



РНФ
Российский
научный фонд



ИГЕМ РАН



Раскрывая секреты Земли из космоса: применение данных дистанционного зондирования Земли для геологических, геотехнических и геоэкологических задач в Арктике

Минаев В.А.

07.06.2023



ВВЕДЕНИЕ И ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ПОЛУЧЕНИИ ДАННЫХ ДЗЗ

Эволюция дистанционных исследований Земли



Источники пространственных данных



Космические снимки



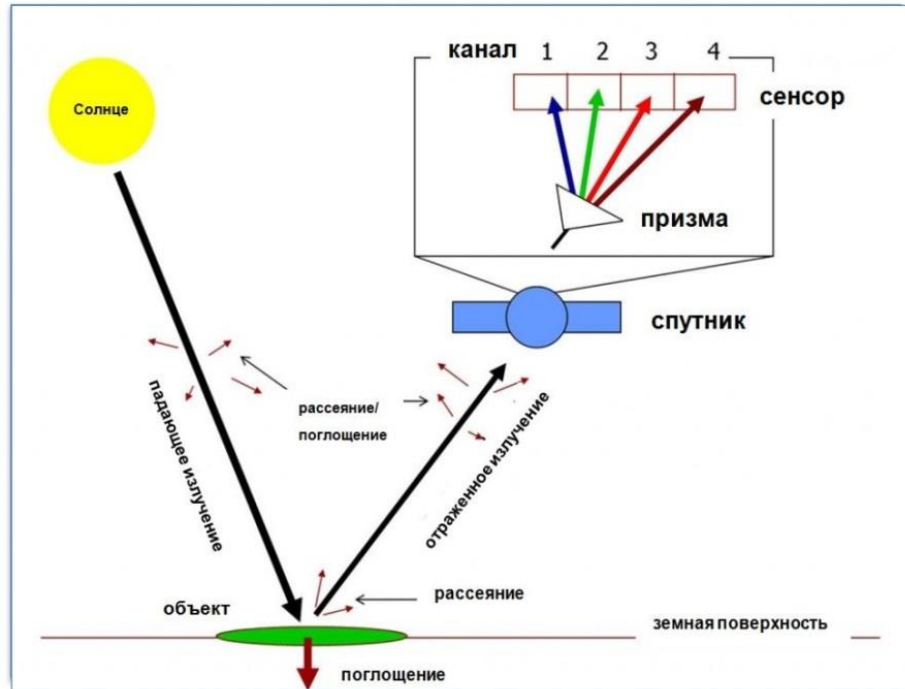
Оперативный источник актуальной высокодетальной пространственной информации для любой точки на Земной поверхности

Области применения спутниковых данных



- 
1. Мониторинг почвенно-растительного покрова: обезлесение, расширение городов, сельскохозяйств. деятельность, изменения в естественной среде обитания
2. Оценка растительности (мультиспектр, индекс NDVI): здоровье и продуктивность растительности, изменения в росте
3. Мониторинг климата: температура, влажность, облачность, состав атмосферы, мониторинг ледяных шапок, ледников и морского льда
4. Борьба со стихийными бедствиями: мониторинг лесных пожаров, наводнений, ураганов и землетрясений, оценка долгосрочных последствий
5. Управление водными ресурсами: контроль уровня воды в озерах и реках, поверхности водоёмов, мониторинг снежного покрова и таяния ледников
6. В геологии и горно-добывающей промышленности: поиск полезных ископаемых, мониторинг тектонических зон и блоков, мониторинг объектов горно-добывающей промышленности

Схема получения оптических спутниковых данных



Наиболее значимые компоненты солнечного излучения, регистрируемые датчиком:

1. прямое
2. отраженное рассеянное
3. рассеянное без отражения

Естественное отраженное солнечное излучение сканируемых участков земной поверхности частично поглощается и рассеивается в атмосфере после чего улавливается сканирующим зеркалом.



Поток излучения от каждого элемента разрешения (пиксела) попадает на призму, где расщепляется на спектральные потоки, в соответствии с теми диапазонами на которые настроена оптика (таким образом формируются спектральные каналы мультиспектрального космического снимка).



Каждый спектральный пучок улавливается расположенным за призмой детектором.

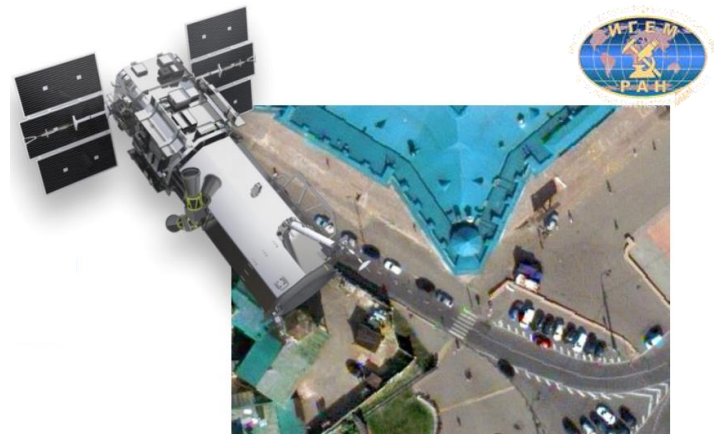
Виды космической съёмки

Оптическая съёмка

«Пассивный» метод

Источник детальных пространственных данных

Регистрирует отражённое солнечное излучение



Радарная съёмка

«Активный» метод

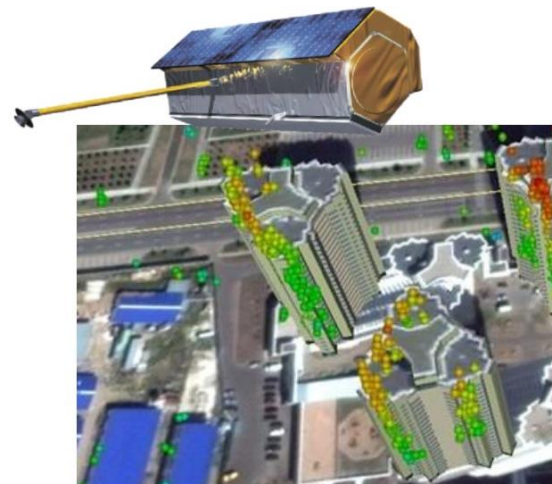
Мониторинг деформаций и смещений

Ультракоротковолновая область радиоволн

(X-; L-; C-диапазоны)

Радиолокатор испускает собственный сигнал и затем регистрирует его, а значит не зависит от освещения

Сантиметровый диапазон волн проникает сквозь облачность



Крупнейшие коммерческие группировки



e-geos
AN ASI/TELESPAZIO COMPANY

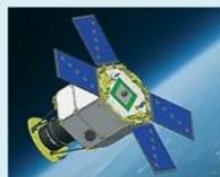
x 4 CosmoSkymed



DigitalGlobe

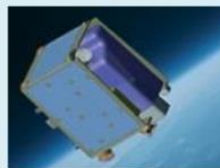


AIRBUS
DEFENCE & SPACE



URTHE CAST

x 2 Deimos
Iris(video)
Thea



planet.

x 5 RapidEye
x 81 Flock

Альянсы



KARI
Korea Aerospace Research Institute

x4 Komsat



x4 Ресурс



CASC
中国航天

x4 TH



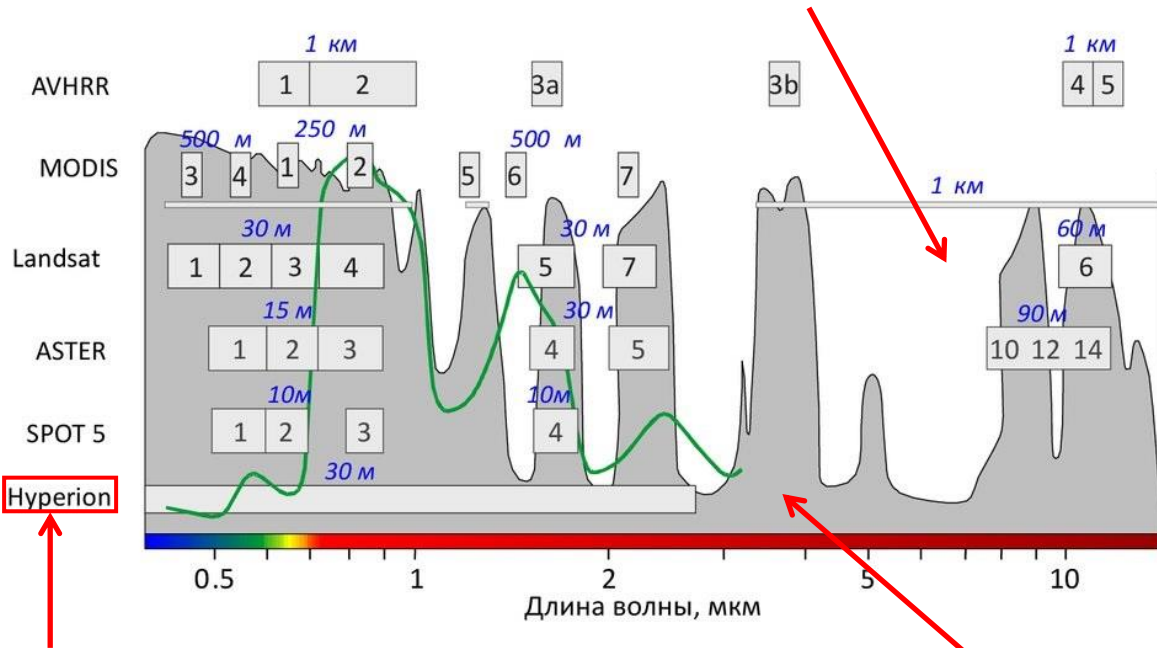
x2KazEOSat

Национальные группировки



Спектральное разрешение средств ДЗ

Окна прозрачности атмосферы – здесь работают сенсоры ДЗЗ



По количеству каналов спутниковые данные делятся на:

- 1) Мультиспектральные (до 20 кан.);
- 2) Гиперспектральные (свыше 20 кан.)

220 спектральных каналов видимой и инфракрасной области спектра (400 – 25000 нм).

