

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

А. П. ГУСЕВ

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ГЕОДИНАМИКИ

Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области горнодобывающей промышленности
в качестве учебного пособия
для студентов второй ступени высшего образования,
обучающихся по специальности 1-51 80 04 «Геология»
профилизации «Общая и региональная геология»

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2022

УДК 528.7:551.2(075.8)
ББК 26.112.1я73+26.321я73
Г962

Рецензенты:

доктор геолого-минералогических наук А. Н. Галкин,
член-корреспондент НАН Беларуси М. А. Богдасаров

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины»

Гусев, А. П.

Г962 Спутниковый мониторинг геодинамики : учебное посо-
бие / А. П. Гусев ; М-во образования Республики Беларусь, Го-
мельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель : ГГУ им.
Ф. Скорины, 2022. – 90 с.

ISBN 978-985-577-854-8

Учебное пособие включает тематику занятий, пояснительный ма-
териал, вопросы для самостоятельной работы по дисциплине «Спутнико-
вый мониторинг геодинамики». Рассмотрены спутниковые технологии,
используемые для мониторинга современной геодинамики, основы ин-
дексации геодинамических процессов, спутниковый мониторинг экзоген-
ной геодинамики.

Адресовано магистрантам специальности 1-51 80 04 «Геология».

УДК 528.7:551.2(075.8)
ББК 26.112.1я73+26.321я73

ISBN 978-985-577-854-8

© Гусев А. П., 2022

© Учреждение образования «Гомельский
государственный университет
имени Франциска Скорины», 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|----|
| Введение..... | 4 |
| 1 Спутниковые технологии мониторинга: общие сведения..... | 6 |
| 1.1 Классификация космических методов исследования и характеристика съемочных систем..... | 6 |
| 1.2 Программное обеспечение для работы с космическими снимками..... | 14 |
| 2 Современная геодинамика как объект космических исследований..... | 19 |
| 2.1 Понятие геодинамики..... | 19 |
| 2.2 Классификация геодинамических процессов..... | 22 |
| 3 Индикация современных геодинамических процессов..... | 27 |
| 3.1 Основные понятия индикации..... | 27 |
| 3.2 Оценка достоверности индикаторов..... | 30 |
| 3.3 Индикация геодинамических процессов..... | 36 |
| 4 Линеаменты и их изучение космическими методами..... | 41 |
| 4.1 Линеаменты как объект изучения..... | 41 |
| 4.2 Линеаментный анализ..... | 45 |
| 5 Спутниковый мониторинг эндогенной геодинамики..... | 49 |
| 5.1 Спутниковый мониторинг сейсмических процессов..... | 49 |
| 5.2 Спутниковый мониторинг вулканических процессов..... | 56 |
| 5.3 Спутниковый мониторинг современных движений земной коры..... | 60 |
| 6 Спутниковый мониторинг экзогенной геодинамики..... | 67 |
| 6.1 Спутниковый мониторинг процессов, связанных с деятельностью ветра..... | 67 |
| 6.2 Спутниковый мониторинг процессов, связанных с деятельностью поверхностных вод..... | 69 |
| 6.3 Спутниковый мониторинг процессов, связанных с деятельностью подземных вод..... | 73 |
| 6.4 Спутниковый мониторинг процессов, связанных с действием силы тяжести на склонах..... | 77 |
| 6.5 Спутниковый мониторинг геокриогенных процессов.... | 81 |
| Литература..... | 85 |

ВВЕДЕНИЕ

Спутниковый мониторинг геодинамики – это наблюдение, оценка и прогноз экзогенных и эндогенных геологических процессов с помощью космических методов исследований. Под современной геодинамикой понимается многофакторное явление, обусловленное совокупностью природных и техногенных, эндогенных и экзогенных геологических процессов, изменяющихся в пространстве и времени.

Изучение космических методов исследования Земли актуально вследствие широкого использования такого рода данных в геологических науках. Целью дисциплины «Спутниковый мониторинг геодинамики» является формирование знаний теоретических основ, умений и навыков в области применения дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в мониторинге современных эндогенных и экзогенных геодинамических процессов.

Основные задачи изучения дисциплины «Спутниковый мониторинг геодинамики» включают: освоение теоретических и методических основ космических методов, методов обработки космических снимков, методов дешифрирования космических снимков, изучение методов анализа данных дистанционного зондирования для решения задач геодинамического мониторинга; изучение основ индикации геодинамических процессов на основе космических данных, изучение основ использования линейного анализа, изучение современных методов спутникового мониторинга эндогенной геодинамики (землетрясений, вулканизма, тектонических движений), изучение современных методов спутникового мониторинга экзогенной геодинамики (геокриогенные процессы и явления, эоловые процессы, процессы, обусловленные деятельностью поверхностных вод, процессы, обусловленные деятельностью подземных вод, склоновые процессы, обусловленные силой тяжести), изучение современных методов космического мониторинга техногенных (антропогенных) геологических процессов и явлений.

Дисциплина «Спутниковый мониторинг геодинамики» относится к дисциплинам компонента учреждения высшего образования модуля «Космические методы в геологии».

Содержание предмета учитывает наличие у магистрантов сформированных компетенций по учебным дисциплинам цикла специальной подготовки первой ступени по специальности «Геология и разведка месторождений полезных ископаемых» («Общая геология», «Геоинформатика», «Дистанционные методы в геологии»,

«Геоинформационные системы в геологии», «Геоинформационный анализ геологических данных», «Геотектоника», «Инженерная геология»).

В результате изучения дисциплины «Спутниковый мониторинг геодинамики» магистрант должен

знать:

- основы организации космической информации и космической съемки;
- методы обработки и дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли;
- пространственно-временные закономерности и механизмы экзогенной и эндогенной геодинамики;

уметь:

- пользоваться доступными источниками космических данных для мониторинга современных геодинамических процессов;
- пользоваться наиболее популярными и доступными программами для обработки и дешифрирования данных космической съемки (QGIS, SAGA, MultiSpec);
- выполнять анализ многозональной космической съемки для решения задач мониторинга геодинамических процессов;
- проводить анализ данных спутниковых наблюдений при мониторинге геодинамических процессов;
- использовать индикационные методы при анализе и оценке современных геодинамических процессов;

владеть:

- инструментами создания, обработки, дешифрирования, анализа и оценки космических снимков;
- методами автоматизированной обработки и дешифрирования данных космической съемки;
- методиками индикации современных геодинамических процессов;
- методиками геологической и эколого-геологической интерпретации данных космического мониторинга современных геодинамических процессов.

1 СПУТНИКОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА: ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1 Классификация космических методов исследования и характеристика съемочных систем

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) – получение информации о земной поверхности и объектах на ней, атмосфере, океане, верхнем слое земной коры бесконтактными методами, при которых регистрирующий прибор удален от объекта исследований на значительное расстояние. Общей физической основой дистанционного зондирования служит функциональная зависимость между зарегистрированными параметрами собственного или отраженного излучения объекта земной поверхности и его биогеофизическими характеристиками, пространственным положением. Суть метода заключается в интерпретации результатов измерения электромагнитного излучения, которое отражается либо излучается объектом и регистрируется в некоторой удаленной от него точке пространства.

Методы ДЗЗ основаны на использовании сенсоров, которые размещаются на космических аппаратах и регистрируют электромагнитное излучение в форматах, специально приспособленных для цифровой обработки, в существенно более широком диапазоне электромагнитного спектра.

По характеру измеряемого электромагнитного излучения различают два вида методов космических съемок:

- *пассивные* – исследуется естественное отраженное или собственное излучение объектов, обусловленное Солнцем и другими источниками энергии (фотографические, телевизионные, сканерные в ИК-диапазоне, гамма-спектрометрические);

- *активные* – объекты облучаются искусственным источником направленного действия и производится измерение отраженного сигнала (радарные, лидарные, радиолокационные).

Космические методы имеют следующие преимущества:

- высокая степень интегрирования информации во времени и пространстве;

- возможность одновременного отслеживания множества параметров земной поверхности;

- доступность для анализа не точечной, а пространственной информации;

- оперативность получения информации;
- большой объем информации в короткий срок.

Система космических наблюдений состоит из орбитального и наземного сегментов (рисунок 1.1). Орбитальный сегмент – базовая платформа с установленными на ней сенсорами (съемочной или регистрирующей аппаратурой) и бортовыми средствами передачи информации на станцию управления. Наземный сегмент – центр управления работой орбитального сегмента, сеть приемных станций для сбора данных орбитальных спутников, информационный центр.

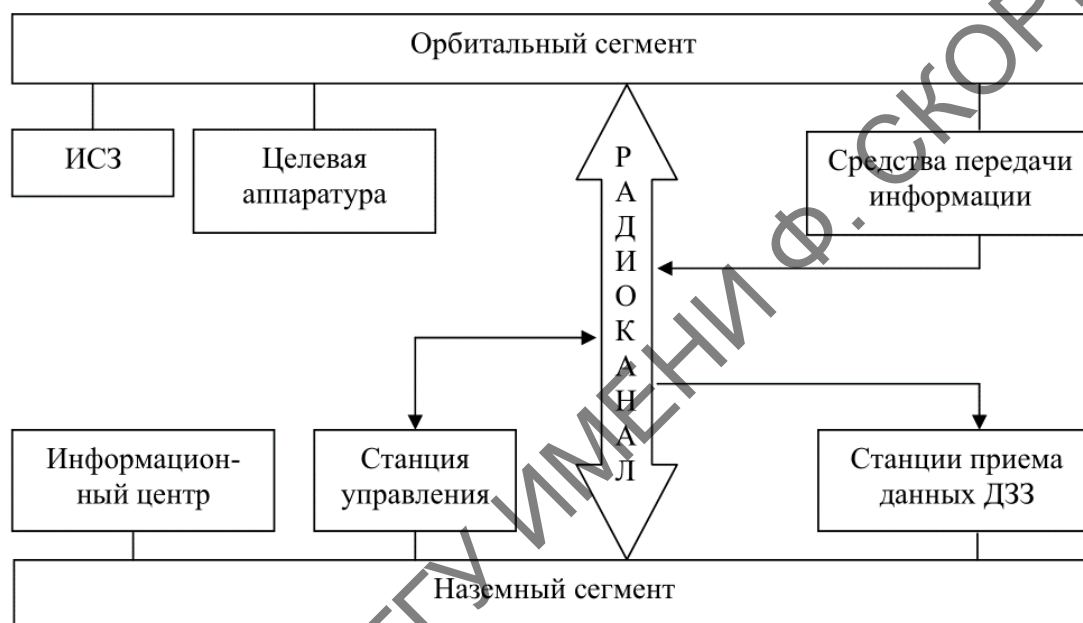


Рисунок 1.1 – Система космических наблюдений (по О. С. Токаревой, 2010)

Важными характеристиками съемочной аппаратуры являются:

- пространственное разрешение (линейные размеры минимально регистрируемого элемента – пикселя изображения);
- радиометрическое разрешение (ширина динамического диапазона сенсора – количество уровней дискретизации, соответствующих переходу от яркости абсолютно черного к абсолютно белому цвету);
- спектральное разрешение (количество диапазонов электромагнитного спектра и размер зон съемки, регистрируемых сенсором);
- временное разрешение (частота съемки определенной области земной поверхности).

По пространственному разрешению выделяют космические снимки:

- низкого разрешения – более 500 м;

- среднего разрешения – от 500 до 20 м;
- высокого разрешения – от 2 до 20 м;
- сверхвысокого разрешения – менее 2 м.

По спектральному разрешению космические снимки делятся на:

- монохроматические (однозональные, панхроматические);
- мультиспектральные (2–10 регистрируемых диапазонов);
- гиперспектральные (более 10 регистрируемых диапазонов).

Еще одной важной характеристикой съемочной системы является ширина полосы обзора (полосы захвата), которая зависит от высоты орбиты и максимального отклонения луча зрения сенсора от направления в надир.

Космическая съемка зависит от таких параметров, как высота орбиты спутника, наклон орбиты, период обращения, положение относительно Солнца.

По высоте орбиты различают:

- 200–400 км – околоземные орбиты (пилотируемые космические корабли, космические станции);
- 600–1 400 км – орбиты ресурсных и метеорологических спутников;
- 36 000 км и выше – орбиты геостационарных спутников.

По наклону орбиты (угол между плоскостью орбиты и плоскостью экватора) выделяют:

- экваториальные (угол наклона 0°);
- полярные (угол наклона 90°);
- наклонные (угол наклона около 50°).

Положение относительно Солнца зависит от угла между плоскостью орбиты и направлением на Солнце. Для космической съемки используются спутники с солнечно-синхронизированными орбитами, которые обеспечивают минимальные колебания освещенности земной поверхности вдоль трассы пролета.

Спутниковый мониторинг использует приборы и системы, дистанционных наблюдений, которые ведут съемку в диапазоне длин волн электромагнитного излучения от 0,2 мкм (ультрафиолетовое излучение) до 3 м (ультракоротких радиоволн). Оптический диапазон включает ультрафиолетовый (0,29–0,400 мкм), видимый (0,400–0,750 мкм) и инфракрасный (0,750–1,00 мкм) поддиапазоны. Диапазон инфракрасного излучения подразделяют на ближний (0,8–1,3 мкм), средний (1,3–3,5 мкм) и дальний, или тепловой (3,5–100 мкм) (рисунок 1.2).

Спутниковые системы ведут съемку земной поверхности в тех участках спектра, где атмосфера прозрачна (в «окнах прозрачности»). Основные окна прозрачности атмосферы: видимый (0,4–1,3 мкм); ближний ИК (1,9–2,5 и 3,5–4,7 мкм), дальний ИК (8,0–13,0 мкм). Излучение с длинами волн более 1 см практически не задерживаются атмосферой (рисунок 1.2).

