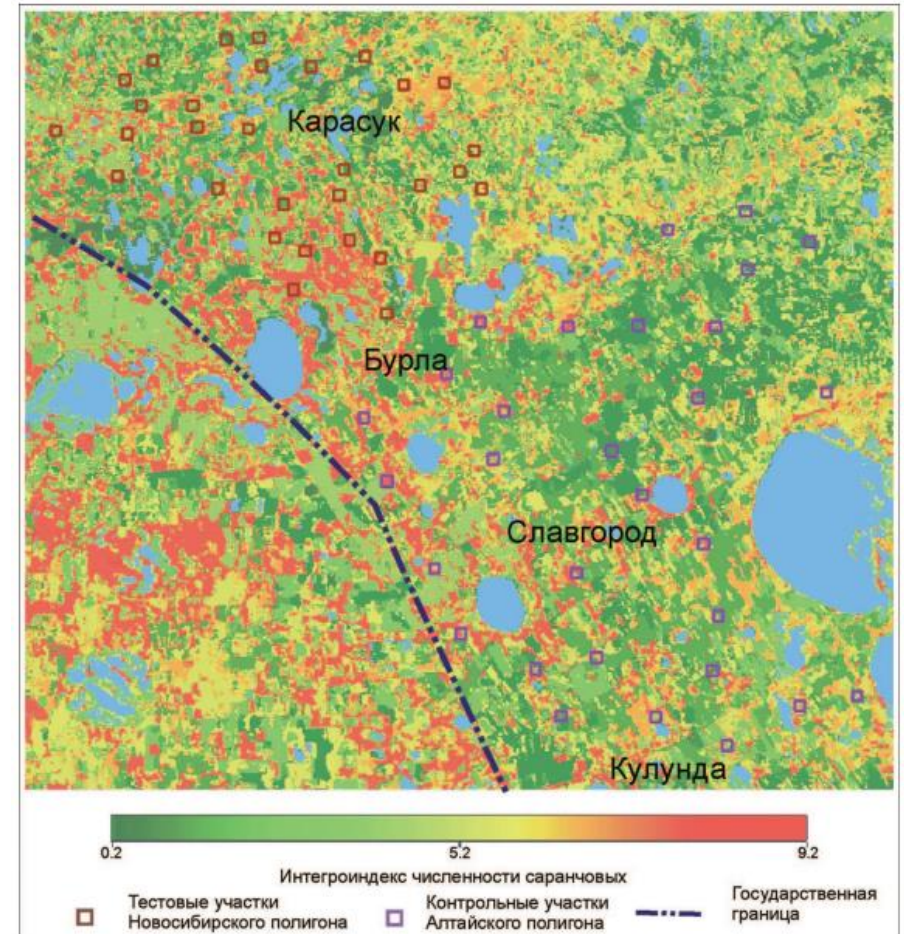
ДЗЗ при парировании угроз массового размножения саранчовых

Прогноз вспышек массового размножения саранчовых (Юг Западной Сибири)



Горный В.И. и др.. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СПУТНИКОВОГО МОНИТОРИНГА САРАНЧОВЫХ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 5. № 2. С. 469-476.

Карта плотности числа саранчовых (по данным ДЗЗ)



Информационная поддержка системы принятия управленческих решений в области экологической безопасности

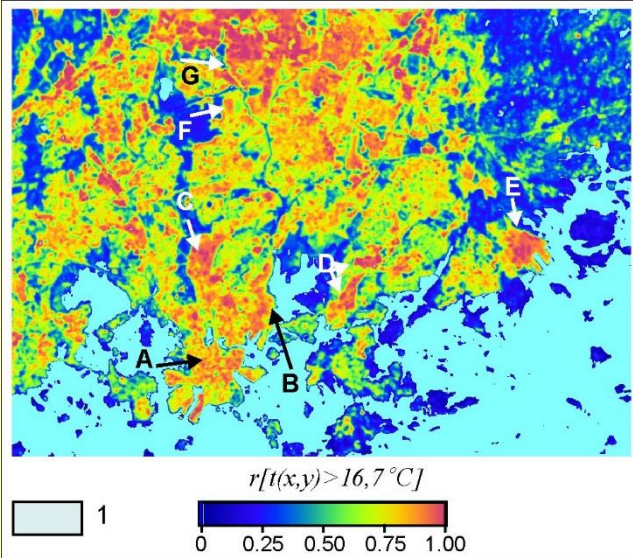
Какая информация нужна для поддержки управленческих решений?