Спектр поглощения атмосферы

Важнейшие характеристики космических снимков



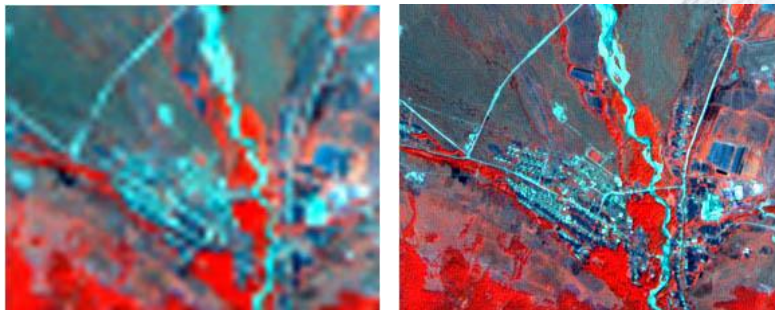
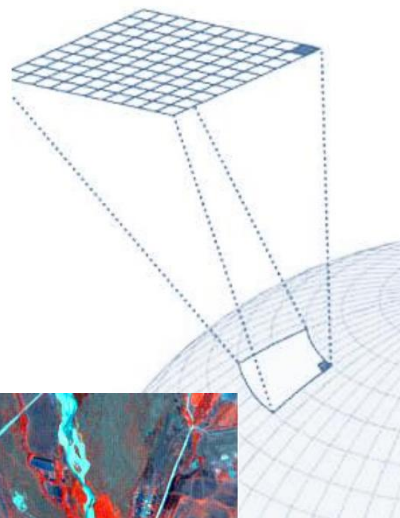
Пространственное разрешение космических снимков

Низкое более 10 м

Среднее 2,5-10 м

Высокое 1-2,5 м

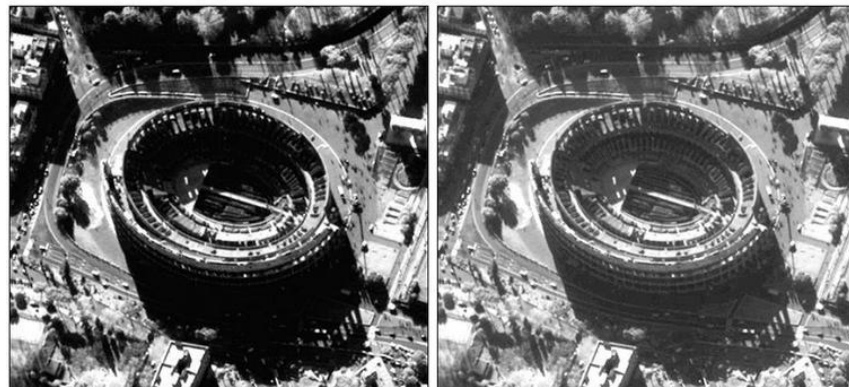
Сверхвысокое менее 1 м



Высокое радиометрическое разрешение – не менее 11 бит на пиксел в панхроматическом режиме

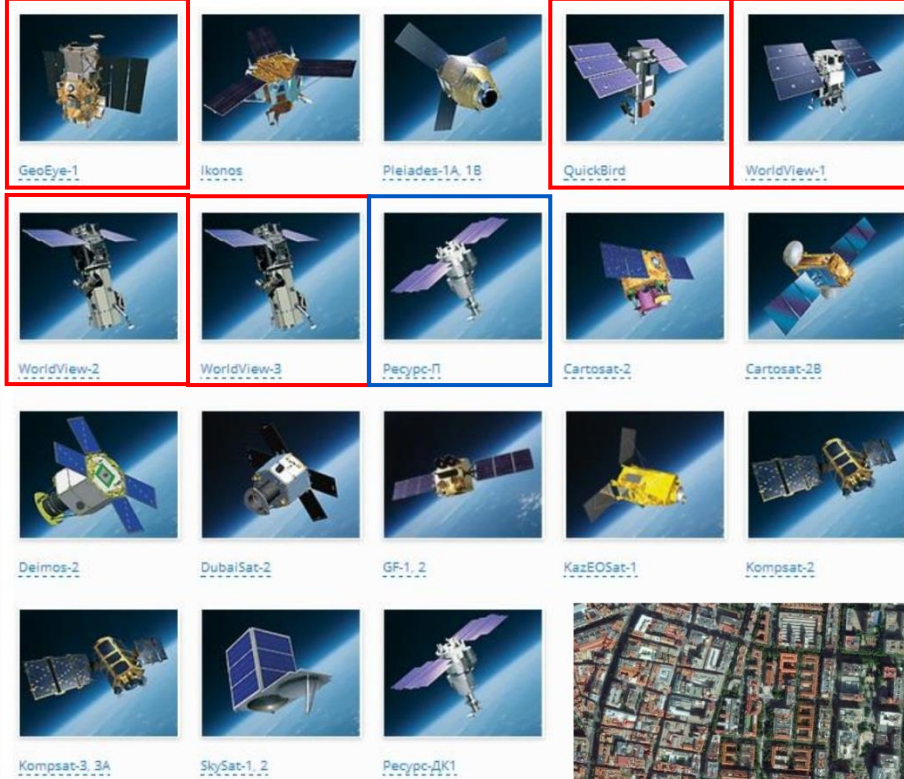
8-бит
(256 градаций серого)

11-бит
(2048 градаций серого)



Кроме того:

- Спектральное разрешение (ширина спектральных зон съемки);
- Полоса охвата;
- Количество спектральных каналов.



Наиболее известные:

WorldView, GeoEye, QuickBird, Ресурс-П (все 3 не работают)

Особенности данных:

- Малая площадь покрытия за 1 съёмку;
- Высокая стоимость новой съёмки;
- Распространяются только на платной основе (и на федеральном уровне).

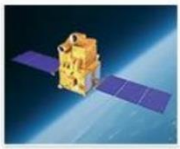
Спутники СВЕРХВЫСОКОГО пространственного разрешения (менее 1 м на пиксель)



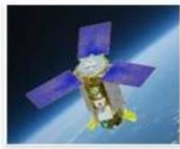
EKA



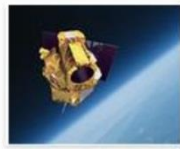
Канопус-В



Cartosat-1 (IRS-P5)



EgyptSat-2



Formosat-2



Miranda VRSS-1



Nigeriasat-2



SPOT-6, 7



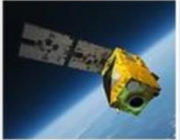
SSOT



TH-1-1, TH-1-2



THEOS



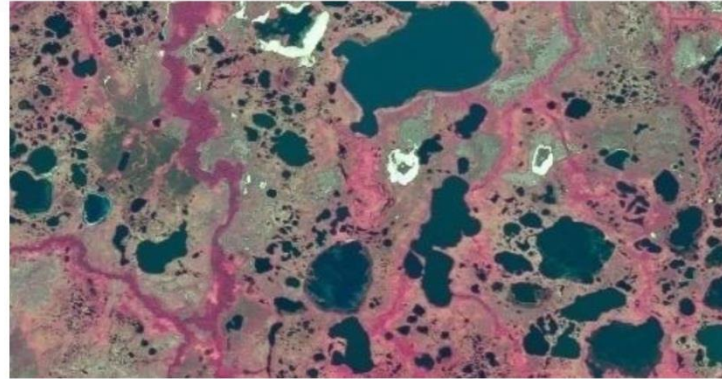
VNREDSat-1A



ZY-3



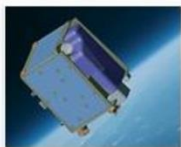
Группировка КА DMC



Спутники **ВЫСОКОГО**
пространственного разрешения
(1-2,5 м на пиксель)

Особенности данных:

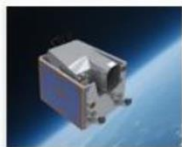
- Большая площадь покрытия за 1 съёмку;
- Распространяются только на платной основе (и на федеральном уровне).



RapidEye



Flock-1



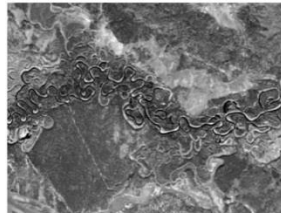
KazEOSat-2



Resourcesat-1 (IRS-P6)



Resourcesat-2



Spot-5



UrtheCast



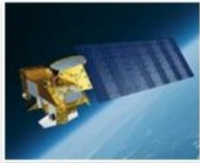
Особенности данных:

- Большая площадь покрытия за 1 съёмку;
- Распространяются только на платной основе (и на федеральном уровне).

Спутники СРЕДНЕГО
пространственного разрешения
(2,5-10 м на пиксель)



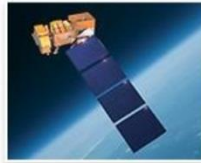
Landsat-8



Aqua/MODIS



EO-1/Hyperion, ALI



Landsat-7



Suomi NPP



Terra/ASTER



Meteo-M №1, №2



Sentinel-2A, 2B



Спутники НИЗКОГО
пространственного разрешения
(более 10 м на пиксель)

Особенности данных:

- Большая площадь покрытия за 1 съёмку;
- Распространяются на бесплатной основе (сайты urs.earthdata.nasa.gov; glovis.usgs.gov; earthexplorer.usgs.gov; scihub.copernicus.eu);
- Изображения (сцены) этих спутников пригодны для региональных исследований (территории от 4 тыс. км² до 40 тыс. км² в зависимости от пространственного разрешения).

Предварительная обработка **оптических** данных (базовый алгоритм)



№	Действие	Зачем?
1	Калибровка	Приведение измерений радиометрической информации к физическим величинам, таким как яркость поверхности или отражательность, что позволяет получить более объективные значения и обеспечивает сравнимость данных между различными снимками.
2	Геометрическая коррекция	Устранение искажений, связанных с геометрией съемки и движением платформы. Происходит регистрация и выравнивание изображений на геодезические точки или другие снимки высокого разрешения.
3	Атмосферная коррекция	Удаление влияния атмосферы на данные, включая атмосферное рассеяние и поглощение. Она обеспечивает более точное отображение спектральных характеристик поверхности Земли, позволяя проводить более точные анализы.
4	Фильтрация и улучшение качества	Удаление шумов, артефактов и аномалий (облачность, атмосферные частицы, тени и другие искажения). Улучшение контрастности и резкости изображений.
5	Маскирование и сегментация	Маскирование позволяет исключить нежелательные объекты или области из анализа (водные поверхности, облака, тени или наземные объекты). Сегментация предназначена для выделения интересующих объектов или регионов на изображении

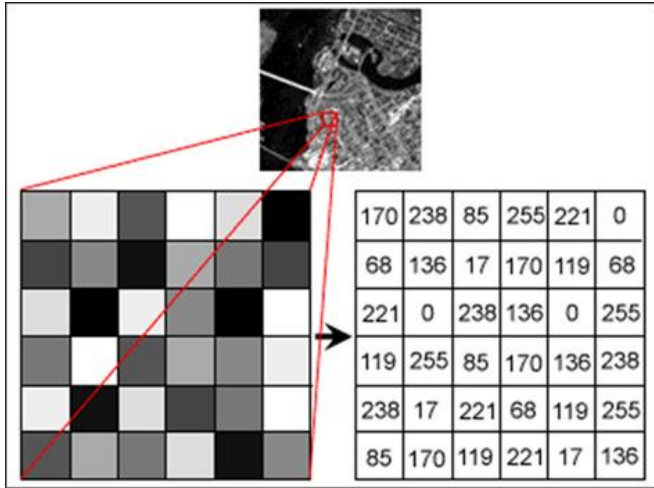
Предварительная обработка радиолокационных данных (базовый алгоритм)



№	Действие	Зачем?
1	Калибровка	Преобразование из исходного формата в единицы измерения заданного диапазона яркости, такие как амплитуда обратного рассеяния (backscatter) или комплексные амплитуды. Позволяет получить количественные значения, необходимые для дальнейшего анализа.
2	Мультилукинг (multilooking)	Усреднение радиолокационных данных в пространственном или временном измерении. Этот этап позволяет уменьшить шум, повысить разрешение и улучшить детализацию изображения.
3	Спекл-фильтр (speckle filtering)	Уменьшение спекл-шума, который является характерным артефактом радиолокационных данных. Спекл-шум возникает из-за интерференции и вносит значительные помехи в изображения. Применение спекл-фильтра позволяет улучшить качество изображений и сделать их более интерпретируемыми.
4	Геометрическая коррекция	Выравнивание и регистрация на геодезические точки или другие источники высокоточных геопространственных данных. Это позволяет достичь геометрической согласованности между различными снимками и обеспечивает точное геопространственное представление земной поверхности.

МЕТОДЫ АНАЛИЗА И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ ДЗЗ

Значения пиксела космического снимка



Изображение земной поверхности формируется в фокальной плоскости датчика в результате регистрации отраженного солнечного излучения (измерения спектральной плотности энергетической яркости).

Значение каждого пиксела снимка определяется путем интегрирования энергии, падающей на поверхность датчика и определения таким образом спектральной плотности энергетической освещенности объектов.

Полученное значение преобразуется в электрический сигнал, а затем в целочисленное значение пиксела снимка (DN), которое хранится в двоичном виде и зависит от количества бит памяти Q , отводимых для записи каждого числа.