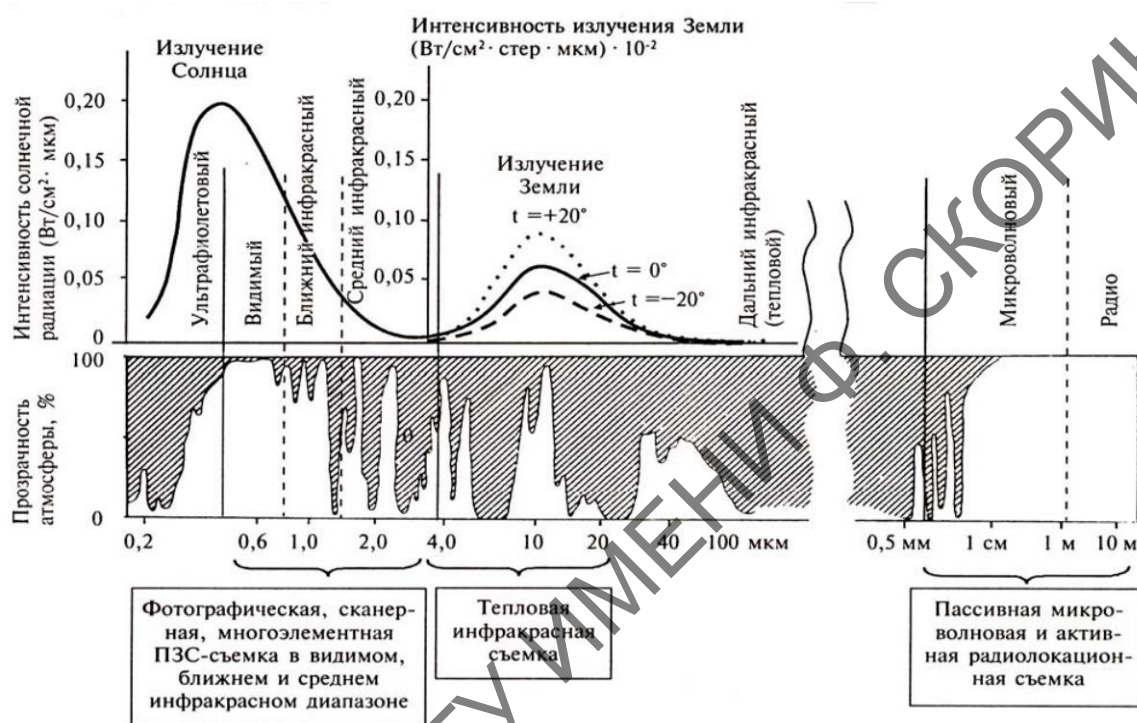


Рисунок 1.2 – Диапазоны космической съемки и окна прозрачности атмосферы (по Малинникову и др., 2008)

Для решения задач геодинамического мониторинга используются такие космические платформы, как семейство спутников Landsat, спутники Sentinel, спутник Terra.

Семейство спутников Landsat включает 8 спутников: от Landsat-1 (запущен в 1972) до Landsat-8 (запущен в 2013), т. е. программа Landsat охватывает пятидесятилетний период, начиная с 1972 г. Снимки Landsat широко используются в различных отраслях хозяйства, в научных исследованиях, в поисках и разведке месторождений полезных ископаемых, в мониторинге геологической среды и т. д.

Съемочные системы спутников Landsat представляют собой сканирующие устройства. Повторяемость съемки составляет 16–18 суток. Орбита солнечно-синхронная. Первые поколения спутников Landsat оснащались Multispectral Scanner (MSS), который вел съемку

в 4 диапазонах с разрешением 60 м. Спутники Landsat-4 и Landsat-5 получили более продвинутый сенсор Thematic Mapper (TM), который осуществлял наблюдения в 7 диапазонах с разрешением 30 м, а также имел тепловой канал (разрешение 120 м). Современное поколение семейства (Landsat-8) оснащено Operational Land Imager (OLI) и Thermal Infrared Sensor (TIRS), которые ведут съемку земной поверхности в 11 диапазонах с разрешением 15–100 м. Landsat-8 позволяет делать как многозональные, так и панхроматические снимки. Продукты Landsat находятся в свободном доступе на сайтах NASA (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/>) и геологической службы США (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Программа Copernicus Европейского космического агентства (ESA) – спутники Sentinel-1 и Sentinel-2. Sentinel-1 – радарный спутник, оснащенный радиолокационной аппаратурой с синтезированной апертурой C-SAR (разработка компании Astrium), которая обеспечивает всепогодную, а также круглосуточную поставку космических снимков. Съемка выполняется в C-диапазоне (длина волны 6 см). Скорость передачи данных на наземный сегмент – 300 Мбит/сек. Основные характеристики получаемых снимков:

- пространственное разрешение 20x5 м (в продольном и азимутальном направлении);
- угол съемки 29–46 град.;
- двойная поляризация – VH и VV;
- полоса захвата 250 км,
- периодичность съемки – 5–12 дней (в зависимости от того, перекрывается виток или нет).

Выведен на орбиту в апреле 2014 г.

Sentinel-2 – два спутника, летающих на солнечно-синхронной орбите и предназначенных для систематической мультиспектральной съемки. Сенсор Sentinel-2 ведет съемку в 13 каналах, охватывающих диапазон от 433 до 2 280 нанометров. Пространственное разрешение съемки в зависимости от канала – 10–60 м. Ширина полосы захвата – 290 км. Периодичность съемки – 2–3 дня. Sentinel-2A выведен на орбиту летом 2015 г., Sentinel-2B – в марте 2017 г. Данные Sentinel находятся в свободном доступе на Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

Terra (EOS AM-1) – транснациональный научно-исследовательский спутник (под руководством NASA). Несет на борту 5 сенсорных систем (зондов): ASTER – японский зонд, ведущий съемку в 15 диапазонах; CERES – радиометр NASA; MISR – 9 цифровых фотоаппаратов;

MODIS – гиперспектральная система, ведущая съемку в 36 диапазонах; MOPITT (Measurement of Pollution in the Troposphere) – инструмент наблюдения за загрязнением атмосферы канадского космического агентства. Ведет съемку с 2000 г.

MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer – сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения – гиперспектральная (36 спектральных зон) система на спутнике Terra. Состоит из двух сканирующих спектрометров, один из которых снимает в надир, а ось съемки второго отклонена. Пространственное разрешение 250–1 000 м. Временное разрешение – 1 сутки.

Для решения геологических задач могут быть полезны такие продукты обработки съемки MODIS, как MOD09 (отражение земной поверхности с разрешением 250, 500, 1 000 м, 8-дневный композит); MOD10 (снежный покров с разрешением 500 м, 8-дневный композит); MOD11 (температура земной поверхности с разрешением 1 и 6 км, 8-дневный композит); MOD13 (вегетационные индексы с разрешением 250, 500, 1 000 м, 16-дневный композит); MOD14 (тепловые аномалии с разрешением 1 км, ежедневно); MOD21 (температура земной поверхности с разрешением 1 км, 8-дневный композит); MOD29 (площадь и объем морских льдов с разрешением 1 км, 4- и 8-дневный композит); MCD19 (атмосферный аэрозоль, оптическая толщина с разрешением 0,5, 1, 10 км, 8-дневный композит, ежедневно) и другие.

Продукты MODIS скачиваются с сайтов:

<https://search.earthdata.nasa.gov/> (NASA);

<https://earthexplorer.usgs.gov/> (Геологическая служба США).

Аппаратура ASTER спутника Terra включает три составляющих подсистемы: VNIR, SWIR, TIR. Подсистема VNIR осуществляет съемку в видимом диапазоне (3 канала с пространственным разрешением 15 м), подсистема SWIR – в коротковолновом диапазоне (6 каналов с разрешением 30 м), подсистема TIR – в тепловом диапазоне (5 каналов с разрешением 90 м). Временное разрешение 16 суток. Полоса захвата 60 км.

ASTER имеет два канала, покрывающие диапазон 0,78–0,85 мкм. Один имеет номер 3N, другой 3В. Канал 3N направлен вертикально вниз, в то время как канал 3В направлен против направления движения спутника под углом 27,6°. Изображения в этих двух каналах, принадлежащих к ближней инфракрасной области спектра, могут быть использованы для получения стереопар. На основе стереопар могут быть получены цифровые модели рельефа, которые поставляются как SDP DEM-продукт. Таким образом, на основе съемки ASTER спутника Terra

(стереопара – каналы 3N и 3B) разработана глобальная цифровая модель рельефа – ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model). Точность этих данных в плане составляет 30 м, а точность по высоте – 20 м.

Снимки ASTER находятся в свободном доступе на сайтах:

<https://earthexplorer.usgs.gov/> (Геологическая служба США);

<https://search.earthdata.nasa.gov/>;

<https://terra.nasa.gov/about/terra-instruments/aster>.

Радиолокационная съемка (РЛС) ведется с помощью активного зондирования земной поверхности. На сегодня основным методом получения радиолокационных изображений является метод синтеза апертуры приемо-передающей антенны РЛС с регулированием фазы и поляризации зондирующего сигнала. Специфику радиолокационного изображения составляет его пятнистость и характерные геометрические искажения рельефа. Перспективной технологией в радиолокационных методах является радиолокационная интерферометрия, выполняемая с пространственного базиса (две разнесенные антенны на одном носителе либо два аппарата, работающих в тандемном режиме).

В спутниковом мониторинге геодинамических процессов широко используются радиолокационные методы. При активном радиолокационном зондировании природной среды используются три основных типа приборов: радиовысотомеры (Radar Altimeter), скаттерометры (Scatterometer) и радиолокационные системы бокового обзора с реальной или синтезированной апертурой (Synthetic aperture radar – SAR). Радиолокационные высотометры применяются для измерения высотного профиля подстилающей поверхности с точностью до 1–8 м. Работа скаттерометров (измерителей характеристик рассеяния) основана на зависимости абсолютной величины удельной эффективной площади рассеяния морской поверхности и уровня ее анизотропии в азимутальной плоскости от скорости и направления приводного ветра. Они используются для определения синоптического поля ветра (Малинников и др., 2008).

Радиолокационные системы бокового обзора относятся к числу наиболее универсальных и информативных датчиков ДЗЗ в микроволновом диапазоне. Различают некогерентные радиолокационные системы, разрешающая способность которых определяется размерами реальной апертуры антенны, и РЛС с искусственным раскрытием антенны (синтезированием апертуры), где высокая разрешающая способность достигается за счет когерентной обработки отраженных сигналов, принимаемых реальной апертурой по мере движения спутника. Преимуществом некогерентных систем бокового обзора являются широкая полоса

обзора, разрешение в которой не зависит от состояния земной поверхности, а также относительная простота как самого радиолокатора, так и системы обработки информации (Малинников и др., 2006).

Радиолокационную космическую съемку проводили такие спутниковые системы, как ERS, JERS, Radarsat, Envisat и другие.

Спутниковая система ERS разрабатывалась Европейским Космическим Агентством (ESA). ERS-1 был запущен в 1991 г. на солнечно-синхронную орбиту со средней высотой 785 км; ERS-2 – в 1995 г. На этих спутниках были установлены радиовысотометр, скатерометр, инфракрасный радиометр, сенсор озона, прибор точного позиционирования, лазерные отражатели.

Envisat-1 запущен Европейским космическим агентством ESA в 2002 г. Комплекс оборудования включает лазерный рефлектор; радиолокационный высотометр; аппаратуру глобального озона; спектрометр среднего разрешения; интерферометр Михельсона; трассовый сканирующий радиометр; сканирующий спектрометр; микроволновый радиометр; орбитографический и радиопозиционный доплеровский радиолокатор; радиолокатор бокового обзора с синтезированной апертурой. Радиолокатор бокового обзора работает на частотах С-диапазона и обеспечивает всепогодное наблюдение до семи избираемых полос вдоль трассы спутника общей шириной 100 км с разрешением 30 м, либо одной полосы шириной 400 км с разрешением 100 м.

Космический аппарат разведки природных ресурсов Земли JERS-1 (Japan Earth Resources Satellite, японское название Fuyo-1, запущен в 1992 г.) оснащен комплексом аппаратуры, включающем в себя как пассивную оптико-электронную камеру, так и радиолокационную систему с синтезированной апертурой антенны. Радиолокационная система JERS-1 представляет радиолокационную систему бокового обзора с синтезированной апертурой антенны и предназначена для всепогодной съемки земной поверхности и береговой зоны моря (среднее разрешение радиолокационных изображений). Оптическая система предназначена для получения снимков земной и морской поверхности в видимом, ближнем и коротковолновом ИК диапазонах (8 каналов). В ближнем ИК диапазоне спектра предусмотрен стереоскопический режим съемки.

Спутниковая система ALOS (Advanced Land Observing Satellite), запущенная в 2006 г., оснащена панхроматической оптико-электронной системой для получения стереоскопических изображений и детального картографирования, мультиспектральной камерой и радиолокатором с синтезированной апертурой (PALSAR). PALSAR ведет съемку в трех режимах с разрешением от 7 до 100 м в полосе обзора от 20 до 350 км.

Спутниковая система Radarsat-1 (Канадское космическое агентство, запущена в 1995 г.) оснащена радаром бокового обзора с синтезированной апертурой, обладающим уникальными возможностями изменения ширины полосы съемки и пространственного разрешения. Радар выполняет съемку земной поверхности в С-диапазоне длин волн (5,6 см), с горизонтальной поляризацией излучения (НН), в диапазоне углов места от 10° до 60°. Пространственное разрешение радиолокационной съемки Radarsat-1 от 8 до 100 м.