Статистически усредненная за срок ~10-20 лет:

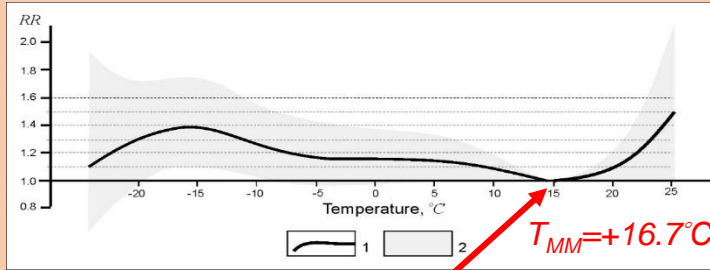
- риски (вероятности) событий;
- математические ожидания: смертей, заболеваний, экономических ущербов.

Риски смерти и ущерба от перегрева городской среды

Карта риска превышения T_{MM}
Risk map of T_{MM} excess

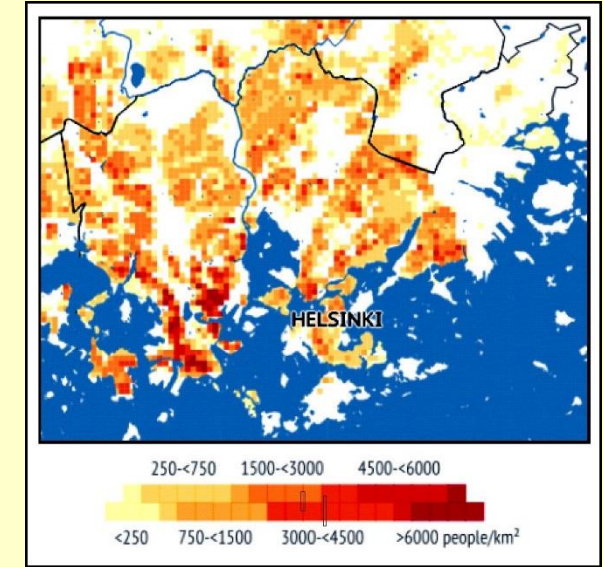


Относительный риск смертности RR
Relative risk of mortality RR

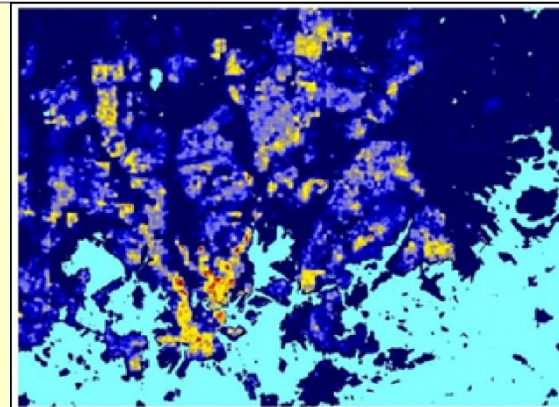


Температура минимальной смертности
Temperature of minimal mortality

Карта плотности населения
Population density



Карта потенциальной ежегодной плотности смертей и ущербов от перегрева
Annual potential specific deaths, caused by overheating



Specific annual deaths/km²
Specific annual economic loss*10⁶ Euro/km²

Результат сбора
эпидемиологической
статистики

Горный В. И. и др. 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.

Горный В. И. и др. 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.