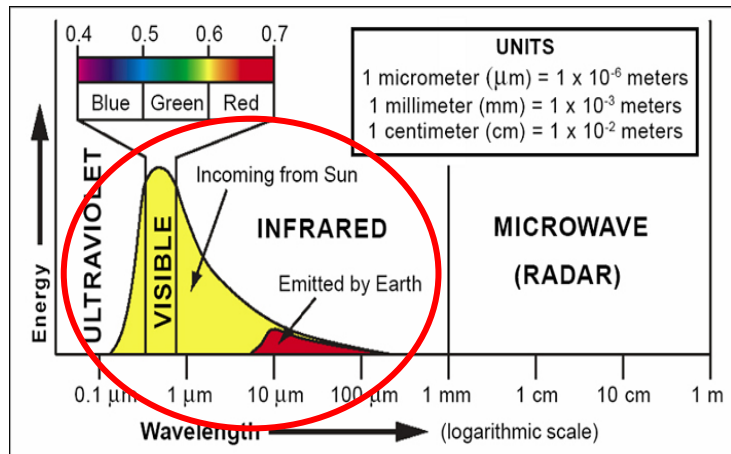
$$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{ср} \cdot \text{мкм}^{-1}$$



$$\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{мкм}^{-1}$$



$$\text{DN}_{\text{диапазон}} = [0, 2^Q - 1]$$

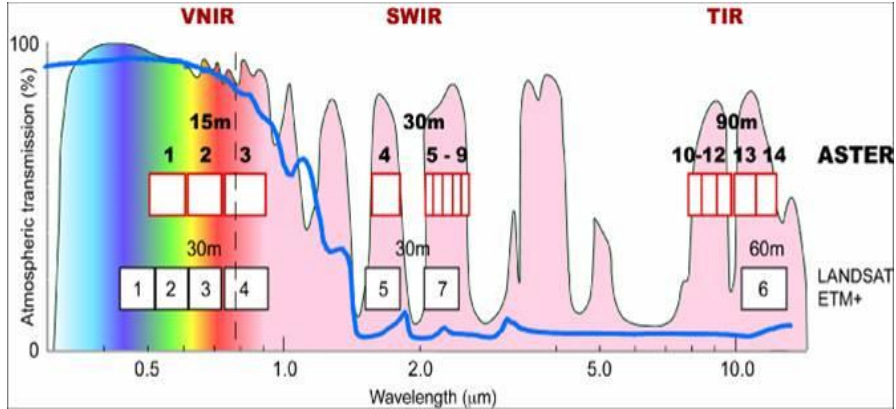


False Colour Composite (FCC) (Псевдоцветной RGB композит или изображение в ложных цветах)



Синтезирование космического изображения

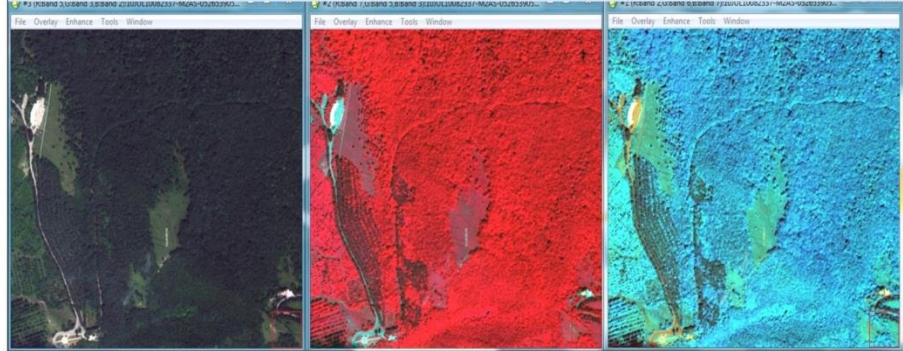
Комбинации снимков в различных спектральных диапазонах:



FCC - способ интерпретации растровой информации, полученной в различных диапазонах электромагнитного спектра (как видимого, так и не видимого) с использованием аддитивной RGB-модели.

Нужно для распознавания классов материалов таких как, горные породы, растительность, водные объекты и т.д.

Различные варианты синтеза отдельных изображений (например «красный-зеленый-синий», «ближний ИК-красный-зеленый» и т. д.) позволяют решать многочисленные тематические задачи и облегчают процесс визуального дешифрирования снимков.



комбинация каналов 5-3-2 (RGB)

комбинация каналов 7-5-3 Color IR (CIR)

комбинация каналов 2-6-7

Различные комбинации каналов мультиспектрального космического снимка сверхвысокого разрешения World View-2

Основная идея: комбинация коллективно наименее коррелированных спектральных каналов, отражающих уникальные спектральные характеристики поглощения и отражения картируемого объекта или группы объектов.

Соотношение спектральных полос (BR – band ratio) и относительная глубина полосы поглощения (RBD- relative absorption band depth)

BR используется для усиления определенных характеристик или обнаружения определенных явлений путем использования соотношения значений отражательной способности двух различных спектральных полос.

$BR \text{ (Band Ratio)} = \text{Band X} / \text{Band Y}$
или сложение, вычитание и умножение между собой двух спектральных каналов.

Эта техника использует уникальные спектральные характеристики различных материалов поверхности и может предоставить ценную информацию для различных приложений в области мониторинга окружающей среды, геологии, сельского хозяйства и др.

RBD - это спектральный параметр, используемый в дистанционном зондировании для количественной оценки глубины или силы поглощения, демонстрируемого определенными материалами.

$RBD \text{ (Relative absorption band-depth)} = (\text{Band X} - \text{Band Y}) / (\text{Band X} + \text{Band Y})$ или абсолютное любые комбинации 2 или более спектральных каналов.

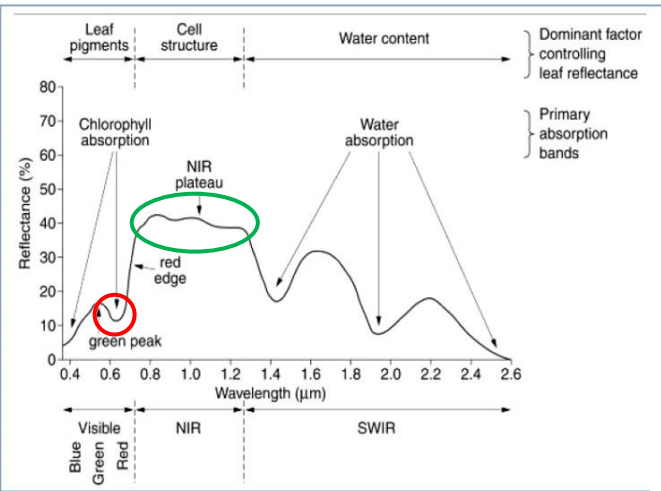
Он предоставляет ценную информацию о составе и свойствах поверхностных материалов, таких как растительность, минералы и вода.

Пример нормализованного индекса различий растительности (NDVI)



$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{Red}) / (\text{NIR} + \text{Red}),$$

где NIR (отражательная способность в ближнем ИК-диап.): 0.76 – 0.96 μm ,
а Red (отражательная способность в красном диапазоне): 0.6 – 0.7 μm



Факторы, определяющие спектральные характеристики растений:

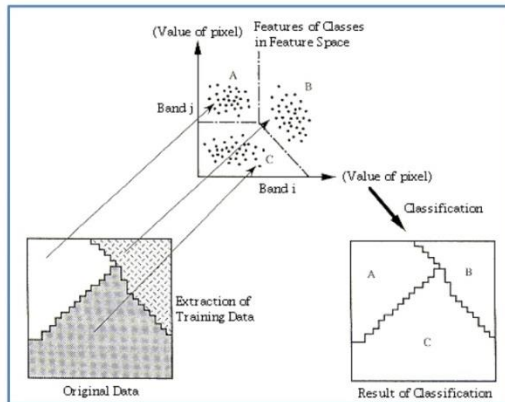
1. пигментация (хлорофилл а и б, каротин),
2. структура клетки,
3. общее содержание влаги.

Высокая отражательная способность в ближней инфракрасной полосе соответствует **здоровой растительности**, а более низкая отражательная способность в красной полосе указывает на **поглощение хлорофилла**.

Отношение этих двух значений отражательной способности в NDVI дает относительную меру энергичности и плотности растительности.

Тематическая обработка данных ДЗЗ

Классификация - распределение всех пикселей снимка по классам в соответствии с отражательной способностью представляемых ими объектов в соответствии с заданным алгоритмом (правилом классификации).



Виды классификации:

Контролируемая классификация (с обучением)

- дешифровщик формирует и задает эталонные обучающие выборки для каждого информативного класса;
- алгоритм классификации автоматически определяет границы решения (разделения пикселей на заданные классы).

Неконтролируемая классификация (без обучения)

- дешифровщик определяет желаемое количество классов;
- алгоритм обнаруживает кластеры в массиве данных;
- дешифровщик обозначает классы в соответствии с типом объектов, попавших в данный класс.

Цель: классификация и картирование различных типов объектов и почвенного покрова, присутствующих на интересующей территории (растительность, водные объекты, леса, сельскохозяйственные поля, городские районы и т.д.).

Контролируемая классификация (с обучением)



- Классификация с обучением - это процесс, при котором происходит сравнение значения яркости каждого пиксела с эталонными обучающими выборками, в результате чего, каждый пиксел относится к наиболее подходящему классу объектов.

Алгоритмы контролируемой классификации,

Классификацию с обучением рекомендуется применять, если:

- 1) заранее известно, какие объекты есть на снимке;
- 2) на снимке имеется небольшое количество (до 30) классов;
- 3) эти классы четко различаются на снимке.

Способ параллелепипедов
(Parallelepiped Algorithm)

Способ минимального расстояния
(Minimum Distance)

Способ максимального правдоподобия
(Maximum Likelihood)

Алгоритм расстояния Махаланобиса
(Mahalanobis Distance)

Классификация с помощью метода спектрального угла
(Spectral Angle Mapper)

Двоичное кодирование (Binary Encoding)

Нейронная сеть (Neural Network)

Основной характеристикой **обучающей выборки** является её **репрезентативность**, которая показывает насколько полно выборка описывает свойства заданного класса и насколько точно по элементам выборки можно оценить параметры этого класса в целом.

Неконтролируемая классификация (без обучения)



Классификации без обучения - это процесс, при котором распределение пикселей изображения происходит автоматически, на основе анализа статистического распределения яркости пикселей.

Перед началом классификации неизвестно сколько, и какие объекты есть на снимке, а после проведения классификации необходимо дешифрирование полученных классов, чтобы определить, каким объектам они соответствуют.

Классификацию без обучения применяют в случаях если:

- а) заранее неизвестно какие объекты есть на снимке;
- б) на снимке большое количество объектов (более 30) со сложными границами;
- в) также можно применять, как предварительный этап перед классификацией с обучением.