1.2 Программное обеспечение для работы с космическими снимками

Наиболее популярными и доступными программами для работы с космическими снимками являются QGIS, SAGA, MultiSpec.

QGIS является программой с открытым исходным кодом, использование которой регулируется универсальной общественной лицензией – GNU (GNU General Public License). Основные преимущества QGIS:

- бесплатное распространение;
- свобода в использовании – пользователи не только могут изучать особенности QGIS, но и модифицировать по своим нуждам;
- постоянное развитие – QGIS разрабатывается международной группой разработчиков с 2002 г., новая версия выходит 3 раза в год;
- обеспеченность документации – имеется руководство пользователя на разных языках, обучающие курсы;
- гибкость – QGIS может взаимодействовать с разными аппаратными базами, операционными системами (Windows, Mac OS, Linux, BSD, Android), программами, форматами данных (более 60 форматов растровых данных, более 20 форматов векторных данных) и т. д.;
- взаимодействие с данными в различных проекциях и системах координат;
- обширный набор модулей, для решения разнообразных задач.

Установка QGIS осуществляется из установочных файлов, которые скачиваются с официального сайта: <http://www.qgis.org/>.

QGIS имеет модульную архитектуру, что позволяет легко добавлять разнообразные новые функции. Большинство функций реализованы как основные или внешние модули. Внешние модули находятся в официальном репозитории модулей QGIS, а также во внешних

репозиториях, совершенствуются и поддерживаются авторами. Программируются на языке Python. Официальный репозиторий модулей также находится на сайте qgis.org.

SAGA (System for Automated Geoscientific Analyses) разработана в начале 2000-х гг. на факультете геологии и географии Геттингенского университета (ФРГ). SAGA – программа с открытым исходным кодом, использование которой регулируется универсальной общественной лицензией – GNU (GNU General Public License). Разработкой географической информационной системы (ГИС) SAGA занимаются в институте географии Гамбургского университета, в институте физической географии и ландшафтной экологии Ганноверского университета Вильгельма Лейбница, в центре геоинформатики Зальцбургского университета, в отделе географии Боннского университета, в лаборатории дистанционного зондирования и ГИС Кельнского университета. SAGA написана на языке программирования C++ и характеризуется модульной архитектурой. В основу системной архитектуры SAGA входят три блока: интерфейс программирования (API – Application Programming Interface), библиотеки инструментов (Tool Libraries), графический интерфейс пользователя (GUI – Graphical User Interface). Программа работает под операционными системами Windows, Linux, Mac OS. Может использоваться в качестве портативной программы, не требующей инсталляции. Скачать SAGA можно по адресу: <http://www.saga-gis.org/>.

MultiSpec – это программа для компьютерной обработки многозональных снимков, разработанная учеными американского университета Пердью. Программа проста в использовании, имеет широкий набор функций, хорошо известна среди специалистов по обработке снимков и распространяется бесплатно. Система позволяет обрабатывать многозональные и гиперспектральные снимки. Программа занимает мало места на диске, может использоваться на большинстве компьютеров. Она включает основные функции: импорт данных; вывод многозональных снимков на экран; построение гистограмм распределения яркости; изменения формата данных; создание новых слоев данных; кластеризации снимка; определение характеристик классов; определение наилучших спектральных зон; классификация; вывод результатов классификации; вывод графиков спектральных яркостей; цветное представление корреляций выбранного класса со спектральными зонами исходного снимка; экспорт промежуточных и окончательных результатов, черно-белых или цветных изображений и текстов в другие программы. Данная программа позволяет на современном уровне анализировать космические снимки. MultiSpec скачать по адресу: <https://engineering.purdue.edu/>.

SNAP ESA (Sentinel Application Platform The European Space Agency) – это программный продукт, предназначенный для обработки и дешифрирования данных дистанционного зондирования, получаемых спутниковыми миссиями ESA со спутников Sentinel-2 A-B, Sentinel-3, Sentinel-5, Envisat, SMOS, PROBA V. Общая архитектура для всех спутников ESA разрабатывается совместно Brockmann Consult, Array Systems Computing и C-S и называется платформой приложений Sentinel (SNAP). Архитектура SNAP идеально подходит для обработки и анализа космических данных за счет ряда технологических инноваций: расширяемость, переносимость, модульная клиентская платформа, общая абстракция космических данных, управление памятью тайлов и платформа обработки графов автоматизации.

SNAP ESA позволяет производить радиометрическую калибровку данных ДЗЗ, атмосферную и радиометрическую коррекцию, расчет индексных показателей, сегментацию изображений, классификацию с обучением и без обучения в автоматическом и ручном режиме с использованием оконного интерфейса, а также интерфейса командной строки.

SNAP ESA является открытым, свободно распространяемым программным обеспечением. Его преимуществом является тесная связь программного обеспечения и аппаратного компонента, которая позволяет реализовать очень широкий функционал по обработке данных спутниковых систем ESA. За счет узкой специализации программного обеспечения предоставляется широкий спектр поддерживаемых обменных и специализированных форматов экспорта и импорта геоданных. Недостаток – наиболее полно возможности SNAP раскрываются только при работе с данными ДЗЗ, осуществляемого спутниками ESA.

Программный продукт SNAP ESA можно свободно скачать по адресу: <http://step.esa.int/main/download/>.

Наиболее мощными по инструментарию и широко используемыми лицензионными программными пакетами для работы с космическими снимками являются ENVI и ERDAS IMAGINE.

ENVI – один из наиболее эффективных и доступных программных продуктов, обеспечивающих полный цикл обработки оптико-электронных и радарных данных дистанционного зондирования Земли, а также их интеграции с данными геоинформационных систем. Модульная структура программы дает пользователям возможность приобретать только необходимые функциональные модули. Основные преимущества: интуитивно понятный графический интерфейс пользователя; лицензирован ведущими операторами космических данных;

интеграция с программными продуктами компании ESRI (пользователь может работать, используя функционал ENVI в среде ArcGIS); наличие языка программирования IDL; возможность обработки данных в облаке и на сервере; работа с данными лазерного сканирования.

ENVI реализует следующие основные группы функций работы с изображениями: базовые технологические операции работы с изображениями (ввода-вывода, редактирования, вычисления и просмотра статистик и др.); функции коррекции геометрических и радиометрических искажений известных спутниковых систем; общие технологии улучшения изображений; технологии спектрального (гиперспектрального) анализа данных; функции интерактивного дешифрирования и классификации; технологии пространственной привязки, сшивки изображений; обработка данных в радиодиапазоне; функции векторного отображения и топографического анализа данных; обеспечение большого набора картографических проекций; функции подготовки тематических карт; поддержание большого числа растровых и векторных форматов данных.

ERDAS IMAGINE сочетает в мощном и удобном программном обеспечении возможности обработки и анализа разнообразной растровой и векторной геопространственной информации, позволяя создавать такие продукты, как прошедшие улучшающие качество геопривязанные снимки, ортомозаики, карты классификации растительности, ролики полёта в «виртуальном мире», векторные карты, полученные в результате обработки аэро- и космических изображений.

Возможности **ERDAS IMAGINE**: анализ изображений, данных дистанционного зондирования; поддержка оптических панхроматических, спектральных и гиперспектральных изображений, радарных и лидарных данных; удобный для пользователя ленточный интерфейс; многоядерная и распределенная обработка данных; пространственное моделирование с растровыми, векторными данными и облаками лазерных точек, а также предварительный просмотр результатов в режиме реального времени; высокая производительность при создании мозаик; множество инструментов для обнаружения изменений; поддержка алгоритма **ERDAS ER Mapper**; возможность преобразования более 190 форматов изображений во все основные форматы.

Основным недостатком ENVI и **ERDAS IMAGINE** является их высокая стоимость для пользователей.

Задания для самостоятельной работы

1 Дайте характеристику методов космической съемки, используемых для мониторинга геодинамических процессов.

2 Чем отличаются пассивные и активные методы дистанционного зондирования Земли?

3 Приведите примеры космических съемок низкого, среднего, высокого и сверхвысокого разрешения.

4 Назовите отличия пахроматических, мультиспектральных и гиперспектральных космических снимков.

5 В каких участках электромагнитного спектра расположены окна прозрачности атмосферы?

6 Дайте характеристику инструментов и возможностей портала <http://earthexplorer.usgs.gov/>.

7 Дайте характеристику инструментов и возможностей портала <https://scihub.copernicus.eu/>.

8 Дайте характеристику инструментов и возможностей <https://search.earthdata.nasa.gov/>.

9 Продукты каких спутниковых систем можно свободно получить, используя портал <https://search.earthdata.nasa.gov/>?

10 Укажите особенности космической радиолокационной съемки. Какие она имеет преимущества и недостатки по сравнению с методами съемки в оптическом и инфракрасном диапазонах?

11 Какие спутниковые системы проводили космическую радиолокационную съемку? Какие спутниковые системы проводят ее сейчас? Где можно получить данные радиолокационной съемки?

12 Изучите возможности модуля QGIS Semi-Automatic Classification Plugin (SACP), предназначенного для работы с космическими снимками.

13 Изучите возможности работы с космическими снимками в SNAP ESA.

14 Сравните положительные и отрицательные стороны использования проприетарных программ (ENVI, ERDAS IMAGINE) и программ свободного пользования (QGIS, SAGA).

2 СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА КАК ОБЪЕКТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Понятие геодинамики

Существуют разные трактовки термина «геодинамика». Так, в тектонике и физике Земли *геодинамика* – это...

– наука о глубинных силах и процессах, обуславливающих движение масс вещества и энергии внутри Земли и в верхних твердых оболочках (Зоненшайн, Савостин, 1979);

– наука, изучающая силы, приводящие в движение кору и мантию (Артюшков, 1993);

– наука, которая изучает процессы, происходящие в тектоносфере, в верхней и нижней мантии, в ядре, изучает их взаимосвязи и влияние на них внешних сил (Рундквист, 2000);

– наука, изучающая силовые поля и поля напряжений в геосферах, порождающие их причины, а также следствия их воздействия на геологическую среду (Пушаровский, 2006);

– наука о процессах развития твердой Земли (Хаин, 2003);

– наука о внутренних преобразованиях земных недр, дающих основу для понимания происхождения рельефа, геодинамика занимается эндогенными процессами, геоморфология – экзогенными (Шейдеггер, 1987);

– фундаментальные физико-геологические процессы, протекающие в недрах Земли, приводящие к тектономагматической активности ее литосферы (Гаврилов, 2007);

– наука, которая изучает движения и деформации, происходящие в земной коре, мантии и ядре, и причины таких движений и деформаций (Теркот, Шуберт, 1985).

Современная геодинамика – это часть общей геодинамики, изучающая движения земных недр и вызывающие их причины, когда время действия последних соизмеримо с длительностью процесса наблюдений. Если более кратко, современная геодинамика – это наука о движениях Земли в реальном масштабе времени (Кузьмин, 2019).

В инженерной геологии выделяют раздел *инженерной геодинамики* – науки, которая изучает геологические и инженерно-геологические процессы и явления с целью их количественного прогноза, установления их интенсивности, степени угрозы для природно-технических систем. Различают экзогенную и эндогенную инженерную геодинамику (Ломтадзе, 1977).

Согласно В. Д. Ломтадзе (1977) инженерная геодинамика изучает геологические процессы, как природные, так и антропогенные, обусловленные инженерной деятельностью, хозяйственным использованием территорий. Инженерная геодинамика базируется на теории и практике инженерной геологии и смежных наук, занимается разработкой научных основ и методов управления геологическими процессами, их прогнозированием.

Эндогенная инженерная геодинамика изучает тектонические движения, землетрясения и вулканизм. *Экзогенная инженерная геодинамика* – экзогенные геологические процессы и явления (процессы, связанные с деятельностью ветра, подземных и поверхностных вод, с действием силы тяжести, климатических факторов; процессы, спровоцированные производственной и строительной деятельностью человека).

Различать экзогеодинамические и эндогеодинамические геологические процессы, относящиеся соответственно к внешней и внутренней геодинамике, предложил С. П. Горшков (1982).

На основе инженерной геодинамики позже была предложена экологическая геодинамика как направление, изучающее техногенные (антропогенные) геологические процессы. Предметом экологической геодинамики являются закономерности возникновения техногенных геологических процессов и явлений (Иванов, Тржицкий, 2001).

В экологической геологии выделены геодинамические экологические функции литосферы (Трофимов, Зилинг, 2002). *Экологические функции литосферы* – это все многообразие функций, определяющих и отражающих роль и значение литосферы, включая подземные воды, газ, нефть, геофизические поля и протекающие в ней геологические процессы в жизнеобеспечении биоты и, главным образом, человеческого общества. Геодинамическая функция литосферы в экологическом аспекте проявляется в ходе геологических процессов, причем эколого-геодинамические свойства литосферы обусловлены как энергетической составляющей литосферы, так и динамикой ее вещественного состава, включая рельефообразующие факторы. С этих позиций экологическая геодинамика – это раздел экологической геологии, занимающийся изучением геодинамической функции литосферы.

Экологическая геодинамика изучает эндогенные и экзогенные процессы во взаимодействии с биотой и человеком, занимается разработкой научных основ и методов управления геологическими процессами и явлениями. Таким образом, объектом исследования являются геодинамические движения – эндогенные и экзогенные геологические процессы, как часть эколого-геологической системы. Предметом

является изучение геодинамических экологических функций литосферы; анализ прямых и обратных связей геологических процессов с биотой и человеком (Трофимов, Зилинг, 2002).