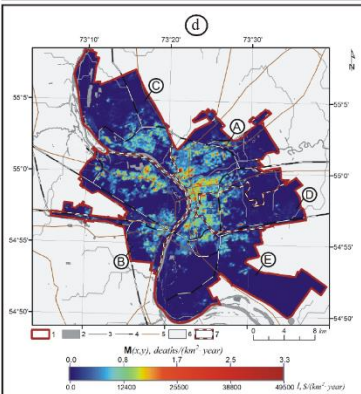
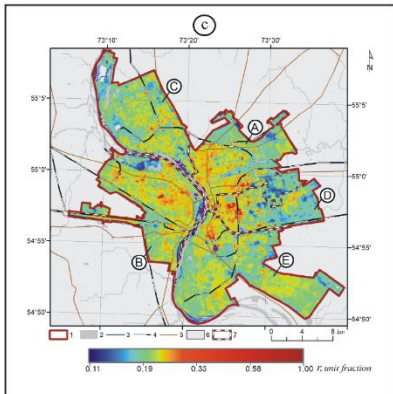
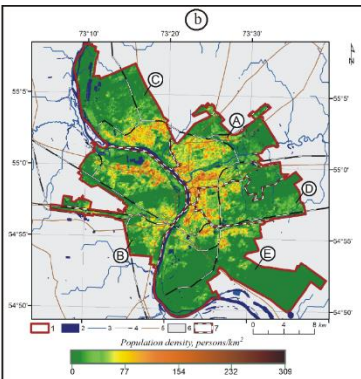
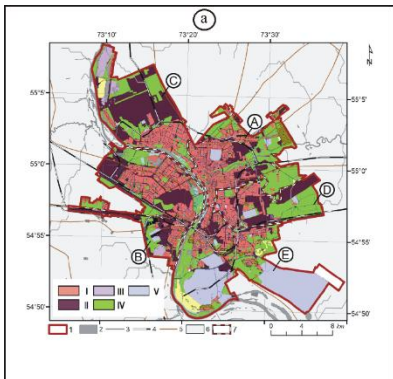
Риски смерти и ущербы от перегрева городской среды

Омск

Ростов на Дону

Функциональные зоны

Плотность населения

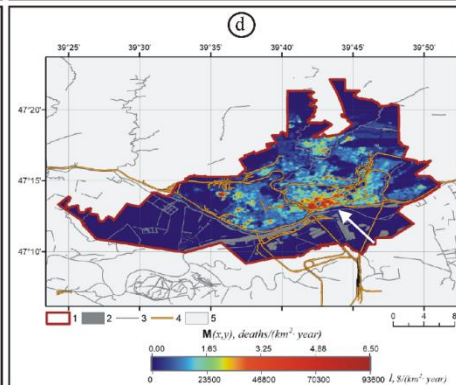
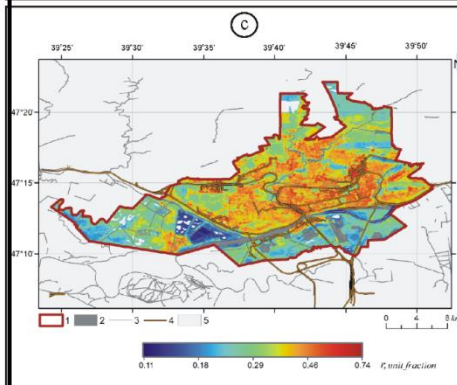
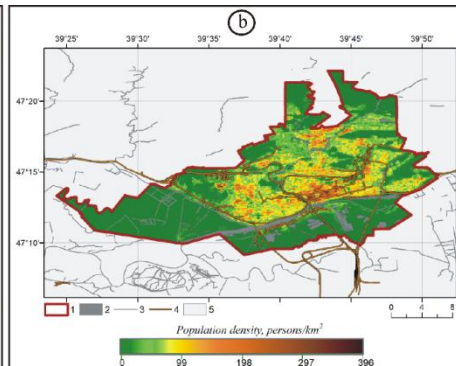
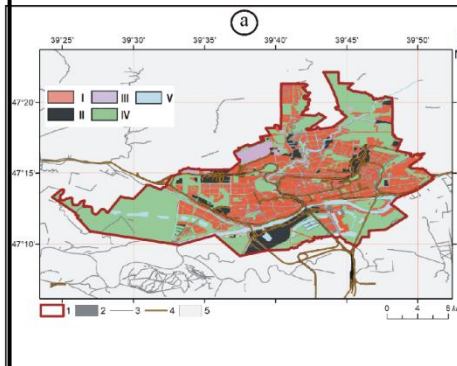