Алгоритмы неконтролируемой классификации,

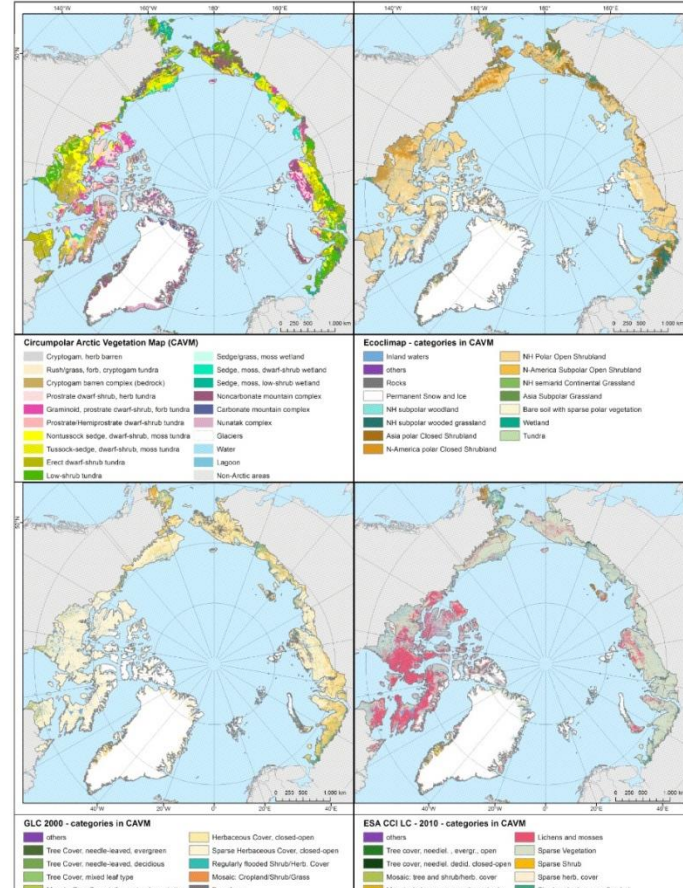
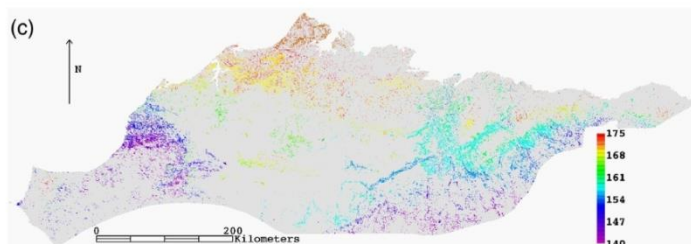
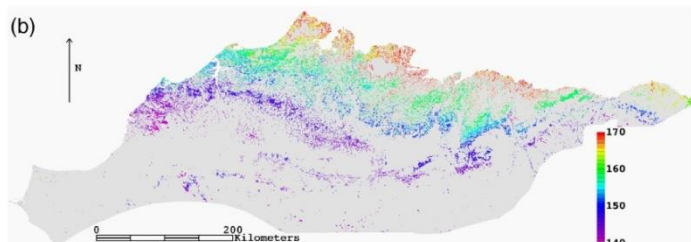
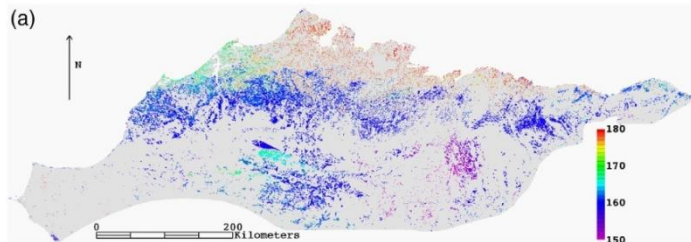
- **ISODATA**

Итерационная самоорганизующаяся методика анализа данных - Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique

- **K-means**

Алгоритмы **неконтролируемой классификации** реализует **методы кластеризации**, основанные на пороговых процедурах. В них предполагается, что первоначальная информация о природных различиях объектов, зафиксированная в спектральных яркостях, достаточна для разделения классов, и поэтому можно обойтись без эталонов.

Примеры классификаций



M. Raynolds, D. Walker . Raster Circumpolar Arctic Vegetation Map, Mendeleev Data, 2019, V1



R. Narasimhan, D. Stow . Daily MODIS products for analyzing early season vegetation dynamics across the North Slope of Alaska // Remote Sensing of Environment, V. 114, Is. 6, 2010, P. 1251-1262

Схема развития растительности в днях года после полного схода снега (серым обозначены области покрытие облачность или те области, в которых снег не сходил)

Тематическая детализация почвенно-растительного покрова на основе данных ДЗЗ AVHRR и сравнение с существующими глобальными картами

Обнаружение изменений на земной поверхности (Change Detection)

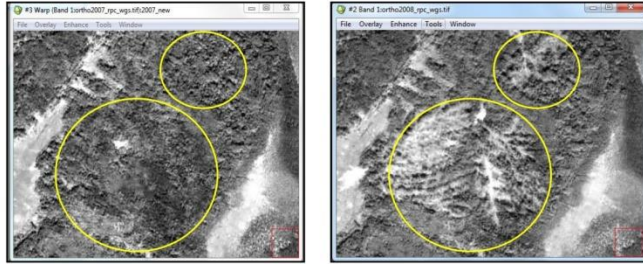


№	Основные подходы обнаружения	Суть
1	На основе пикселей	Взаимовычитание значений пикселей в соответствующих местах двух или более <i>разновременных</i> изображений и применение порогового значения для определения того, произошло ли изменение. Методы могут быть чувствительны к шуму и изменениям в освещении и характеристиках датчика.
2	На основе объектов	Сегментация изображений на значимые объекты или регионы и сравнение их атрибутов, таких как форма, текстура и спектральные характеристики. Зачастую используется классификация. Результаты более точные.
3	Гибридные (объекты+ пиксели)	Преодоление ограничений отдельных подходов и повышение точности и надежности результатов обнаружения изменений.
4	Применение индексов обнаружения изменений	Индексы помогают выделить конкретные типы изменений и упрощают интерпретацию результатов обнаружения изменений. Нормализованный разностный индекс растительности (NDVI); модифицированный нормализованный разностный индекс воды (MNDWI); нормализованный разностный индекс застройки (NDBI). ²⁶

Обнаружение изменений на земной поверхности (Change Detection)

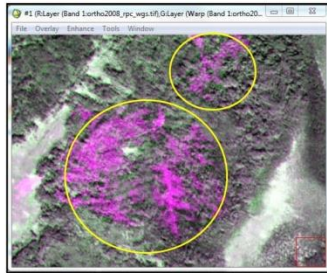


Правило создания мультивременного композита при обнаружении изменений: каналы позднего (нового) снимка занимают первую (Red) и третью (Blue) компоненты, канал раннего (старого) снимка занимает вторую (Green) компоненту.



ранний снимок

поздний снимок



мультивременной композит

На изображении, синтезированном указанным образом, **измененные участки отображаются яркими цветами.**

В **розовый цвет** окрашиваются пиксели, в которых произошло **увеличение яркости.** Такой цвет будет иметь вырубки, вскрытые грунты, появившиеся на новом снимке.

В **зеленый цвет** окрашиваются пиксели, в которых произошло **уменьшение яркости.**

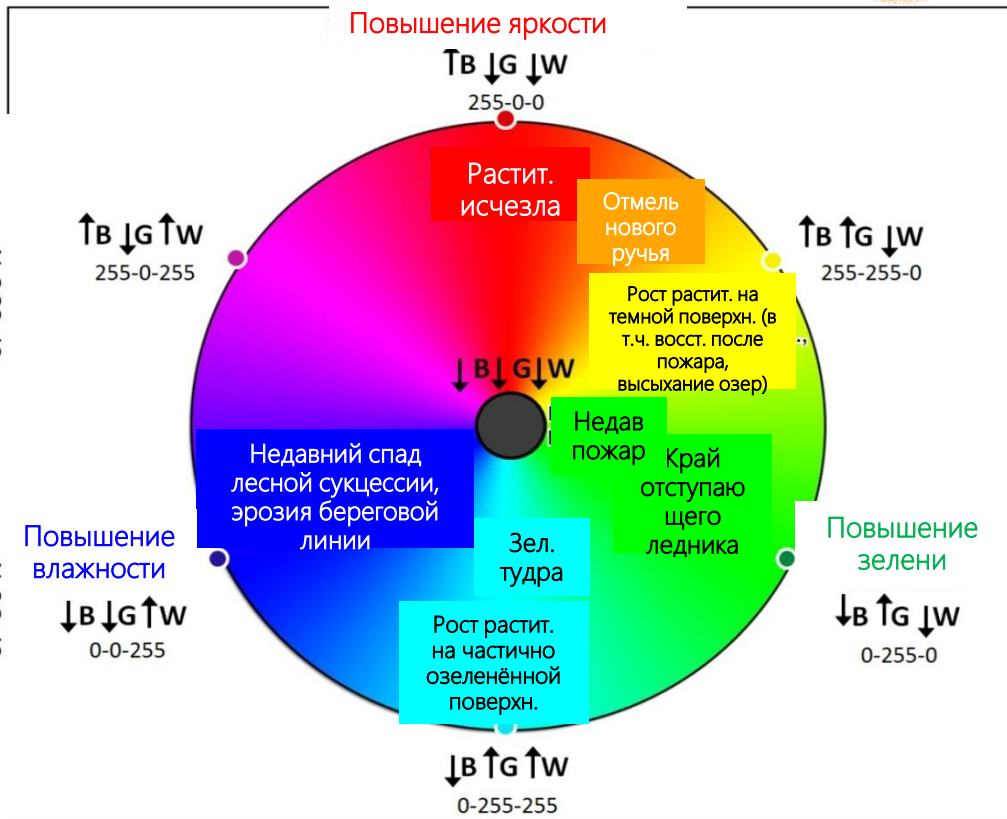
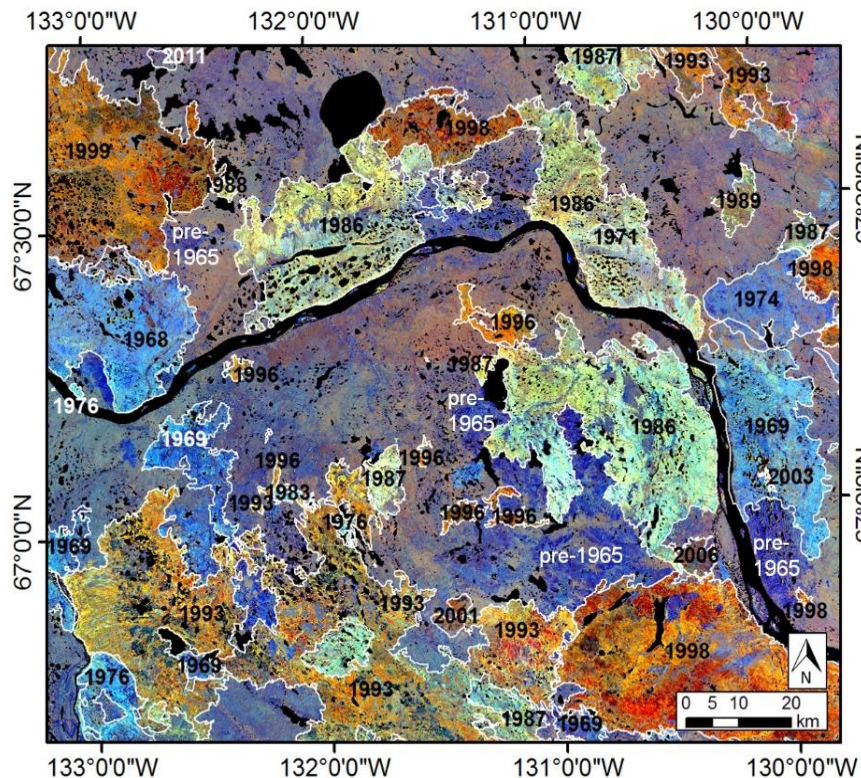
На основе ДЗЗ для регионов Арктики проводятся и совершенствуются методики мониторинга следующих параметров, критически влияющих на экосистему в вечной мерзлоте:

- температура поверхности (контроль вегетации, фенологии, баланса углерода в почве, гляциальной массы и устойчивости вечной мерзлоты),
- снежный покров (время, площадь, мощность, водный объем – как контроль термального режима вечной мерзлоты),
- топография (контроль гидрологических процессов),
- **поверхностные воды** (как источник воды и пищи, а также как источник сильного влияния на стабильность вечной мерзлоты т.к. потоки энергии и газов между землей и атмосферой потенциально влияют на ландшафт и изменение климата),
- **биомасса и структура растительности** (как фундаментальные компоненты северных экосистем).