Под геодинамической экологической функцией литосферы понимается функция, отражающая способность литосферы влиять на состояние биоты, безопасность и комфортность проживания человека через природные и антропогенные (техногенные) геологические процессы и явления. Их проявление и развитие в природных условиях связано как с внешними космическими факторами, так и со сбросом (разрядкой) напряжений в геофизических полях Земли, а воздействие геологических процессов на биоту – с перемещением вещества земной коры и преобразованием рельефа. Следовательно, геодинамические экологические свойства литосферы обусловлены как энергетической составляющей литосферы, так и динамикой ее вещественного состава, включая рельефообразующие факторы. Становление этих свойств литосферы шло параллельно с эволюцией Земли и биосферы и отличалось пульсационным развитием. Эпохи активизации геологических процессов и катастроф сменялись этапами их затухания и стабилизации. На современном этапе особое значение в оценке влияния на биоту имеют антропогенные геологические процессы.

Отличительной чертой геодинамической функции является возможность ее реализации как непосредственно в виде негативного по отношению к биоте явления, так и опосредованно – через ресурсную, геофизическую или геохимическую функции. Так, оценку площадной эрозии можно рассматривать через интенсивность процесса и площадную пораженность им определенной территории (геодинамический критерий оценки), либо через потерю или сокращение запасов гумуса, земельных ресурсов (ресурсный критерий оценки).

В настоящее время наметились два подхода к оценке воздействия геодинамического фактора литосферы на биоту (Трофимов, Зилинг, 2002). Первый из них связан с анализом и оценкой воздействия отдельных геологических процессов или их парагенетических комплексов, главным образом, на человека и сводится к выявлению экологических последствий проявления этих процессов. Второй подход связан с изучением современных геодинамических зон и аномалий литосферы и их интегральным воздействием на биоту, включая человека. Эти зоны определяют особенности распределения напряженного состояния массивов горных пород, развитие участков повышенной трещиноватости и проницаемости, что, в свою очередь, влияет на особенности циркуляции подземных вод, интенсификацию неблагоприятных геологических

и экологически опасных техногенных процессов. Активные геодинамические аномалии могут контролировать проникновение физических и химических загрязнителей в литосферу, влиять на окружающий ландшафт, биологические объекты, на здоровье человека и существенно снижать ценность земельных ресурсов, влиять на уровень земельной ренты в пределах городских территорий (Трофимов, Зилинг, 2002).

Оценка воздействия геологических и других природных и техногенных процессов на экосистему в целом и человека в частности, как и оценка состояния эколого-геологических условий могут осуществляться по комплексу критериев и показателей, которые могут быть разбиты на четыре группы (Трофимов, Зилинг, 2002):

- 1) геодинамические, оценивающие масштаб и интенсивность развития геологических процессов;
- 2) характеризующие возможные экологически неблагоприятные изменения абиотических компонентов ландшафта и его литогенной основы в результате активно действующих геологических процессов;
- 3) биологические, характеризующие изменение разных представителей биоты и их комплекса в целом;
- 4) социально-экономические.

Таким образом, современная геодинамика – это многофакторное явление, обусловленное совокупностью природных и техногенных, эндогенных и экзогенных процессов, изменяющихся в пространстве и времени.

Объектом мониторинга как системы наблюдения, оценки и прогноза служит экзогенная и эндогенная современная геодинамика.

2.2 Классификация геодинамических процессов

Геодинамические процессы классифицируют по разным критериям. В общем виде классификация геодинамических процессов имеет следующий вид:

- 1 Эндогенные процессы:
 - 1.1 Сейсмические (землетрясения).
 - 1.2 Вулканические.
 - 1.3 Тектонические движения.
- 2 Экзогенные процессы:
 - 2.1 Процессы, вызванные геологической деятельностью подземных вод.
 - 2.2 Процессы, вызванные геологической деятельностью поверхностных вод.

2.3 Процессы, вызванные силой тяжести на склонах.

2.4 Процессы, вызванные деятельностью ветра.

2.5 Процессы, вызванные действием климатических факторов.

В экологической геологии по генезису (происхождению) выделяют:

- природные геологические процессы;
- природно-антропогенные геологические процессы;
- антропогенные (техногенные) геологические процессы.

По степени опасности для человека и его систем жизнеобеспечения (геоэкологическая классификация геологических процессов) различаются:

- неблагоприятные геологические процессы;
- опасные геологические процессы;
- катастрофические геологические процессы.

Катастрофические геологические процессы – это процессы, которые нарушают нормальное функционирование природных и природно-антропогенных геоэкосистем, вызывают их разрушение. К ним следует относить процессы, представляющие непосредственную угрозу для жизни человека и характеризующиеся неопределенностью момента возникновения и интенсивного проявления. К катастрофическим процессам относят землетрясения, оползни, сели, лавины, обвалы, провалы.

Опасные геологические процессы – это процессы, которые оказывают непосредственное воздействие (механическое, химическое и др.) на абиотическую компоненту геоэкосистем и только опосредованно, через ее изменение или разрушение, на биоту и собственно человека. Опасные процессы приводят к бедствиям регионального, планетарного, реже локального масштабов. Нередко такие процессы называют «ползучими катастрофами». Типичными представителями таких процессов являются ветровая, овражная, плоскостная эрозия, термокарст и некоторые другие процессы.

Неблагоприятные геологические процессы – это процессы, которые не представляют непосредственной угрозы для жизни человека, не приводят к разрушению абиотической составляющей геоэкосистем, но негативно воздействуют на условия жизнедеятельности человека через нарушения эксплуатации технических систем. Это процессы длительного действия, с продолжительным периодом подготовки, как правило, с отдаленными и опосредованными экологическими последствиями как для человека и его систем жизнеобеспечения, а также для природных экосистем. При оценке уровня экологического воздействия или состояния геоэкосистемы они будут соответствовать зонам нормы или риска.

Неблагоприятные процессы достаточно условно (по возможной площади поражения) можно расположить в следующий ряд: заболачивание, термокарст, боковая и донная эрозия, суффозия, пучение, наледообразование (Гусев, 2017).

Геологические процессы, связанные с деятельностью человека (техногенные или антропогенные), можно классифицировать следующим образом:

1 Антропогенный литогенез:

1.1 Наземный (субаэральный) литогенез.

1.2 Подводный (субаквальный) литогенез.

1.3 Подземный (субтерральный) литогенез.

2 Геотермические процессы и явления:

2.1 Антропогенные геологические процессы, вызванные замерзанием грунтов и вод: увеличение мощности и образование «вечной мерзлоты»: морозное пучение; образование подземного льда; образование наледей; морозное выветривание.

2.2 Антропогенные геологические процессы, вызванные протаиванием мерзлых грунтов и вод: термопросадка, термокарст; солифлюкция; деградация мерзлоты.

2.3 Антропогенные геологические процессы, вызванные обогревом, обжигом и плавлением грунтов: термоусадка; окаменение грунтов; образование пустот; сдвигание грунтов; проседание поверхности.

3 Гидролитогенные процессы и явления, вызванные изменением подземной гидросферы:

3.1 Антропогенные геологические процессы, вызванные понижением уровня подземных вод и осушением грунтов: образование депрессий подземных вод; сжатие грунтов и оседание поверхности; уменьшение водности рек, исчезновение родников, рек, прудов, болот; увеличение зоны аэрации; глубины сезонного промерзания.

3.2 Антропогенные геологические процессы, вызванные повышением уровня подземных вод и обводнением грунтов: подтопление; заболачивание; набухание грунтов; развитие склоновых процессов (оползней); просадка лессовых грунтов; уменьшение зоны аэрации; уменьшение глубины сезонного промерзания.

3.3 Антропогенные геологические процессы, вызванные фильтрационно-гидродинамическими факторами: техногенная механическая суффозия; прорыв подземных вод и пльвунов в выработки; суффозионное проседание поверхности; суффозионные провалы; перетоки через водоупоры.

3.4 Антропогенные геологические процессы, вызванные химическим воздействием: загрязнение грунтовых и напорных пресных вод; химическая суффозия; антропогенный карст; засоление грунтов.

4 Процессы и явления, вызванные изменением напряженного состояния массива грунтов:

4.1 Геостатические антропогенные геологические процессы (вызванные статическими нагрузками): гравитационное сжатие грунтов и оседание поверхности; гравитационные оползни и обвалы; гравитационный выпор грунтов.

4.2 Литодинамические антропогенные геологические процессы (вызванные динамическими нагрузками): вибрационное уплотнение грунтов и оседание поверхности; ударное и взрывное сжатие и разрыхление грунтов; вибрационно-динамическое смещение грунтов на склонах (оползни, обвалы, осыпи); тиксотропное разжижение грунтов и оседание поверхности.

4.3 Антропогенные геологические процессы, вызванные подземными выработками: горное стреляние; обрушение; выжимы и вывалы твердых грунтов; выбросы угля, газа, соли; движение грунтов в массиве; образование мульд проседания и провалов.

4.4 Антропогенные геологические процессы, вызванные открытыми выработками: эрозия откосов; гравитационные процессы в откосах; пучение дна выработок; затопление выработок.

4.5 Антропогенные геологические процессы, вызванные извлечением из недр нефти и газа: механическая суффозия; суффозионные просадки и провалы; антропогенные «гейзеры»; дегазация пород; оседание земной поверхности.

5 Гидрогенные процессы и явления, вызванные изменением поверхностной гидросферы:

5.1 Антропогенные геологические процессы, вызванные созданием антропогенной гидрографической сети (водохранилищ, каналов, прудов): затопление, подтопление, заболачивание; береговые оползни и обвалы; просадка лессовых грунтов; антропогенный карст; субаквальное осадкообразование.

5.2 Антропогенные геологические процессы, вызванные нарушением естественного стока атмосферных вод: антропогенная (ускоренная) эрозия; заболачивание; антропогенное селеобразование; антропогенные оползни.

Опасность конкретного геологического процесса обусловлена его экологическими последствиями. Типичными экологическими последствиями этих процессов могут быть: загрязнение воздушного бассейна;

загрязнение поверхностных вод; нарушение (разрушение) почвенного покрова; снижение плодородия почв; нарушение растительного покрова; повреждение транспортных коммуникаций, трубопроводов; аварии газо- и нефтепроводов, вызывающие загрязнение окружающей среды; аварии хранилищ токсичных веществ, вызывающие загрязнение окружающей среды; нарушение устойчивости фундаментов зданий и сооружений; повреждение зданий и сооружений; ухудшение санитарно-гигиенических условий в помещениях; ухудшение качества окружающей среды; нанесение вреда здоровью человеческого населения.

Объектами воздействия геологических процессов являются население, окружающая человека среда, технические системы, природные экосистемы. Оценка поражающего действия производится по таким параметрам: число пострадавших людей; продолжительность поражающего воздействия; площадь зоны поражения; затраты на проведение аварийно-спасательных работ; экономический ущерб; число разрушенных, поврежденных объектов, степень их повреждения; продолжительность восстановительного периода; площадь земель, частично или полностью исключенных из сельскохозяйственного оборота; продолжительность периода восстановления сельскохозяйственных угодий; величина погибшего урожая, численность погибших домашних животных; площадь уничтоженных, пострадавших лесных массивов; площадь загрязнения опасными веществами почв, грунтов, подземных, поверхностных вод; продолжительность периода (само)очистки загрязненных почв, грунтов, подземных, поверхностных вод; продолжительность периода рекультивации загрязненных участков (Гусев, 2017).

Задания для самостоятельной работы

- 1 Какие существуют трактовки понятия «геодинамика»? Что понимается под современной геодинамикой?
- 2 Какие существуют классификации геодинамических процессов?
- 3 Приведите примеры и дайте краткую характеристику природных и техногенных (антропогенных) геодинамических процессов.

3 ИНДИКАЦИЯ СОВРЕМЕННЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

3.1 Основные понятия индикации

В самом общем виде *индикация* – это оценка сложного объекта (индиката) по какому-либо его элементу или свойству (индикатору). Она включает в себя методики выявления индикаторов, установления их отличительных характеристик и свойств, выяснения связи между индикатором и индикатом, оценки тесноты этой связи и условий применимости индикаторов.

Классификацию индикационных исследований проводят по практическим задачам; по индикатам (объектам индикации); по используемым индикаторам.

Существует множество различных «индикаций». Например, только геоботаническая индикация (индикатор – растительность) представлена:

- педоиндикацией (индикация почв);
- литоиндикацией (индикация горных пород);
- гидроиндикацией (индикация подземных вод);
- индикацией мерзлотных условий;
- индикацией полезных ископаемых;
- индикацией естественных и антропогенных процессов (Викторов, Ремезова, 1988).

Использование индикации в геологии началось еще в 19 в. – в работах А. М. Карпинского, который считал, что по растительности можно судить о горных породах (Викторов, Ремезова, 1988; Обуховский, 2008).

В русскоязычной научной литературе в связи с применением дистанционных методов для решения различных задач часто используется термин *ландшафтная индикация*, под которой понимается определение труднонаблюдаемых компонентов ландшафтов по его внешнему облику. Труднонаблюдаемый компонент ландшафта – *индикат*, легконаблюдаемый компонент – *индикатор*.

Основные положения ландшафтной индикации рассмотрены в работах С. В. Викторова (Викторов, Ремезова, 1988; Викторова, Чикишев, 1985), Б. В. Виноградова (1964), Ю. М. Обуховского (2008, 2020).