Риск перегрева

Смертность/ Экон. ущерб

Функциональные зоны

Плотность населения



Риск перегрева

Смертность/ Экон. ущерб

Таблица результатов

Смертность от перегрева	Омск	Ростов на Дону
Количество смертей от перегрева, смертей/год:	72	152
Потенциальное количество смертей по данным ДЗЗ, смертей/год:	64	146
Экономический ущерб по данным мед. статистики, млн. руб./год:	101	202
Удельный ущерб: млн. руб./((год • км²):	0,18	0,58
Потенциальный экономический ущерб по данным ДЗЗ, млн. руб./год:	92	194

Термодинамический подход к спутниковому картированию накопленного экологического ущерба лесных экосистем

Продуктивность лесных экосистем:

$$P = E * m_c$$

E - удельная скорость испарения влаги, $кг/(м^2 * сут)$

m_c - масса воды, которую необходимо испарить растению для депонирования единичной массы углерода

$$m_c = 879 \text{ кг}_{H_2O} / \text{кг}_C$$

D — показатель экологического вреда

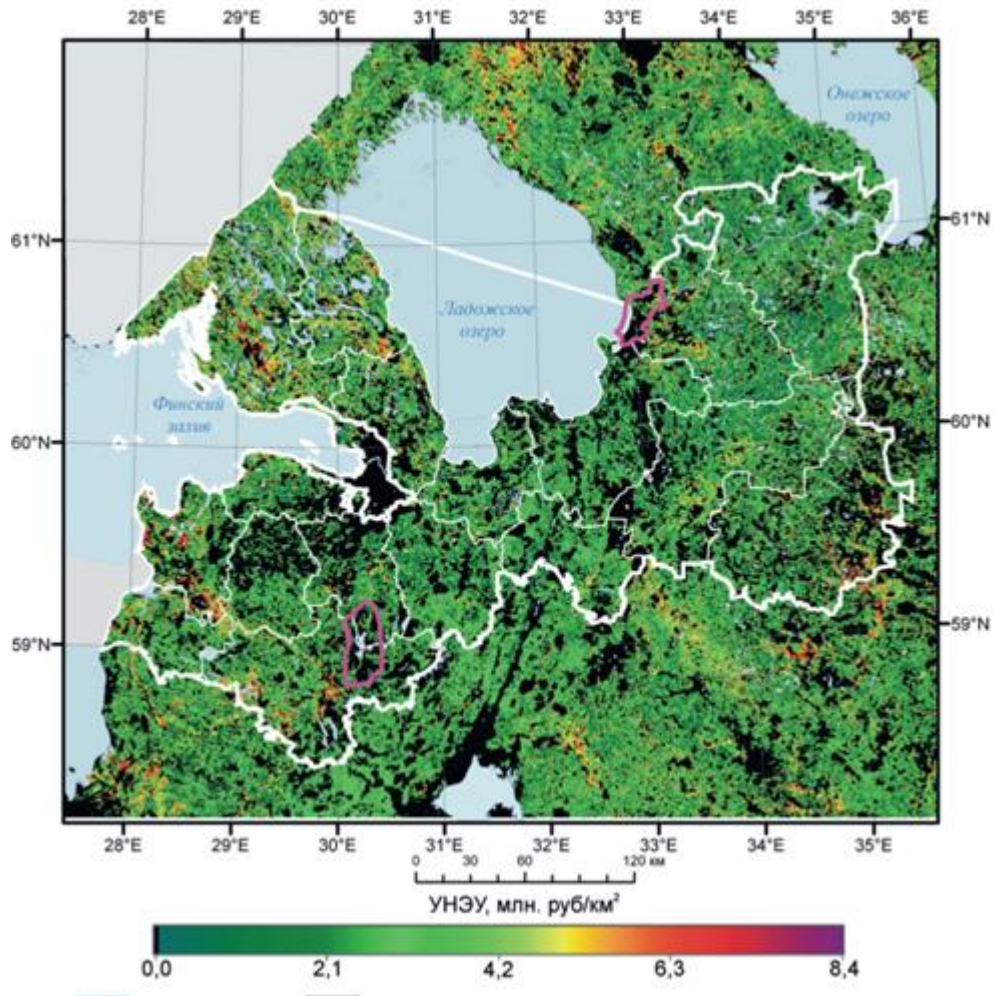
$$D = 1 - E/E_o$$

E_o - удельная скорость испарения влаги здоровой экосистемы, $кг/(м^2 * сут)$

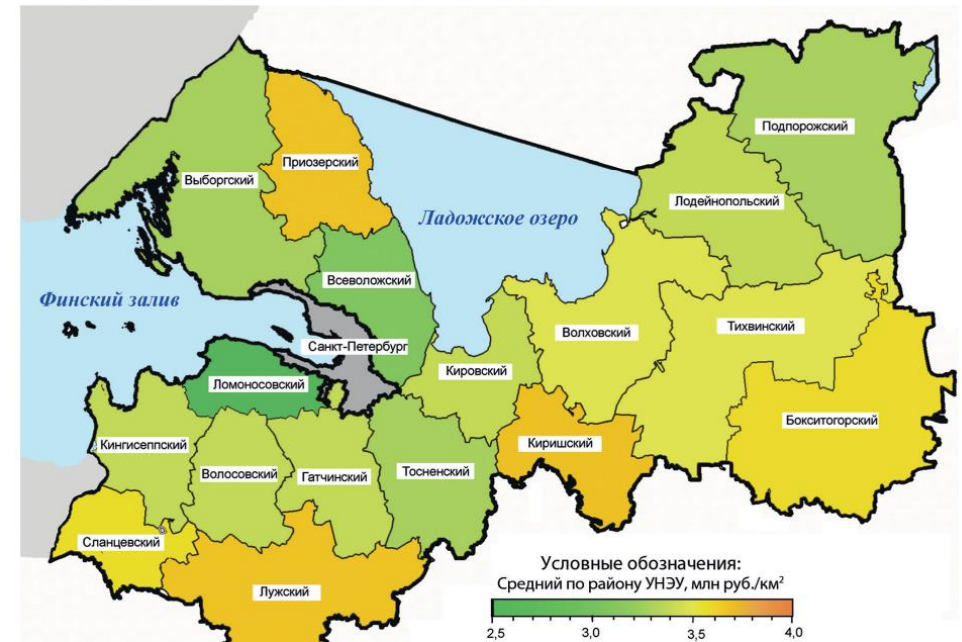
E - удельная скорость испарения влаги нарушенной экосистемы, $кг/(м^2 * сут)$

Картирование накопленного экологического ущерба по данным ДЗЗ

Карта накопленного экологического ущерба Ленинградской области по данным ДЗЗ



Ранжирование районов Ленинградской области по накопленному экологическому ущербу, млн.руб./км²



Главные тенденции

- Применяется всё более изощрённый формализованный инструментарий при анализе материалов ДЗЗ.