Пример Change Detection (анализ стеков снимков Landsat)



Карта истории лесных пожаров/
регенерации растительности

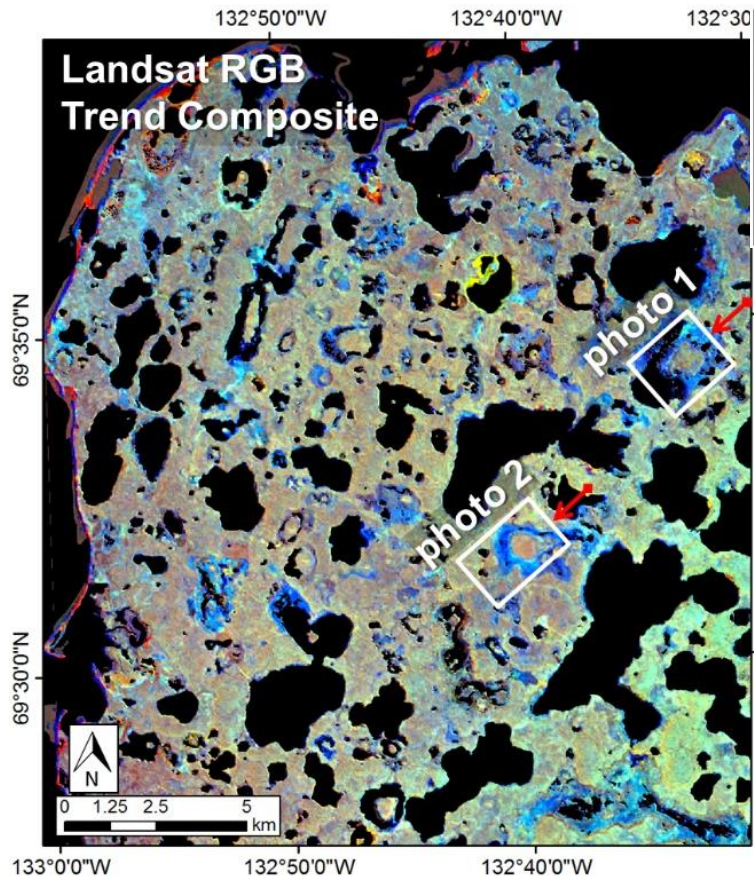


Fraser RH, Olthof I, Kokelj SV, Lantz TC, Lacelle D, Brooker A, Wolfe S, Schwarz S. Detecting Landscape Changes in High Latitude Environments Using Landsat Trend Analysis: 1. Visualization. Remote Sensing. 2014; 6(11):11533-11557.

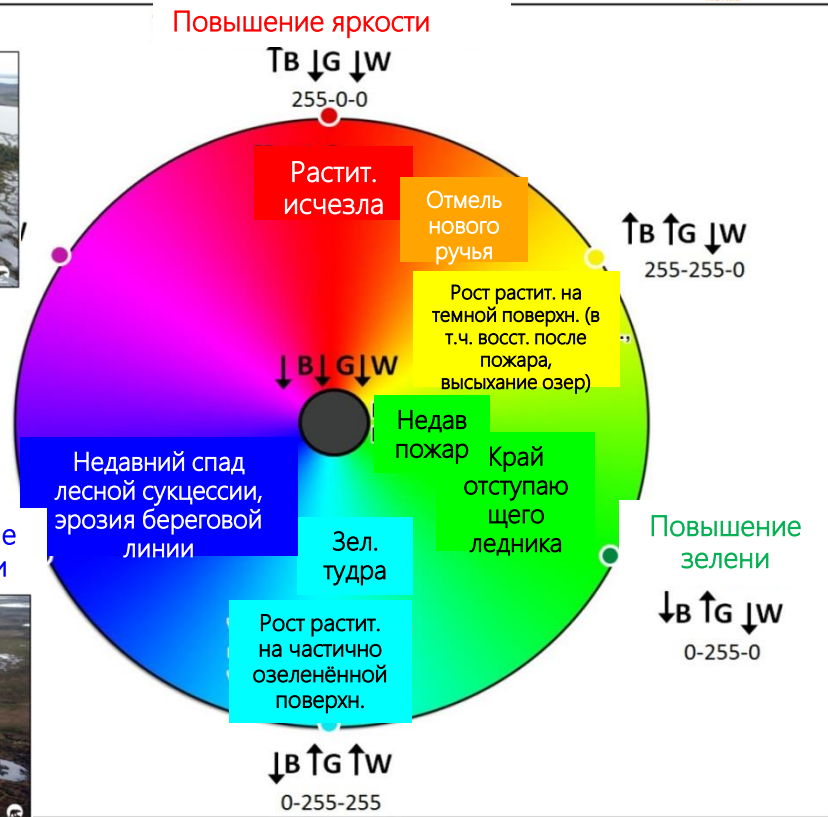
Пример Change Detection (анализ стеков снимков Landsat)



Мониторинг площади водных объектов



Повышение
влажности



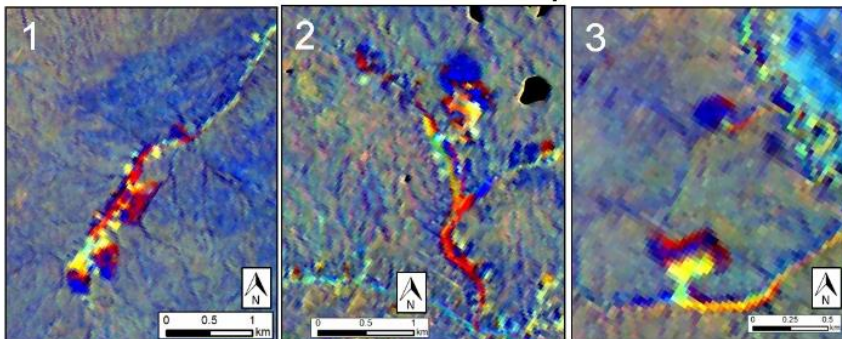
Fraser RH, Olthof I, Kokelj SV, Lantz TC, Lacelle D, Brooker A, Wolfe S, Schwarz S. Detecting Landscape Changes in High Latitude Environments Using Landsat Trend Analysis: 1. Visualization. Remote Sensing. 2014; 6(11):11533-11557.

Пример Change Detection (анализ стеков снимков Landsat)

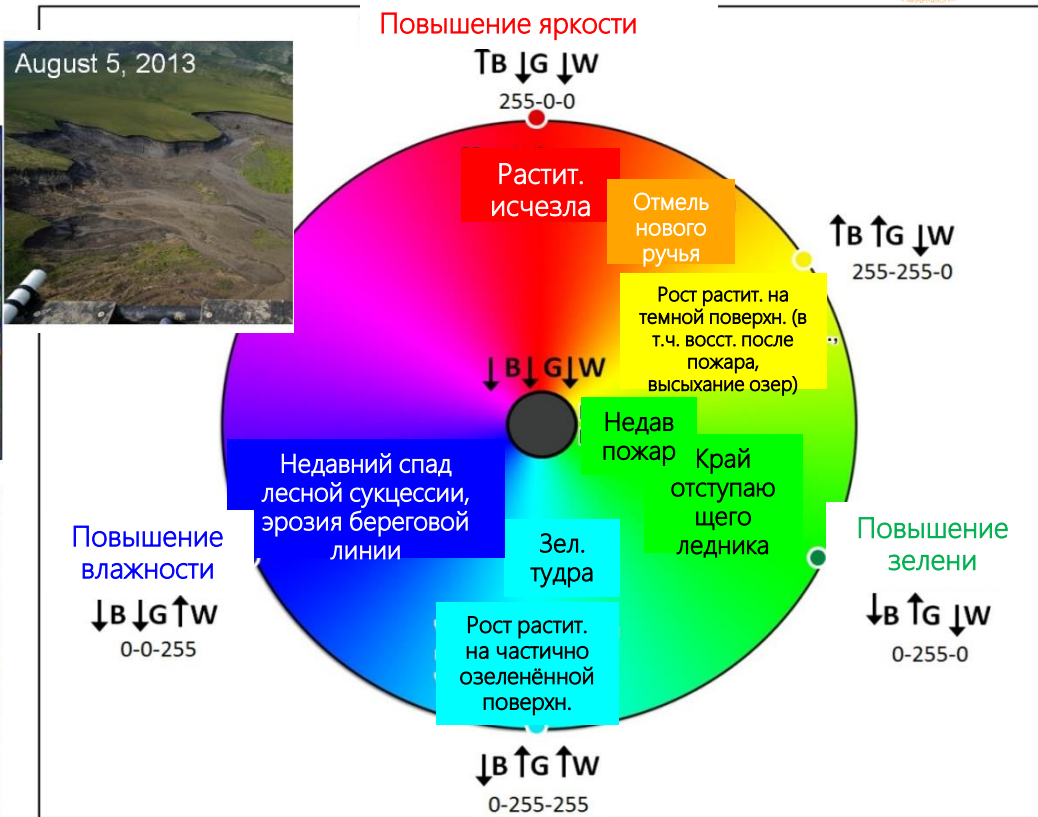
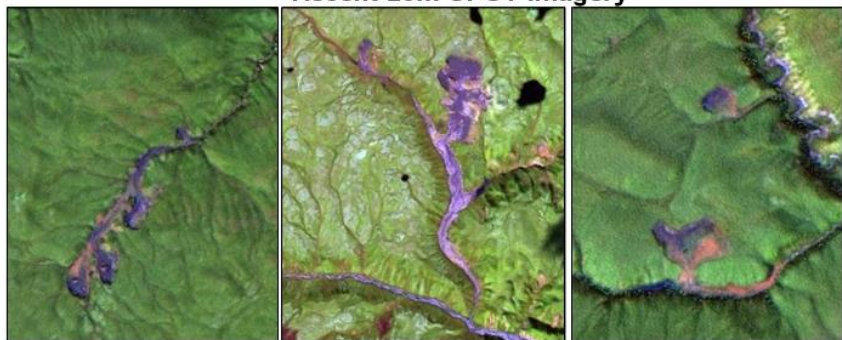


Мониторинг оползней таяния

Landsat RGB Trend Composite



Recent 20m SPOT Imagery

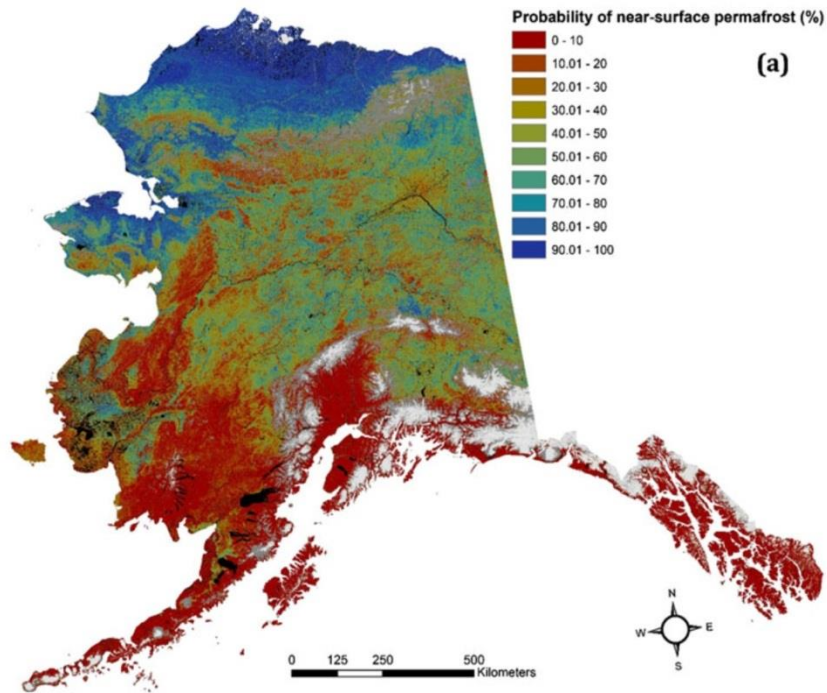


Fraser RH, Olthof I, Kokelj SV, Lantz TC, Lacelle D, Brooker A, Wolfe S, Schwarz S. Detecting Landscape Changes in High Latitude Environments Using Landsat Trend Analysis: 1. Visualization. Remote Sensing. 2014; 6(11):11533-11557.