С позиций ландшафтной индикации компоненты ландшафта делят на физиономичные (доступные для непосредственного визуального наблюдения и аэрокосмофотографирования) и деципиентные (труднонаблюдаемые, скрытые, требующие для их изучения различные

инструментальные или специальные технические средства). Совокупность физиономичных компонентов ландшафта называют *эктоярусом*; совокупность деципиентных компонентов – *эндоярусом*.

По доминирующим в ландшафтной индикации представлениям наибольшее значение среди физиономичных компонентов имеют рельеф и растительность. Различают частные и комплексные индикаторы. К частным индикаторам относят ботанические, геоботанические, геоморфологические, гидрологические, антропогенные. Сам эктоярус рассматривается как комплексный индикатор.

По характеру связи с индикатором выделяют прямые (непосредственно связаны с индикатором) и косвенные (связаны с индикатором опосредованно через промежуточные звенья) индикаторы.

По степени географической устойчивости связи индикатор-индикат выделяют:

- панареальные индикаторы – сохраняют единообразную связь с индикатором в пределах своего ареала;
- региональные индикаторы – связь сохраняется в пределах части ареала (одна или несколько физико-географических областей);
- локальные индикаторы – связь сохраняется только в пределах географического района.

Ландшафтная индикация внесла существенный вклад в геологическое картирование и в определенной степени оказалась пригодна для изучения геодинамических процессов и явлений.

Индикационное дешифрирование при изучении геодинамики основано на обнаружении и идентификации ландшафтных индикаторов современных геодинамических процессов на аэрокосмических снимках. В основу положено представление о том, что в структуре ландшафтного покрова отражены проявления геодинамических процессов. Ландшафтные индикаторы тектонических структур (геоиндикаторы) представляют собой как отдельные компоненты и элементы, так и ландшафты в целом, связанные с характером отражения структурных форм и современных геодинамических процессов.

Так, например, для территории Беларуси среди частных индикаторов наиболее информативны гляциогенные признаки, дешифрируемые по внешнему облику морфолитогенной основы ландшафтов (Обуховский, 2008). Такими индикаторами выступают гляциодислокации, ложбины ледникового вспахивания и размыва, так как динамика ледников контролировалась неотектоническими процессами.

Такие тектонические структуры, как разломы, как правило, четко видны на космических снимках. Для успешного дешифрирования разломов необходимо вначале отбраковать объекты, связанные с антропогенной деятельностью и экзогенными процессами. Пример дешифровочных признаков тектонических структур по работе Р. Г. Гарецкого и др. (2013) приведен в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Дешифровочные признаки основных геологических структур (по Р. Г. Гарецкому и др., 2013)

| Индикат | Признаки |
|---|--|
| Тектонически активные блоки земной коры, испытывающие поднятие | Светлый фототон изображения, мозаичный рисунок фотоизображения, обусловленный чередованием пятен светлого, осветленного и других тонов |
| Тектонически активные блоки земной коры, испытывающие опускание | Темно-серый однородный рисунок с отдельными светлыми участками и расплывчатыми пятнами серого цвета – на пахроматических снимках; ровный бесструктурный затемненный рисунок, осложненный дедровидными полосами водотоков – на мультиспектральных снимках |
| Зоны сочленения тектонически активных блоков | Контрастная линейно расположенная зона смены фототона и рисунка изображения |
| Новейшие активные разломы и их зоны | Узкие системы чередующихся светло-серых полос фототона на общем светло-сером тоне – на панхроматических снимках и аэрофотоснимках; узкие системы чередующихся полос разного цвета – на мультиспектральных снимках; линейно вытянутый рисунок фотоизображения |
| Узлы пересечения разломов | Зоны пересечения систем чередующихся полос фототона, а также рисунка изображения между собой с дугообразными линиями |
| Кольцевые структуры | Радиальный полосчатый фоторисунок; кольцевые и дугообразные осветленные линии в пределах общего фототона; изометрично ориентированные полосы светлого тона и темно-серые мелкие пятна, пересекающие области с разным рисунком и тоном; рисунок фотоизображения «битая тарелка» |

3.2 Оценка достоверности индикаторов

Одним из главных недостатков ландшафтной индикации (и соответственно ее разновидностей) является почти полное игнорирование оценки достоверности связи индикатора и индиката на основе математической статистики. Такая оценка стала развиваться в работах Б. В. Виноградова (1984).

Дистанционные индикаторы представляют собой совокупности дешифровочных признаков (индикаторов) X для описания исследуемых объектов (индикатов) Ω (Виноградов, 1984). Такие признаки могут быть прямые и косвенные. Они иерархичны тематически и вместе составляют полную индикационную функцию. Индикаторы также иерархичны хронологически – представляют собой систему разномасштабных уровней.

По Б. В. Виноградову (1984) оценка дистанционных индикаторов определяется несовпадением пространства признака (X) и объекта (Ω). Достоверность распознавания Ω по X вычисляется пространственной частотой (площадь или число) совпадения области Ω и X , т. е. соотношением правильной индикации T к области индиката данного класса Ω (рисунок 3.1).

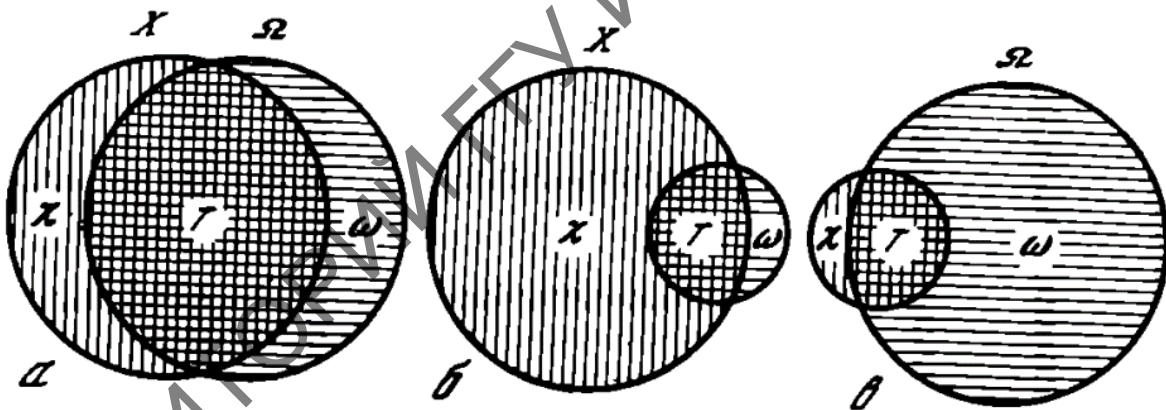


Рисунок 3.1 – Соотношение пространства индикаторного признака (X) и объекта индикации (Ω) при картировании (а), при поисковых работах (б и в) (Виноградов, 1984)

Отношение $T/\Omega < 1$. По частоте встреч индикатора на индикате Ω предложено различать 5 классов индикаторов. Эти классы определяются в процентах нахождения индикатора на объекте индикации T от об-

щего числа площадок (точек, пикселей) на объекте индикации Ω . Выделены следующие классы индикаторов:

- фоновые индикаторы – встречаются на 80–100 % площадок на объекте индикации;
- обильные индикаторы – встречаются на 60–79 % площадок на объекте индикации;
- спорадические индикаторы – встречаются на 40–59 % площадок на объекте индикации;
- редкие индикаторы – встречаются на 20–39 % площадок на объекте индикации;
- единичные индикаторы – встречаются на менее 20 % площадок на объекте индикации.

Оценку достоверности индикатора по T/Ω затрудняет отсутствие информации об истинном значении частоты встречаемости исследуемого объекта Ω . Как правило, достоверность индикации определяется на проверочных (эталонных, ключевых) участках и пробных площадках путем сопоставления результатов дешифрирования с наземными наблюдениями.

Оценку достоверности можно проводить по сопряженности индикатора с объектом индикации, по отношению области правильной индикации T к области признака X , т. е. T/X (выражается в процентах от общего числа площадок). Выделяют 6 классов индикаторов:

- исключительные – вероятность правильного распознавания $P > 0,95$;
- облигатные, или постоянные – вероятность $P = 0,80–0,95$;
- факультативные, или переменные – вероятность $P = 0,60–0,79$;
- условные – вероятность $P = 0,40–0,59$;
- относительные – вероятность $P = 0,10–0,39$;
- негативные, или отрицательные – вероятность $P < 0,10$ (Виноградов, 1984).

Условные плотности распределения вероятностей значений индикаторов X объектов Ω и не- Ω показывают два рода ошибок:

1 Объекта нет, а признак есть (т. е. при дешифрировании объект ошибочно относится к классу Ω) – ошибка комиссии (ошибка смешения, ложная классификация), которая вычисляется отношением пространственной частоты неправильных определений индикатора X к общей частоте (числу или площади) объектов класса Ω (рисунок 3.1, б).

2 Объект есть, а признака нет – ошибка оmissions (ошибка пропуска цели), которая вычисляется по соотношению пространственной ча-

стоты пропущенных объектов по индикатору X к общей частоте объектов данного класса (рисунок 3.1, в).

Оценка индикаторов усложняется из-за их многоуровненности, при этом вероятности правильного распознавания объекта по индикатору на каждом уровне умножаются: $P_0 = P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_i$ (Виноградов, 1984).

Суммарная ошибка дистанционной индикации также вычисляется по сумме квадратов ошибок на разных уровнях индикации.

В случае нормального распределения для оценки связи между индикатором и индикатами, характеризуемой качественными показателями, может использоваться показатель сопряженности трансформированного коэффициента Дайса (ТКД), который рассчитывается по формуле: $TKD = (a - (\text{минимальное из } b \text{ или } c)) / (a + (\text{минимальное из } b \text{ или } c))$, где a – число случаев совместных встреч индикатора и класса индиката; b – число случаев, когда индикатор встречается в других классах; c – число случаев, когда данный класс встречается без данного индикатора. ТКД отражает степень перекрытия амплитуды распространения данного индикатора и класса индиката, т. е. позволяет оценить связь индикатора с определенными классами индиката (Гусев, 2006). Достоверность ТКД оценивается критерием Пирсона χ^2 , который в этом случае равен: $\chi^2 = (a - (\text{минимальное из } b \text{ или } c))^2 / (a + (\text{минимальное из } b \text{ или } c))$, число степеней свободы – 1, что позволяет считать достоверно отличающимся от 0 любой коэффициент, критерий Пирсона χ^2 для которого превысил 3,84.

В связи с развитием космических многозональных съемок и компьютерных средств обработки и анализа описанная выше оценка индикаторов рассматривается в терминах оценки классификации.

Цель классификации состоит в замене визуального анализа снимка автоматизированной процедурой идентификации объектов. В процессе такой идентификации каждый пиксел цифрового снимка относят на основании некоторых статистических критериев к одному из классов пространственных объектов. В зависимости от классифицирующего признака различают: распознавание спектральных образов – классификация на основе спектральной яркости; распознавание пространственных образов – классификация на основе геометрической формы.

Выделяют информационные и спектральные классы. *Информационные классы* – это объекты земной поверхности, которые нужно распознать на снимке (элементы растительного покрова и рельефа, типы горных пород, геологические структуры). *Спектральные классы* – это группы пикселей, характеризующихся одинаковой яркостью в определенном спектральном диапазоне. Основная цель классифика-

ции – совмещение спектральных и информационных классов. В реальности полное и однозначное соответствие между этими типами классов наблюдается редко. Как правило, одному информационному классу соответствуют два или три спектральных, некоторые спектральные классы вообще не соответствуют никаким объектам.

Классификация данных космической съемки является процессом получения из космических снимков земной поверхности тектонической, геологической, геоморфологической, экологической и другой информации.

Все методы классификации делят на две большие группы:

- контролируемая классификация (классификация с обучением);
- неконтролируемая классификация (классификация без обучения, автономная классификация).

При контролируемой классификации используют эталонные области, которые выбираются в соответствии с их принадлежностью к определенному информационному классу. Выбор этих областей основывается на имеющейся информации об объектах земной поверхности на данной территории. Следовательно, разделение всех объектов на определенные классы контролируется. Значения пикселей эталонных областей в различных спектральных диапазонах используются в качестве обучающих выборок для настройки программы распознавания. Для каждой эталонной области определяется совокупность спектральных признаков, задающих один класс пикселей на космическом снимке. После этого каждый пиксел снимка относится к тому или иному классу на основании последовательного сравнения со всеми выбранными эталонами. Таким образом, при контролируемой классификации сначала определяются информационные классы, а затем соответствующие им спектральные.

Контролируемая классификация основана на стандартных методах многомерной статистики – сигнатуры сканерного снимка рассматриваются как объекты многомерного спектрального пространства.

При неконтролируемой классификации порядок действий противоположный: сначала выделяются спектральные классы, а затем их пытаются сопоставить с реальными объектами земной поверхности. Классификация осуществляется с помощью кластерного анализа, при этом обычно указывается количество вероятных групп (кластеров), на которые можно разделить весь набор исходных данных. Кроме того, могут устанавливаться критерии разделения различных кластеров и возможный разброс значений внутри каждого из них. Процедура разделения на

кластеры является итерационной. На каждом этапе оператор может объединять или разделять определенные кластеры. Таким образом, классы объектов при неконтролируемой классификации не определяются заранее, а выявляются в результате математических действий.

Контролируемую классификацию применяют в тех случаях, когда заранее известны объекты земной поверхности, число выделяемых классов невелико и они четко различаются. Такая классификация выполняется в несколько этапов: определение задач и выбор способа классификации; выбор эталонных областей; проведение классификации; оценка качества классификации.

Основными способами контролируемой классификации являются: способ спектрального угла; способ минимального; способ параллелепипедов; способ максимального; способ дистанции Махаланобиса; бинарное кодирование. Выбор способа классификации обусловлен особенностями исходных данных и решаемых задач.