- Комплексование с материалами геофизических и геохимических съёмки.
- Использование моделей объектов, явлений и процессов при анализе материалов ДЗЗ.
- Возрос интерес к изучению строения и характеристик небесных тел.
- В экологической безопасности ДЗЗ рассматривается как элемент информационной поддержки системы принятия управленческих решений.
- Появились новые направления спутникового мониторинга: - биобезопасностей;
- влияния потепления климата и загрязнения атмосферного воздуха на здоровье населения и экосистем;
- Разрабатываются все новые отраслевые информационные системы с использованием ДЗЗ

Прогноз развития

- Рост автоматизации процессов космического мониторинга.
- Следует ожидать создания отраслевой информационной системы поддержки принятия управленческих решений по обеспечению экологической безопасности населения страны.
- Ускорение деградации многолетней мерзлоты потребует мониторинг деформаций дневной поверхности, приобретёт особую значимость спутниковая радиолокационная интерферометрия. В целях информационной безопасности в России должны быть созданы отечественные системы радиолокационной спутниковой интерферометрии.
- Следует ожидать рост применения беспилотных летательных аппаратов для получения крупномасштабных материалов ДЗЗ и при верификации результатов ДЗЗ, что требует целенаправленной ускоренной адаптации аэросъёмочных технологий для их использования на беспилотных летательных аппаратах.