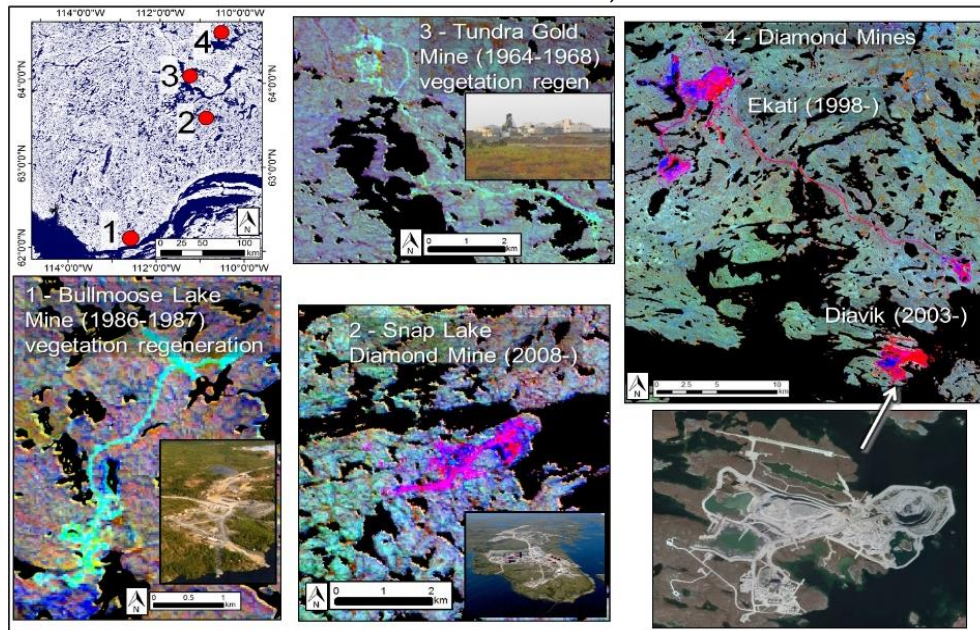
Пример Change Detection (анализ стеков снимков Landsat)



Карта вероятности наличия приповерхностной (до 1 м) вечной мерзлоты на Аляске с использованием спектральных индексов



Заброшенные участки добычи ПИ с восстановлением (**бирюзовый**) и след недавно разработанных алмазных рудников (**красный** и **темно-синий**)



Jorgenson M. T., and Grosse G. Remote Sensing of Landscape Change in Permafrost Regions // Permafrost and Periglac. 2016. Process., 27, P. 324- 338

Fraser RH, Olthof I, Kokelj SV, Lantz TC, Lacelle D, Brooker A, Wolfe S, Schwarz S. Detecting Landscape Changes in High Latitude Environments Using Landsat Trend Analysis: 1. Visualization. Remote Sensing. 2014; 6(11):11533-11557.

Технология InSAR или интерферометрический радар с синтезированной апертурой

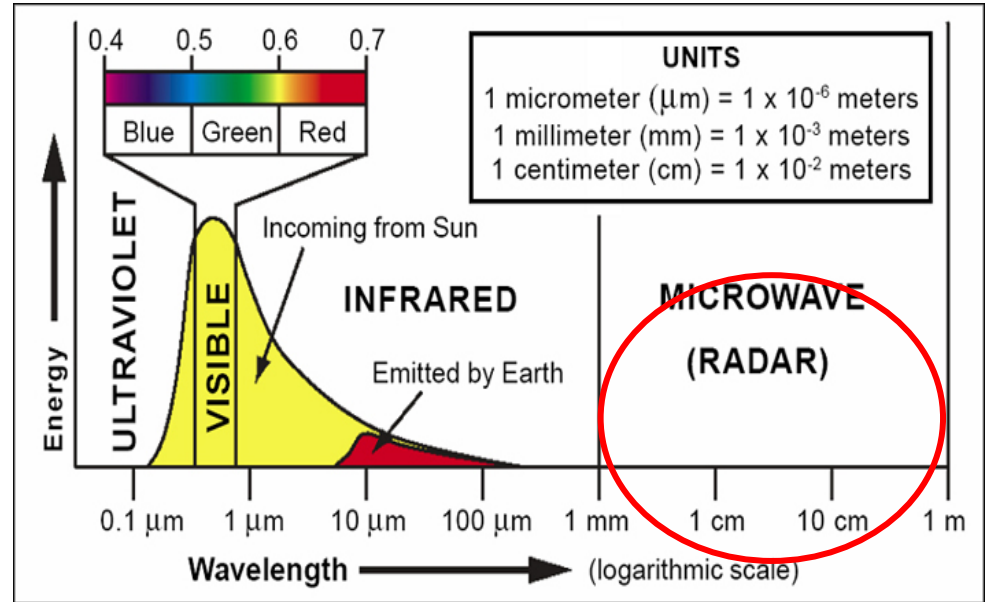


Используется два или более радиолокационных изображения с синтезированной апертурой (SAR) для создания карт деформации поверхности или цифрового возвышения, используя различия в фазе волн, возвращающихся на спутник или самолет.

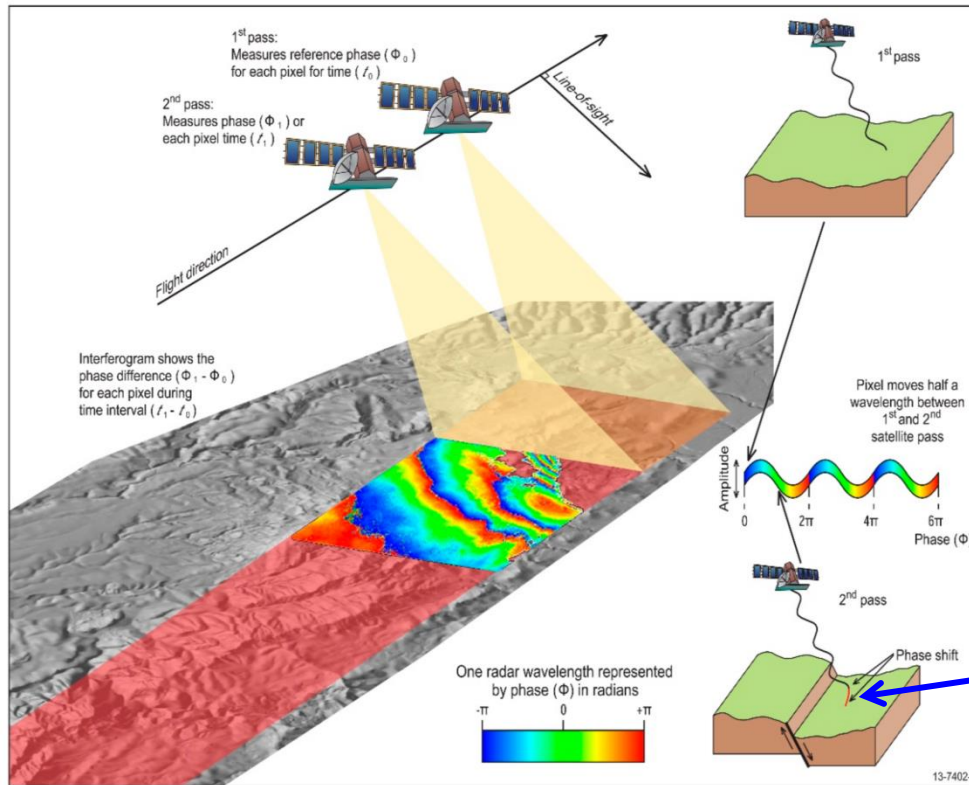
В сочетании с GPS, InSAR может определять перемещения поверхности в течении дней или лет в масштабе от миллиметра до сантиметра с высоким пространственным разрешением.

Применение в Арктике

- Мониторинг динамики льдов;
- Картирование деформаций поверхности;
- Мониторинг инфраструктуры и др.



Принцип работы InSAR



Спутник передаёт микроволновой ($L \sim 1$ см до 1 м) импульс

Регистрирует вол-во энергии обратного рассеяния

Снимок содержит информацию в виде амплитуд и фаз радиолокационного сигнала

Амплитуды – наклон местности и неровность поверхности

Фазы – расстояния от спутника до поверхности

Получается два разновременных снимка

При изменении расстояния Земля-спутник (между двумя съёмками) происходит фазовый сдвиг

Использование микроволновой энергии обеспечивает всепогодную работу из-за ее низкой чувствительности к облакам и дождю.

Интерферограмма

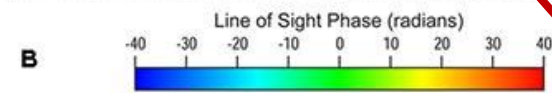
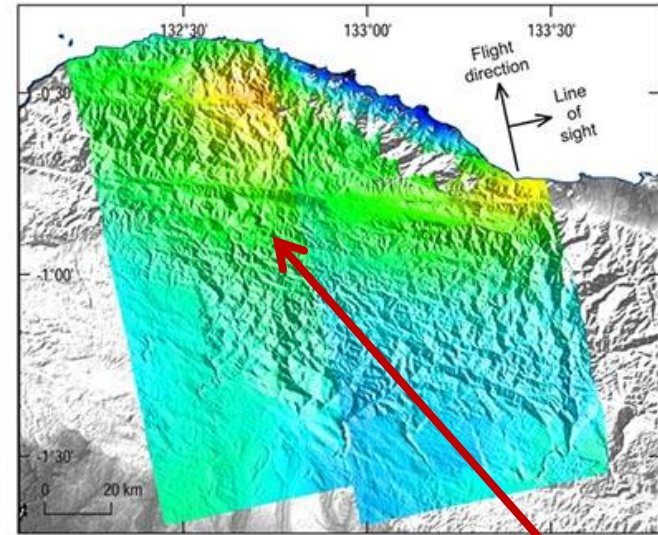
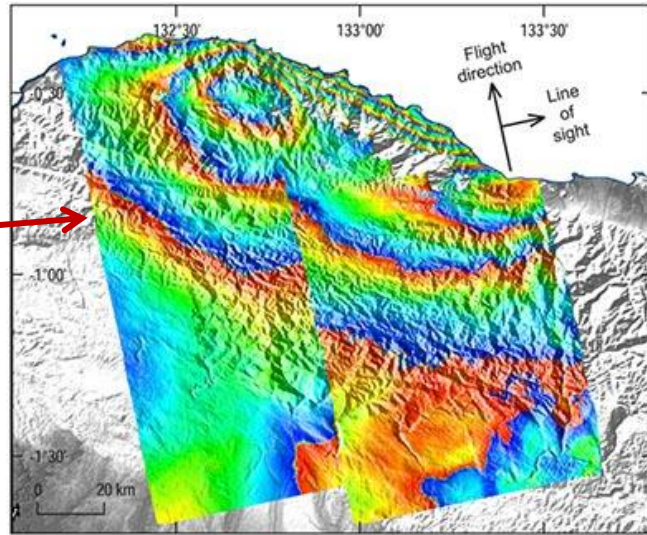


Суммирование
кол-ва полос

«Свёрнутая»



«Развёрнутая»