Неконтролируемая классификация – это процедура, при которой распределение пикселей снимка производится автоматически, на основе анализа статистического распределения их яркости. Такая классификация применяется в тех случаях, если неизвестно сколько и каких объектов зафиксировано на снимке или значительное число объектов, которые имеют сложные границы. Итогом классификации будет дешифрирование полученных классов, т. е. установление соответствующих им объектов земной поверхности. Наиболее распространенными методами неконтролируемой классификации являются метод ISODATA и метод К-средних (кластеризация).

Обязательным моментом является оценка качества (достоверности) классификации, которая производится визуально (для выявления грубых ошибок) или количественно (если имеются контрольные участки с наземными данными – полевыми работами, картами).

В области дешифрирования космических снимков термин *точность* описывает меру согласованности между тематической картой, полученной на основе классификации снимка, и контрольной картой, полученной на основе нескольких источников данных. Простейшим методом определения точности классификации является сравнение этих двух карт. Оценку общей точности определяют в единицах площади объектов каждого класса, не обращая внимания на несовпадение объектов в отдельных точках сравниваемых карт. При оценке точности контролируемой классификации используется обучающая выборка (для надежности имеющиеся данные делят на две части, чтобы одну часть

использовать как обучающую выборку, а вторую – для оценки точности классификации).

Стандартной формой представления оценки точности классификации является матрица ошибок, которая характеризует не только погрешность классификации каждого класса, но и ошибки, вызванные неправильной классификацией. Матрица ошибок состоит из n столбцов и n строк, где n – число классов объектов на контрольной карте. Строки матрицы – это истинные классы, которые даны на контрольной карте, столбцы – классы, которые выделены в результате классификации. Диагональные элементы матрицы – это количество точек, принадлежащее одинаковым классам на обеих картах. Информация о ложной классификации или пропусках классификации представлена в недиагональных элементах матрицы. В качестве примера в таблице 3.2 показана матрица ошибок классификации (выделено 4 класса объектов земной поверхности – подвижные пески, закрепленные пески, солончаки, коренные породы).

Таблица 3.2 – Пример матрицы ошибок классификации (число пикселей)

| Фактический класс | Расчетный класс | | | | Всего |
|--------------------|-----------------|--------------------|-----------|-----------------|-------|
| | Подвижные пески | Закрепленные пески | Солончаки | Коренные породы | |
| Подвижные пески | 900 | 0 | 100 | 0 | 1 000 |
| Закрепленные пески | 100 | 700 | 100 | 100 | 1 000 |
| Солончаки | 100 | 0 | 900 | 0 | 1 000 |
| Коренные породы | 0 | 0 | 0 | 1 000 | 1 000 |
| Всего | 1 100 | 700 | 1 100 | 1 100 | 4 000 |

В таблице 3.3 описываются результаты оценки пропусков и ложной классификации, выполненной на основе вышеуказанной матрицы ошибок. Оценить точность классификации можно с помощью различных показателей:

- общая точность – процент правильно классифицированных пикселей;
- точность по строке (классификации отдельного класса) – на основе суммы числа пикселей в строке;
- точность по столбцу (классификации отдельного класса) – на основе суммы числа пикселей в столбце;

- средняя точность – среднее значение точности по всем строкам или по всем столбцам;
- каппа – оценка классификации после исключения случайных совпадений.

Таблица 3.3 – Ошибки, связанные с ложной классификацией и пропусками классификации

| Класс | Пропуск | | | Ложная классификация | | |
|--------------------|---------------------|---------------------------|----------------|----------------------------------|---------------------------|----------------|
| | Пропущенные пиксели | Общее количество пикселей | Процент ошибок | Ложно-классифицированные пиксели | Общее количество пикселей | Процент ошибок |
| Подвижные пески | 100 | 1 000 | 10,0 | 200 | 1 100 | 18,2 |
| Закрепленные пески | 300 | 1 000 | 30,0 | 0 | 700 | 0 |
| Солончаки | 100 | 1 000 | 10,0 | 200 | 1 100 | 18,2 |
| Коренные породы | 0 | 1 000 | 0,0 | 100 | 1 100 | 9,1 |

Расчет показателя точности классификации каппа выполняется по формуле:

$$\text{Каппа} = (P_o - P_e) / (1 - P_e),$$

где P_o – наблюдаемая величина;

P_e – случайные совпадения.

Например, точность выделения класса «Подвижные пески» по строке составляет 90,0 %, а точность выделения этого класса по столбцу – 81,8 %. Точность выделения класса «Закрепленные пески» соответственно – 70,0 и 100,0 %. Средняя точность классификации по строкам – 87,5 %. Средняя точность классификации по столбцам – 88,6 %. Общая точность классификации составляет $3500/4000 = 87,5 \%$.

3.3 Индикация геодинамических процессов

Как признают сами классики ландшафтной индикации, ландшафтная индикация процессов уже 50 лет находится на стадии разра-

ботки. В их работах указываются, что наиболее перспективной является индикация по ландшафтно-генетическим рядам, различая при этом стадийно-синхронную, ретро- и прогнозную индикацию. Стадийно-синхронная индикация использует в качестве индикаторов ландшафтно-генетические ряды, которые представляют собой пространственные ряды различных элементов ландшафта, переходящие друг в друга под влиянием определенного процесса, т. е. пространственный ряд, превращенный во временной. Возможность индикации процесса по ландшафтно-генетическому ряду обосновывается тем, что сам ряд является результатом процесса и развивается по мере его хода (Викторов, Чикишев, 1990).

Связь процесса и соответствующего ряда наиболее четко проявляется в рядах растительных сообществ, формирующихся в ходе генетически обусловленных смен во времени. Поэтому ряды растительных сообществ, порожденные влиянием тех или иных процессов, широко используются для индикации этих процессов. Такие ряды относятся к эколого-генетическим и являются частным вариантом ландшафтно-генетических рядов.

Существенная проблема – далеко не всякий экологический ряд, т. е. расположение фитоценозов по какому-либо фактору (влажность, плодородие почв, засоленность почв и т. д.) в пространстве, будет соответствовать их смене по времени.

Викторов С. В. предлагал в качестве надежных признаков ландшафтно-генетического ряда следующие признаки: плавность перехода одного члена ряда в другой; наличие экологических реликтов, т. е. фрагментов более старого члена ряда в более молодом (Викторов, Чикишев, 1990).

Виноградов В. Б. ряды экосистем, построенные по пространственному профилю, называет топоэкологическими. *Транспонирование* (переворачивание) – это операция перевода топоэкологического ряда в динамический (временной) ряд, которая применяется в геоботанике и экологии растений более 100 лет. Такие ряды составляются экспертным способом и являются умозрительными (Виноградов, 1998).

Ретроиндикация – индикация прошлых процессов, которая выполняется по реликтовым элементам в современном ландшафте. Ретроиндикация представляет собой определение характера и направленности процесса. В качестве индикаторов выступают те или иные физиономические элементы, возникшие в результате этого процесса (Викторов, Чикишев, 1990).

Прогнозная индикация – индикация будущих процессов по неким признаками-«зародышам»; индикационный анализ с целью предсказания вероятности процесса, который еще не начался или проявился в каких-то начальных стадиях (Викторов, Чикишев, 1990).

В связи с широким развитием дистанционных методов, увеличением количества спутниковых систем, их временного и пространственного разрешения ведущим методическим приемом при изучении геологических и других процессов, протекающих на земной поверхности, являются повторные космические съемки (Виноградов, 1981, 1998).

В ландшафтной экологии разработаны автоматические методы обнаружения изменений по серии снимков, методы анализа временных рядов, оценки трендов. Для изучения долговременной динамики сложных объектов (ландшафтов, экосистем, геосистем) используются цепи Маркова (Виноградов, 1998).

Марковские цепи – один из типов стохастических моделей. В основе марковских цепей первого порядка лежат два основных положения:

- 1) число состояний конечно;
- 2) вероятность изменения одного состояния в любое другое зависит только от текущего состояния, а не от предыдущих состояний.

Использование цепей Маркова является основным способом изучения долговременной динамики сложных экосистем (геосистем), в том числе вызванной экзогенными геологическими процессами, которые индицируются по комплексу растительных, геоморфологических и других индикаторов. Построение цепей Маркова производится на основе аэро- и космической съемки. Продолжительность интервала между съемками должна быть оптимальной. Слишком большой интервал может привести к потере переход-скачков, в особенности катастрофического характера. Слишком короткие интервалы создают трудности обработки данных. Оптимальным интервалом является 5–10 лет. Для удобства обработки данных желательно использовать равномерные интервалы между съемками (Виноградов, 1998).

Рассмотрим в качестве примера использование марковской модели при изучении дефляционного процесса в пустынном ландшафте. Классы дефляции выделены в ходе дешифрирования космических снимков данной территории, выполненных с интервалом 10 лет. В таблице 3.4 показаны изменения площадей трех категорий земель, различающихся степенью дефляции. Видно, что площадь земель с сильной дефляцией увеличилась с 90 до 110 км² (скорость прироста – 2 км²

в год). Прирост этой категории произошел за счет земель как со средней, так и со слабой дефляцией. Земли со слабой дефляцией сократились на 40 км², из которых 30 км² перешло в категорию средней дефляции, а 10 км² – в категорию сильной дефляции.

В таблице 3.5 показаны значения вероятностей перехода трех категорий земель друг в друга по мере развития процесса дефляции в течение 10 лет. Например, вероятность земель со слабой дефляцией перейти за 10 лет в категорию земель с сильной дефляцией составляет 0,08, а переход в категорию земель со средней дефляцией имеет вероятность 0,23.

На основе матрицы вероятностей переходов можно сделать прогноз развития дефляционных процессов на данной территории на 10 лет вперед (таблица 3.6). При сохранении нынешней тенденции площадь земель с сильной дефляцией увеличится с 110 до 129 км², а площадь земель со слабой дефляцией уменьшится с 90 до 62 км².

Таблица 3.4 – Матрица переходов между классами земель, подверженных дефляции, диагностированных по двум съемкам с интервалом 10 лет (км²)

| Диагностируемый класс земель | Класс земель | | | 1 съемка Всего |
|------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-------------------|
| | Сильная дефляция | Средняя дефляция | Слабая дефляция | |
| Сильная дефляция | 90 | 0 | 0 | 90 |
| Средняя дефляция | 10 | 100 | 0 | 110 |
| Слабая дефляция | 10 | 30 | 90 | 130 |
| 2 съемка Всего | 110 | 130 | 90 | |

Таблица 3.5 – Матрица вероятностей переходов между классами земель, подверженных дефляции

| Диагностируемый класс земель | Класс земель | | |
|------------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| | Сильная дефляция | Средняя дефляция | Слабая дефляция |
| Сильная дефляция | 1,0 | 0 | 0 |
| Средняя дефляция | 0,09 | 0,91 | 0 |
| Слабая дефляция | 0,08 | 0,23 | 0,69 |

Таблица 3.6 – Прогноз развития дефляционных процессов (через 10 лет)

| Диагностируемый класс земель | Класс земель | | | Всего |
|------------------------------|------------------|------------------|-----------------|-------|
| | Сильная дефляция | Средняя дефляция | Слабая дефляция | |
| Сильная дефляция | 110 | 0 | 0 | 110 |
| Средняя дефляция | 12 | 118 | 0 | 130 |

| | | | | |
|-----------------|-----|-----|----|----|
| Слабая дефляция | 7 | 21 | 62 | 90 |
| Всего | 129 | 139 | 62 | |

Пространственно-временное развитие дефляционного процесса продемонстрировано на рисунке 3.2.

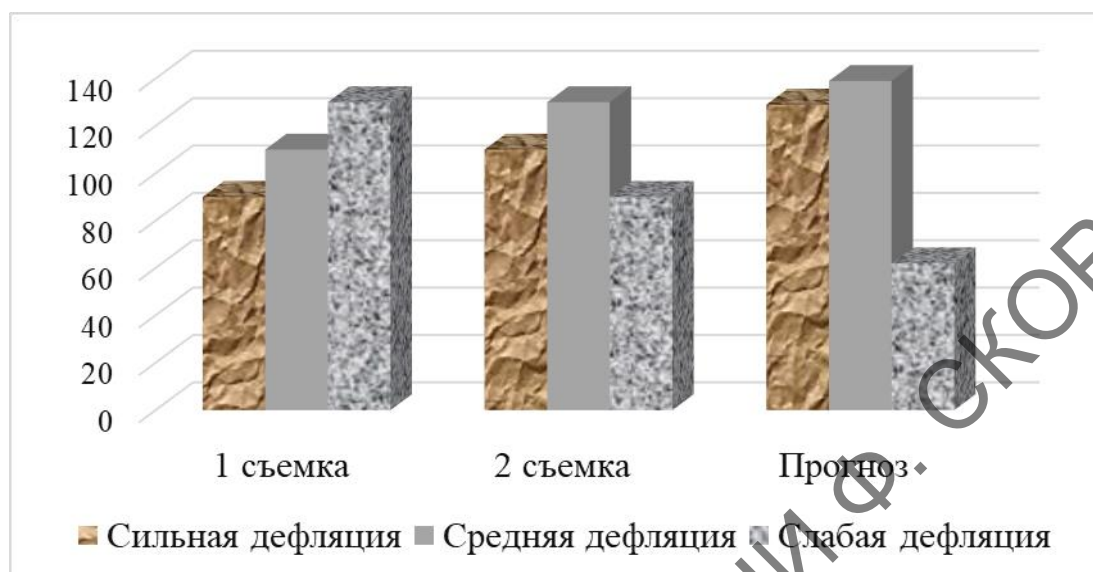


Рисунок 3.2 – Развитие дефляционного процесса во времени по данным повторной космической съемки и прогнозирования методом марковской цепи

Задания для самостоятельной работы

- 1 В чем заключается индикационный метод?
- 2 Приведите примеры индикаторов и индикатов при изучении геологических структур и процессов.
- 3 В чем заключается оценка достоверности индикаторов?
- 4 Что такое ошибка оmissии?
- 5 Что такое ошибка комиссии?
- 6 Назовите преимущества автоматизированной классификации над классическим дешифрированием. Какие методики более пригодны для дешифрирования космических снимков при мониторинге геодинамических процессов?
- 7 В чем особенности индикации геодинамических процессов?
- 8 Что такое марковская цепь и как она применяется при изучении геологических процессов?

4 ЛИНЕАМЕНТЫ И ИХ ИЗУЧЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

4.1 Линеаменты как объект изучения

Линеаменты (от лат. *lineamentum* – ‘линия, черта, контур’) – вытянутые в одном направлении линейные элементы рельефа и геологических структур. В настоящее время в геологической и геоморфологической литературе наиболее часто встречаются разные трактовки этого понятия, но наиболее часто считается, что линеаменты – это линейные (линейно ориентированные) или дугообразные элементы рельефа, генетически связанные с глубинными разломами земной коры (рисунок 4.1).

Ряд авторов предлагает определять линеаменты как картографируемые, простые или составные линейные элементы земной поверхности, чьи части формируют прямолинейные или слегка криволинейные структуры, которые четко отличаются от форм смежных элементов и отражают глубинные явления. Другие авторы под линеаменами понимают достаточно протяженные (региональные) зоны, где наблюдается сгущение линеаментов сравнительно небольшой протяженности (Макаров, Соловьева, 1976).

Предлагается выделять зоны линеаментов трех типов:

- региональные;
- трансрегиональные;
- глобальные.

Установлено, что зоны линеаментов могут различаться по таким критериям, как плотность линеаментов, упорядоченность, главные и второстепенные простирания, расположение отдельных линеаментов, соотношение линеаментов с главными простираниями разрывных и складчатых структур.

Кац Я. Г. предложил следующую классификацию линеаментов:

1 Линеаменты геофизических полей:

- термолинеаменты (определяются по тепловому потоку);
- магнитолинеаменты (определяются по геомагнитному полю);
- гравитолинеаменты (определяются по гравитационному полю);
- сейсмолинеаменты (определяются по эпицентрам землетрясений).

2 Линеаменты геологической структуры:

- геолинеаменты (выделяются по геологической карте);

- тектонолинеаменты (выделяются по тектонической карте);
- металлолинеаменты (выделяются по металлогеническим картам);
- гидролинеаменты (выделяются по гидрогеологической карте).

3 Линеаменты географической среды:

- тополинеаменты (выделяются по рельефу суши);
- батилинеаменты (выделяются по рельефу морского дна);
- фотолинеаменты (выделяются по аэрофотоснимкам);
- космолинеаменты (выделяются по космическим снимкам).

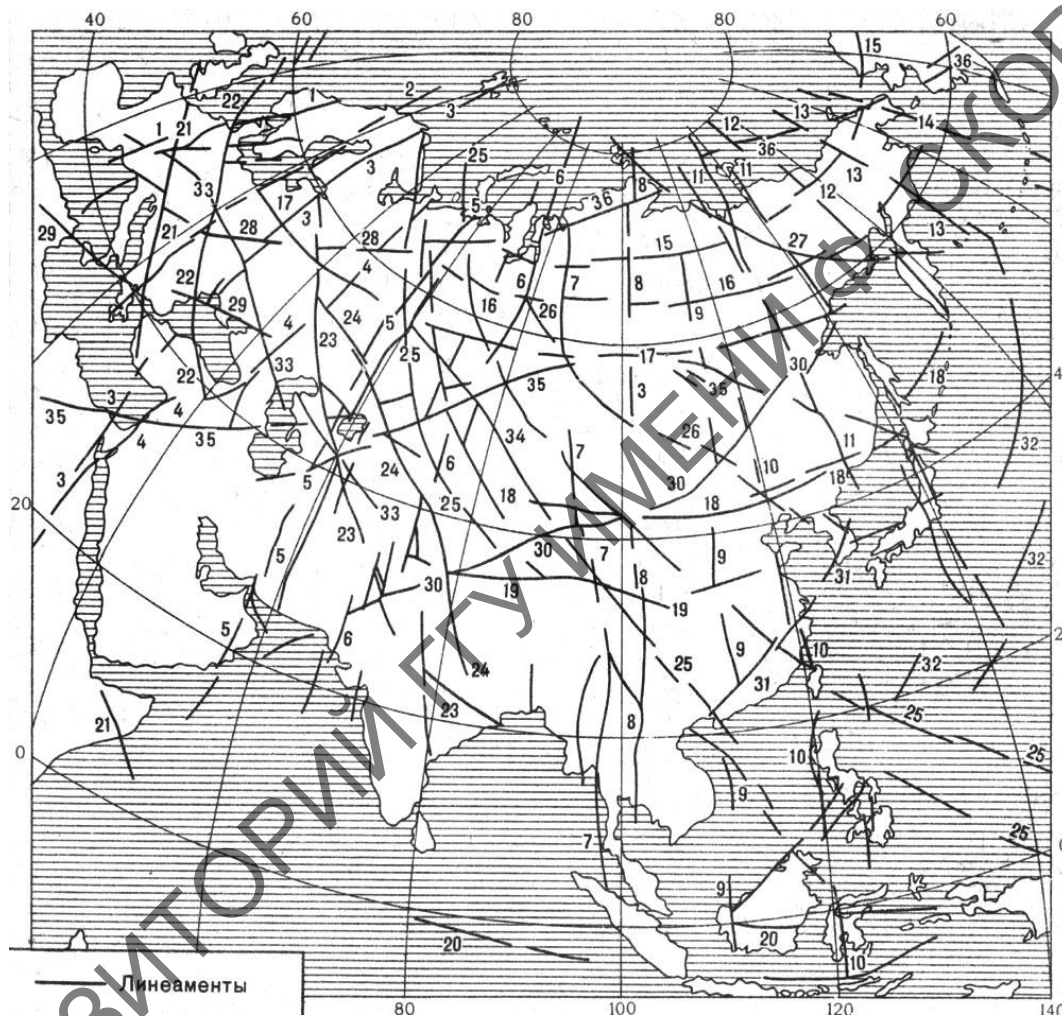


Рисунок 4.1 – Схема линеаментов Евразии

К линеаментам геологической структуры относят линии (узкие зоны) резкого изменения геологических параметров: границы континентальной и океанической коры, зоны сочленения платформ, плит, блоков земной коры, линии выклинивания тектонических зон; границы авлакогенов, грабенов, рифтов, прогибов и т. д.; границы геологических тел, линейное расположение вулканов, интрузивных тел, эпицентров

землетрясений, зоны повышенной трещиноватости, флексуры, валы и прочие линейные геологические структуры.

К линеаментам географической среды относят зоны резкой смены растительности, обводненности, заболоченности, овражной расчлененности; линейное расположение изгибов русел рек, долин, водопадов, озер, болот; линейно ориентированные русла рек, ручьев, тальвегов оврагов и балок; линейные границы лесных массивов, озер, болот; зоны резкой смены рисунка гидросети и т. д.

Линеаменты обладают набором диагностических признаков:

- а) прямых – геологических и геоморфологических,
- б) косвенных – геологических, гидрогеологических, геофизических, физико-географических, геохимических, геоботанических признаков.

Геологические признаки линеаментов представляют собой выходы на земную поверхность разрывных нарушений и их прямых картировочных признаков: собственно разломов и трещин, бластомилонитов, трещиноватых горных пород, даек и жил и т. д.

Геоморфологические признаки линеаментов – это следы дизъюнктивных дислокаций земной коры на ее поверхности, представленные пространственно упорядоченными линейно ориентированными формами рельефа. Преимущественно это отрицательные формы рельефа – эрозионно-структурные депрессии или их элементы, речные долины или их отрезки, каньоны, ложбины и овраги. Крупные разломы земной коры на дневной поверхности проявляют себя в физических полях линейными и линейно-кольцевыми аномалиями, а также минералогическими, литохимическими, гидро- и атмохимическими аномалиями. В условиях слабой обнаженности и выраженности в ландшафте разломы в прилегающих к ним геологических блоках сопровождаются выходами разнофациальных (по литологическому составу, глубине образования) и разновозрастных горных пород.

На материалах космических съемок линеаменты образуют линейные тоновые (или цветные) аномалии различной ширины и выраженности или являются границами между различными ландшафтами. Зоны линеаментов представляют собой сложные образования, обычно с неявными, «размытыми» границами. Встречаются системы (рои) коротких сближенных субпараллельных линеаментов. Еще более сложно построены и значительно более широкие (до первых сотен километров) линеаментные пояса, которые обнаруживаются на снимках с низким пространственным разрешением. На рисунке 4.2 приводится в качестве примера схема суперрегиональных космолинеаментов и узлов их пересечения.

В рельефе линеаменты образуют закономерно ориентированные зоны линейных понижений в рельефе, прямолинейных границ озер и крупных болот, спрямленных участков речных и ледниковых долин, просадок различного генезиса (карстовых, суффозионных, термокарстовых); разгрузки подземных вод и развития влаголюбивой растительности в аридных районах, уступов, обрывов на склонах горных массивов и седловин на водоразделах и т. д.

Главным классификационным признаком линеаментов является их принадлежность к разрывным структурам земной коры. Линеаменты делятся на два класса – с установленной и предполагаемой связью с разрывными структурами.



Рисунок 4.2 – Суперрегиональные космолинеаменты и узлы их пересечения на территории Беларуси (Р. Г. Гарецкий и др., 2013)

Прямыми дешифровочными признаками линеаментов, связанных с разрывными структурами и зонами трещиноватости, являются: нарушения сплошности геологической структуры, смещения в плане слоев горных пород; нарушения условий залегания слоев горных пород, изменения их простирания; наличие зон трещин, смятия, брекчирования; магматические проявления, эпицентры землетрясений, вулканы, выходы гидротерм, газовые потоки.

К косвенным дешифровочным признакам относятся геоморфологические, гидрогеологические и геоботанические индикаторы.

Геоморфологические индикаторы:

– узкие прямолинейные или слабоизогнутые гряды и гребни, образованные телами магматических пород, которые отражаются как темные (основные породы) и светлые (кислые и средние породы) полосы по фототону;

– тектонические прямолинейные уступы или тектонические подножия склонов, вдоль которых проходит граница между коренными и рыхлыми породами, тектонические долины и котлованы, ограниченные уступами;

– прямолинейные ложбины или эрозионные борозды, перпендикулярные склону, резко выраженные седловины на водоразделах;

– спрямленные участки речных русел, долин, временных водотоков, коленообразные изгибы рек, линейно расположенные озерные впадины, карстовые воронки, оползневые склоны, спрямленные линии морских и озерных берегов, болот;

– прямолинейные резкие границы между разными формами рельефа или ландшафтами.

Гидрологические индикаторы:

– линейно расположенные родники и водные источники;

– четкое проявление полос подземного стока, которые в зонах трещиноватости обводнены в большей степени и выделяются на снимках темным фототонном.

Геоботанические индикаторы:

– более густая или влаголюбивая растительность, приуроченная к обводненным зонам трещиноватости (в пустынных ландшафтах);

– более густая растительность на почвах, повышенное плодородие которых связано с выходами минерализованных подземных вод (в лесных ландшафтах).

4.2 Линеаментный анализ

Основы линеаментного анализа были заложены в работах известных геологов – А. П. Карпинского, М. Бертрана, У. Хоббса и других. *Линеаментный анализ* – эффективный комплекс геоморфологических, геологических, космических и других методов геологического картирования и мониторинга опасных геологических процессов. Суть линеаментного анализа заключается в выявлении линейных элементов на земной поверхности, связанных с зонами разрывных нарушений

и трещиноватости, по которым происходит миграция магматических флюидов, газов, гидротерм, а также движения блоков земной коры, т. е. современные геодинамические процессы.

Таким образом, цель линеаментного анализа – выявление зон разрывных нарушений и трещиноватости, к которым приурочено развитие эндогенных (землетрясения, вулканизм, деформации земной поверхности) и экзогенных (оползни, карст, суффозия, эрозия и т. д.) геологических процессов. Линеаментный анализ заключается в визуализации линеаментов, их корреляции с комплексом геологических, тектонических, геохимических, геофизических данных и геодинамической интерпретации.

Основной проблемой линеаментного анализа является неоднозначность физической природы визуально или автоматически выявленных линеаментов. Наиболее проблематична интерпретация в условиях платформенных областей. Однако многие исследователи считают, что между линеаментами и тектоническими разломами разной иерархии существует взаимосвязь. Точки пересечения линеаментов являются местами повышенной трещиноватости земной коры и местами развития эндогенной и экзогенной геодинамики. Так, существуют попытки связать аварийность газо- и нефтепроводов с зонами линеаментов, использовать линеаментный анализ для прогноза землетрясений и т. д.

Линеаментный анализ основан на обработке информации, которая по способам получения и формату данных ранжируется минимум на три класса: материалы дистанционных аэрокосмических исследований, топографические карты, карты геологического содержания и прочие геологические, геофизические и иные данные. Ранжированность информационной базы, широкий набор диагностических признаков и разновидностей линеаментов обуславливает разнообразие методологических подходов к их изучению.