Серии
интерферен-
ционных
полос

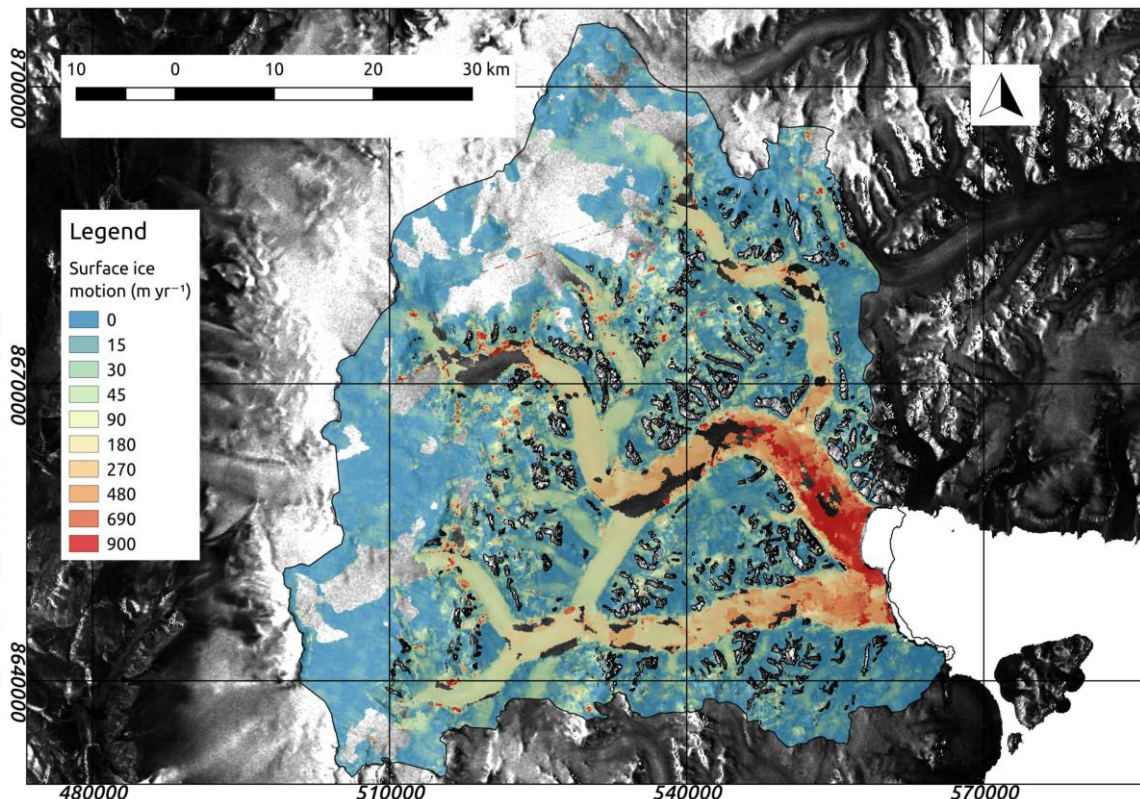
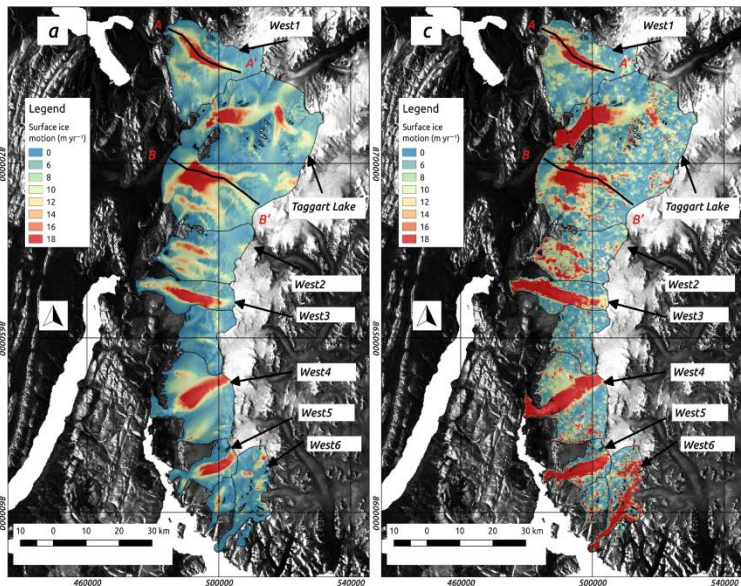
Диапазон 2 радиана
(от $-\pi$ до π)

Непрерывное
поле отн. изменения фазы

Пример применения InSAR



Карты скоростей перемещения льда ледников полученная на основе технологии InSAR. Скорости рассчитаны по снимкам Sentinel-1, полученным в период с 22 февраля по 12 марта 2016 года (справа) и с 10 по 17 февраля 2016 года (снизу).

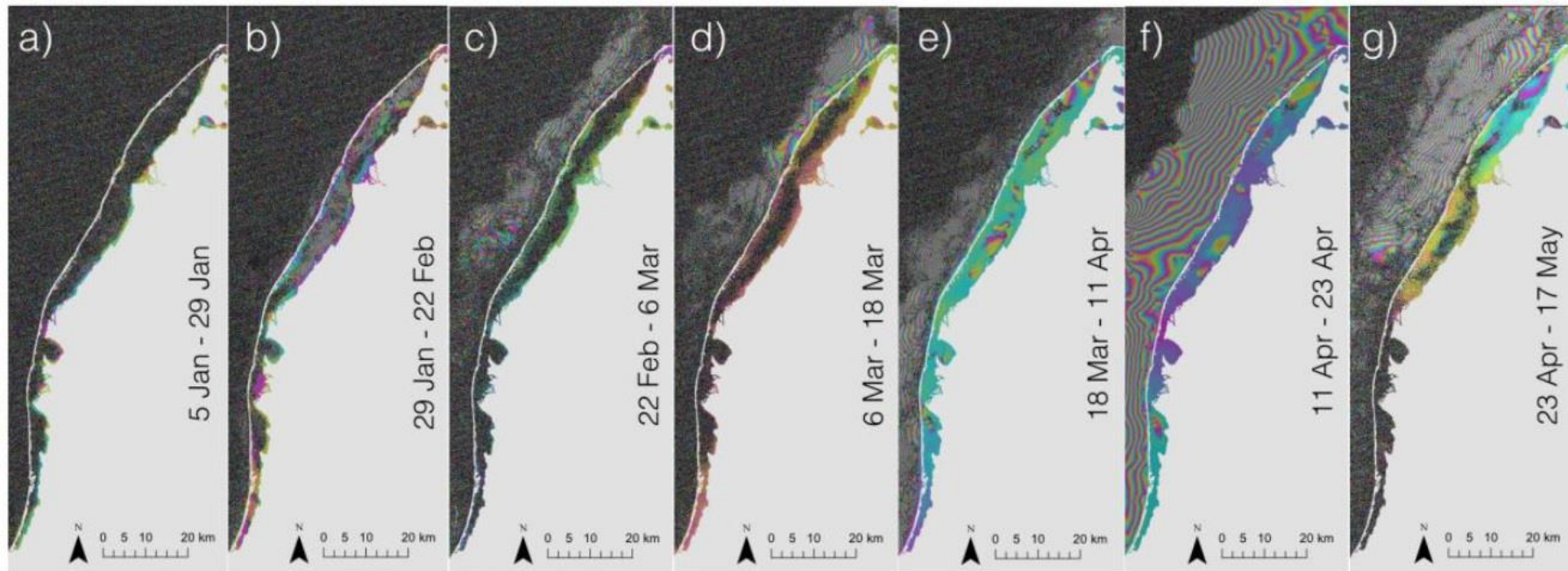


Sánchez-Gómez P, Navarro FJ. Glacier Surface Velocity Retrieval Using D-InSAR and Offset Tracking Techniques Applied to Ascending and Descending Passes of Sentinel-1 Data for Southern Ellesmere Ice Caps, Canadian Arctic. Remote Sensing. 2017; 9(5):442.

Пример применения InSAR



Эволюция припайного льда в лагуне Касегалук, интерпретированная с помощью фазовой сигнатуры интерферограмм Sentinel-1 зимой и весной 2017 г.



Dammann DO, Eriksson LEB, Mahoney AR, Stevens CW, Van der Sanden J, Eicken H, Meyer FJ, Tweedie CE. Mapping Arctic Bottomfast Sea Ice Using SAR Interferometry. Remote Sensing. 2018; 10(5):720.

Примеры комплексного анализа (региональный масштаб)

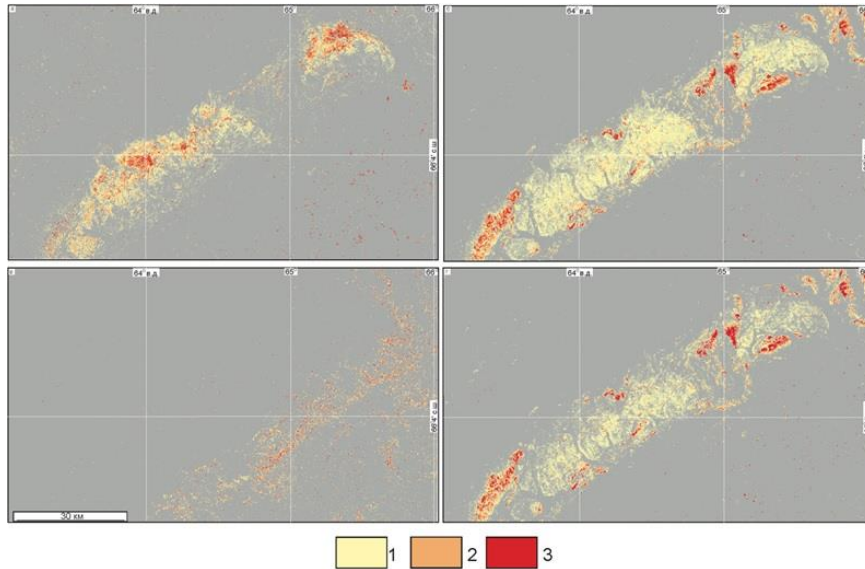


Схема гидротермальных изменений центральной части Малоуральской зоны и прилегающей территории, полученная с помощью КС: а-г – схемы преимущественного развития ассоциаций вторичных минералов: а – гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих, б – оксидов трехвалентного железа (гематит), в – оксидов и гидроксидов железа (лимонит), г – оксидов двухвалентного железа (магнетит): 1-3 – метасоматические изменения: концентрации индикаторных групп вторичных минералов: минимальные (1), средние (2) и максимальные (3).

Иванова Ю.Н., Нафигин И.О. Применение спутниковых данных Landsat-8 с целью прогнозирования рудной минерализации для северных территорий на примере центральной части Малоуральской зоны (Полярный Урал) // Исследование Земли из Космоса, 2023, № 1, стр. 24-40

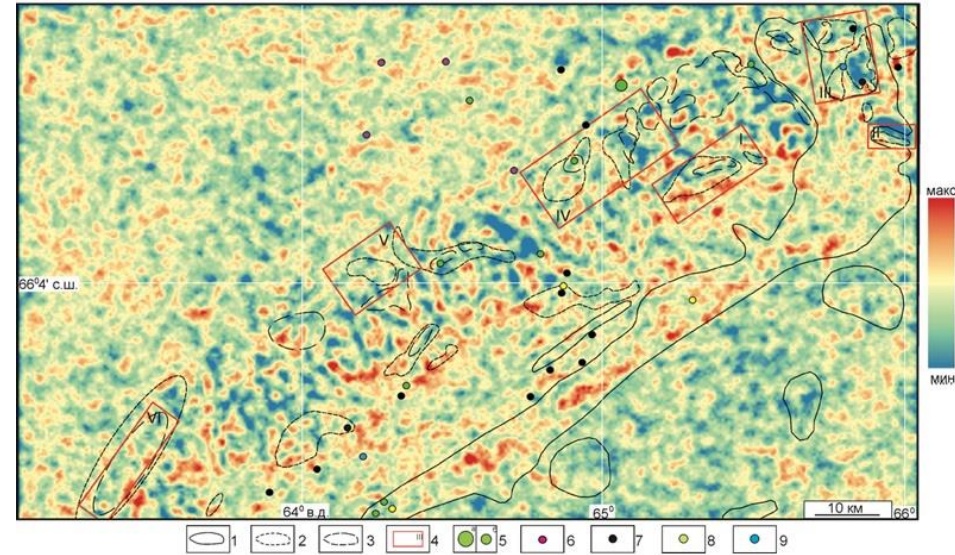
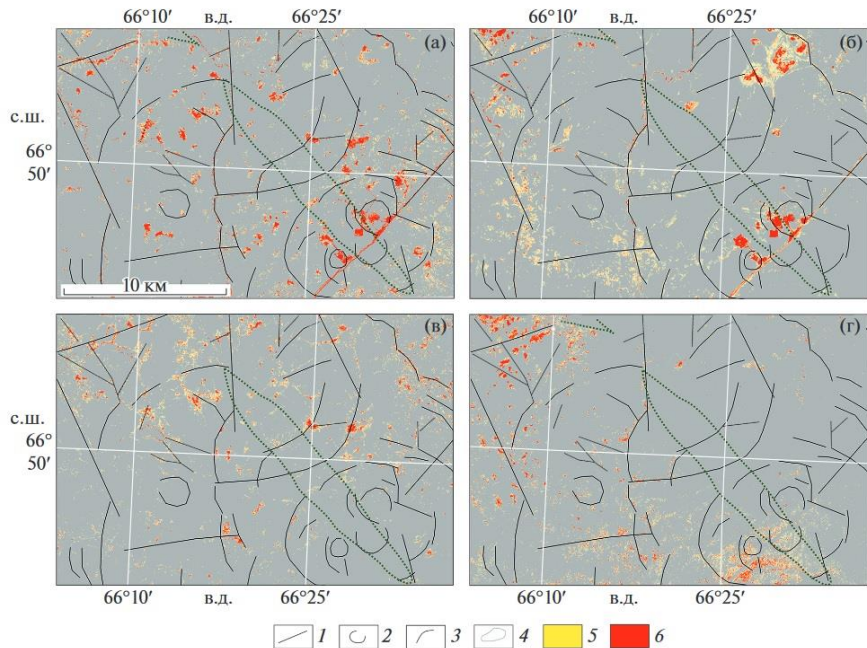


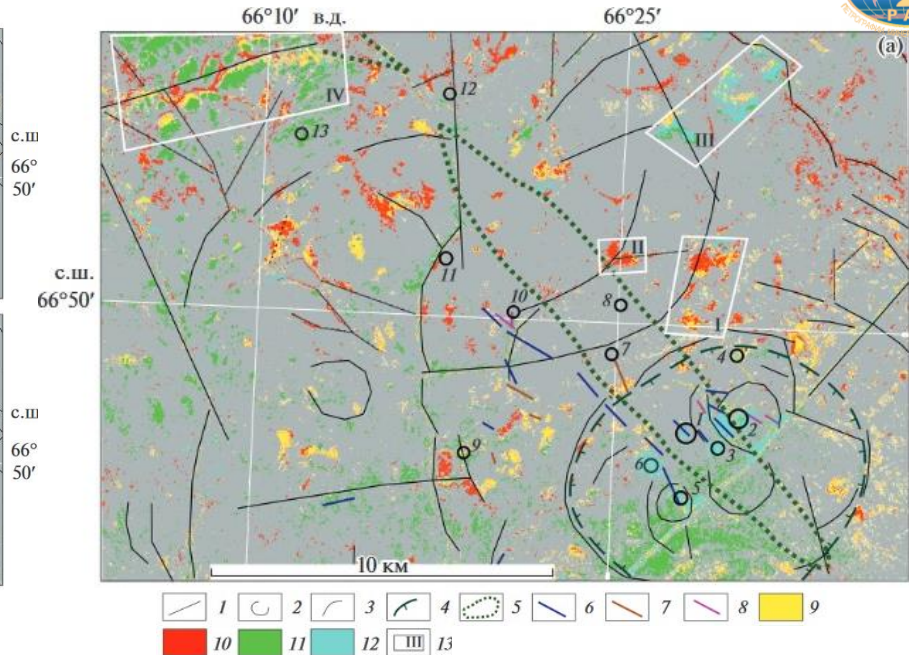
Схема плотности линеаментов, полученная автоматическим способом выделения, для ЦЧМЗ и прилегающей территории с нанесенными на ней перспективными участками на золото-полиметаллический тип минерализации. Условные обозначения: 1 – 3 – вторичные изменения: 1 – оксиды и гидроксиды железа (лимонит); 2 – оксиды двух- и трехвалентного железа объединенные; 3 – гидроксил-(Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие минералы, 4 – площади, перспективные на золото-полиметаллический тип минерализации, 5-9 – м-я и рудопрояв.

Примеры комплексного анализа (масштаб рудного района)

Викентьев И.В., Иванов Ю.Н., Нафинг И.О., Бортник Н.С. Структурная позиция и типизация метасоматических зон, Полярный Урал: первый опыт современного космического зондирования Земли // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. – 2021. – Т. 500, № 2. – С. 115-122.



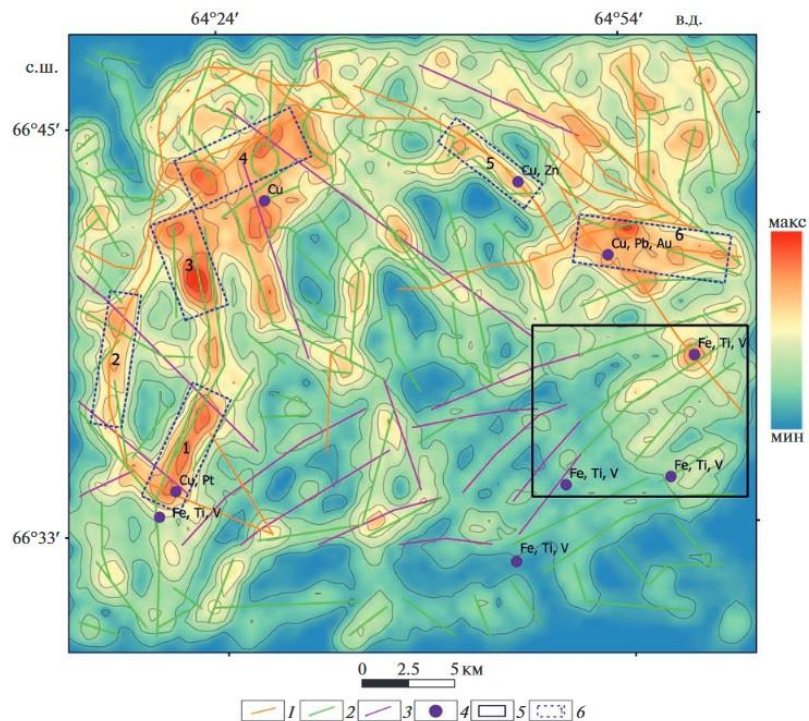
Карта отдешифрованных по КС гидротермальных изменений Тоупугол-Ханмейшорского рудного района и прилегающей территории. а-г – схемы преимущественного развития ассоциаций вторичных минералов: а – гидроксил- (Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащих, б – оксидов трехвалентного железа (гематит), в – оксидов и гидроксидов железа (лимонит), г – оксидов двухвалентного железа (магнетит). 1-3 – разрывные нарушения, выявленные в ходе анализа КС: 1 – радиальные 1-го порядка; 2 – кольцевые; 3 – дуговые; 4-6 – метасоматические изменения: 4 зона березитизации, вынесенная с геологической карты, 5-6 – концентрации индикаторных групп вторичных минералов: минимальные (5) и максимальные (6).



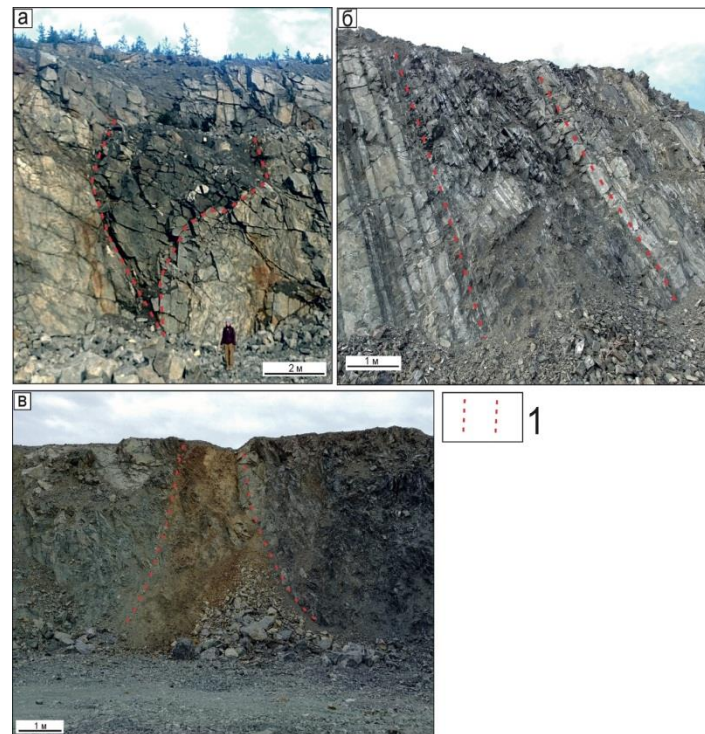
Карта гидротермальных изменений Тоупугол-Ханмейшорского рудного района и прилегающей территории. а – площади развития гидротермально-метасоматических пород по материалам ДЗЗ, 1-4 – линеаменты и другие структуры, выявленные в ходе анализа КС: 1 – радиальные 1-го порядка, 2 – кольцевые, 3 – дуговые, 4 – Новогодненская палеовулканическая структура; 5 – зона березитизации, вынесенная с геологической карты [16]; 6-8 – дайки, связанные с типами рудной минерализации: 6 – золотосульфидно-кварцевым (С1); 7 – золото-сульфидно-кварцевым (D2-3); 8 – золото-железо-скарновым (D2); 9-12 – вторичные изменения: 9 – оксиды и гидроксиды железа (лимонит); 10 – гидроксид- (Al-OH, Mg-OH) и карбонат-содержащие минералы; 11 – оксиды двухвалентного железа (магнетит); 12 – оксиды трехвалентного железа (гематит); 13 – перспективные для выявления золоторудной минерализации территории (номера I-IV), 38 цифрами отмечены рудопроявления и месторождения.

Примеры комплексного анализа (масштаб рудного узла)

Иванова Ю.Н., Нафигин И.О. Применение спутниковых данных Landsat-8 с целью прогнозирования рудной минерализации для северных территорий на примере центральной части Малоуральской зоны (Полярный Урал) // Исследование Земли из Космоса, 2023, № 1, стр. 24-40



Объединённая схема плотности линеаментов (ручной и автоматический методы) и морфоструктурная карта с выделенными границами перспективных участков на полиметаллическую минерализацию для Манюкую-Вырчатинского рудного узла и прилегающей территории. 1-3 – дайковые образования, 4 – пункты минерализации, 5 - граница рудного узла, 6 – выделенные перспективные участки.



Примеры разломов, вмещающих и интрузивных пород и минерализации (а-в), заверенных в ходе полевых работ: а – дайка пироксенитов (?) в кварцевых диоритах, б – зона дробления и расланцевания в слоистой толще, в – зона оруденения. Условные обозначения: 1 – границы: даек (а, б) и зона оруденения (в).39



РНФ
Российский
научный фонд



ИГЕМ РАН



Спасибо за внимание!



Минаев В.А.
ИГЕМ РАН