Главным критерием эффективности методик линеаментного анализа является достоверность полученных результатов – подтверждение их геологическими наблюдениями прямой связи линеаментов с разрывными нарушениями в земной коре.

Так, физическая природа линеаментов определяется при сравнительном анализе топографической карты и схемы штрихов, полученной при автоматизированном линеаментном анализе космических изображений. Большинство штрихов, как правило, совпадает с линейными элементами речных долин, овражно-балочных систем. В свою очередь, эрозионные формы рельефа приурочены к зонам разрывных нарушений и трещиноватости.

Для линеаментного анализа космоснимков используются различные алгоритмы выделения границ линеаментов:

- основанные на вычислении производных яркости;
- основанные на фрактальной геометрии;
- основанные на математической морфологии;
- основанные на аппроксимации перепадов яркости;
- основанные на статистике.

Наиболее популярными видами обработки линеаментного поля являются:

- а) выделение линеаментов доминирующих простираний, в том числе с визуализацией в виде роз-диаграмм и гистограмм;
- б) выявление участков повышенной плотности линеаментов определенного направления и узлов пересечений линеаментов разного порядка;
- в) оконтуривание участков с повышенной неоднородностью линеаментов по их направлению, длине и количеству.

Программное обеспечение линеаментного анализа представлено двумя разновидностями:

- модули линеаментного анализа в универсальных ГИС – ArcGIS, QGIS, SAGA, MapInfo;
- специально разработанные программы линеаментного анализа – WinLessa, LINDENS, Alina, LINEAMENT, PLANETAMONITORING, Гео-ПК.

Широко используется для линеаментного анализа программа WinLESSA, которая представлена инструментом, позволяющим получить единообразное численное описание рисунка (текстуры) изображения, оценку распределения и ориентации мелких линейных элементов рисунка.

Результаты расчетов используются для прямого дешифрирования, анализа в ГИС, а также для дальнейшей обработки с помощью стандартных программ обработки изображений. Возможен и анализ результатов с помощью WinLESSA, предварительно полученных в программе (например, поиск линеаментов в поле плотности).

Входными данными могут быть полутоновые, бинарные изображения, цифровые модели рельефа. Анализ построен на выявлении линейных элементов – штрихов. Для полутоновых изображений штрихами будут границы однородных областей, для цифровых моделей рельефа – оси долин и хребтов.

Программа позволяет выделять линейные элементы (штрихи) и описать их свойства: розы-диаграммы, плотности штрихов, протяженность линеаментов, прослеживаемых по одинаково ориентируемым штрихам.

Штрихи выделяются по 8 азимутам простирания (от 0 до 180°) с осреднением 22,5°. Размер штриха составляет 10 пикселей снимка.

Роза-диаграмма штрихов строится в окне диаметром 50 пикселей. Одним из главных результатов анализа штрихов является формирование на их основе прямых протяженных линеаментов. В программе предусмотрена возможность просматривать линеаменты, отбирать их по направлению и степени выраженности, составлять из них схему.

Сведения об алгоритме, методике, тестировании, примерах использования, о версиях программы и другую информацию о LESSA представлены на сайте <http://www.lineament.ru>.

В программном пакете LINEAMENT в качестве исходных данных используются растровые изображения, цифровые модели рельефа, геофизические и геохимические поля. Основными достоинствами этой программы являются: совместимость с ГИС ArcView, возможность настройки картографической проекции, возможность экспорта в разные форматы растровых данных. LINEAMENT позволяет выделять линеаменты по направлениям, обозначать кольцевые структуры, строить розы-диаграммы линеаментов, определять плотность линеаментов.

В программном пакете Гео-ПК используются растровые изображения и цифровые модели рельефа. Достоинства: возможность предварительной обработки данных, геометрические преобразования, наличие инструментов для классификации изображений, инструментов мультифрактального анализа и сегментации изображений, плагиновая архитектура. Программа может выделять линеаменты, кольцевые структуры, поля штрихов; выполнять статистический анализ линеаментов, кольцевых структур и полей штрихов.

Задания для самостоятельной работы

- 1 Что понимается под термином «линеамент»?
- 2 Какова природа линеаментов, выделяемых на основе космической съемки?
- 3 Назовите диагностические признаки выделения линеаментов.
- 4 Что такое линеаментный анализ?
- 5 Назовите примеры использования линеаментного анализа на основе космической съемки.
- 6 Какое программное обеспечение используется для автоматизированного линеаментного анализа?

5 СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ЭНДОГЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ

5.1 Спутниковый мониторинг сейсмических процессов

Сейсмические процессы – это колебания упругих волн в земной коре, обуславливающие ее сотрясение и деформации. Наиболее яркое проявление сейсмичности – землетрясение. Сейсмические процессы тесно связаны с глобальной тектоникой литосферных плит и приурочены к границам плит и блоков земной коры.

Землетрясение – интенсивные колебания земной поверхности, вызванные сильными подземными толчками, как правило, возникающими в результате высвобождения энергии при разрыве пластов горных пород под действием тектонических сил. Подавляющее большинство землетрясений обуславливаются тектоническими движениями и концентрируются вдоль границ литосферных плит (рисунок 5.1).

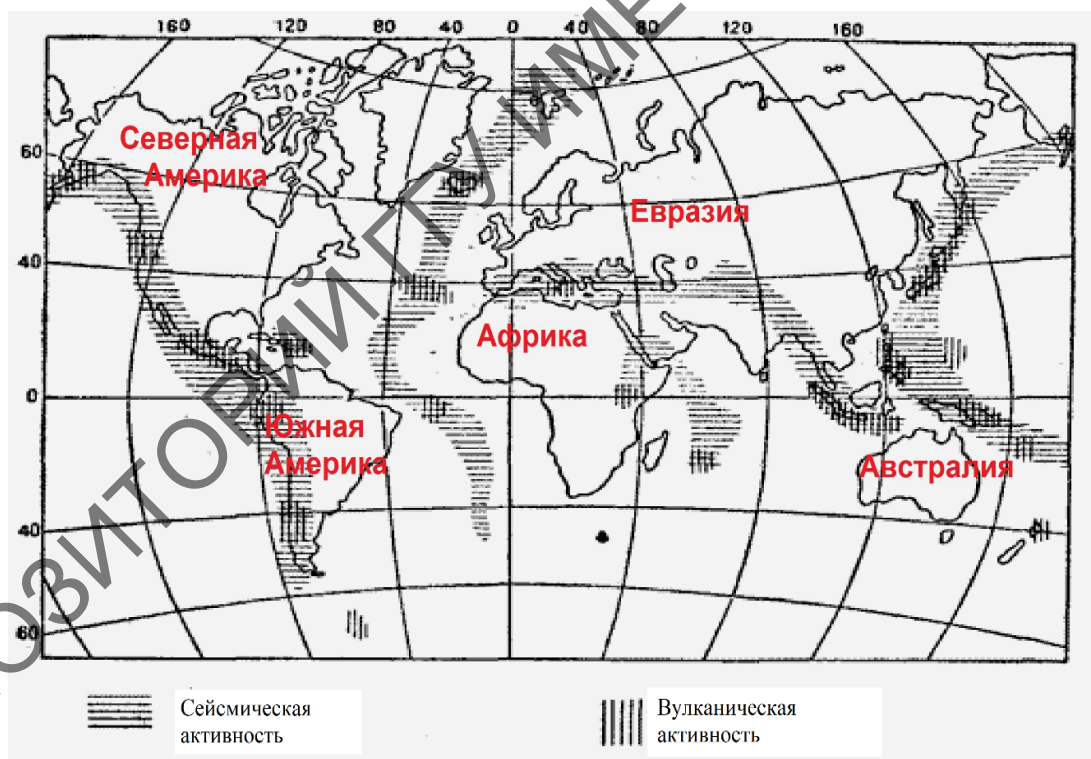


Рисунок 5.1 – Современная сейсмическая и вулканическая активности

Соответственно наибольшая сейсмическая активность наблюдается в Альпийско-Индо-Гималайском и Тихоокеанском поясах –

в зонах субдукции и коллизии литосферных плит. Сейсмически активными являются также рифтовые зоны.

Локальное распространение имеют землетрясения, вызванные извержением вулканов; землетрясения, вызванные падением больших массивов горных пород со склонов или провалами (денудационный тип землетрясений); техногенные землетрясения, обусловленные взрывами, закачкой стоков в глубинные горизонты и т. д. По глубине очага различают: нормальные (10–70 км), среднефокусные (70–300 км), глубокофокусные (более 300 км) землетрясения.

Спутниковые методы для исследования землетрясений стали применяться почти сразу с появлением космических данных. В первую очередь они были связаны с выделением по космическим снимкам активных современных разломов и тектонических структур. У этого метода есть существенный недостаток – невозможно наблюдать короткоживущие динамические процессы, связанные с подготовкой и реализацией землетрясения.

С помощью космических методов в сочетании с геолого-геофизическими материалами решаются различные задачи в области сейсмотектоники, сейсмического районирования и прогнозирования:

1 Диагностика морфологии и кинематики современных тектонических нарушений и деформаций.

2 Определение размеров, морфологии и строения очагов землетрясений.

3 Выявление взаимосвязи между эпицентрами землетрясений и линеаментами, выделенными по космическим снимкам.

4 Определение динамических условий сейсмоактивных зон и особенностей механизмов очагов землетрясений.

5 Выявление сейсмоконтролирующих тектонических структур и установление их связи с глубинным строением земной коры.

6 Разработка геологической основы долгосрочного сейсмического прогноза за счет выявления тектонически активных зон.

7 Выявление предвестников землетрясений.

Объектом исследования спутниковых методов являются процессы взаимодействия литосферы и атмосферы при землетрясениях. На земной поверхности происходят различные процессы, связанные с землетрясениями, которые могут фиксироваться космической съемкой, а именно: различные оптические явления; увеличивается температура воды, почвы и воздуха; растет концентрация газов в приземном слое атмосферы, выбросы газа в атмосферу; резкие изменения погоды, перепады атмосферного давления, грозы; увеличивается концентрация

аэрозоля, учащаются туманы, дымки; необычные облака; отмечаются электромагнитные явления в атмосфере и ионосфере; деформация земной поверхности и изменение рельефа.

При этом современными спутниковыми методами можно регистрировать многие из вышеперечисленных показателей: температуру земной поверхности, концентрацию озона и аэрозоля в атмосфере, вертикальный профиль атмосферы по температуре и влажности, электромагнитные явления в ионосфере, облачный покров, а также деформации земной поверхности.

Так, с развитием спутниковых технологий в 1980–1990 гг. для изучения землетрясений стала использоваться космическая тепловая съемка. Были изучены тепловые аномалии в сейсмоактивных регионах (Средняя Азия, Камчатка, Китай, Япония, Средиземноморье) и накоплен статистический материал по более чем 100 землетрясениям. В результате была доказана связь тепловых аномалий на земной поверхности и сейсмической активности. Начались исследования по прогнозу землетрясений с использованием космической тепловой съемки (Тронин, 2011).

Установлено, что над сейсмически активными крупными разломами земной коры формируются тепловые аномалии, которые сопровождают землетрясения (рисунок 5.2).

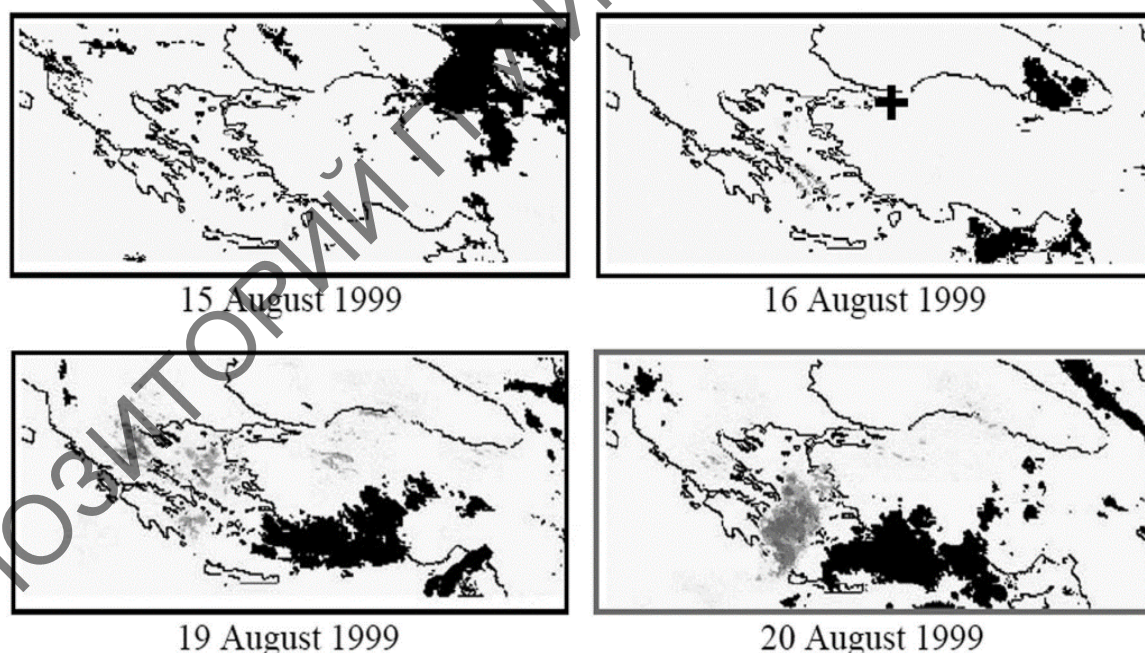


Рисунок 5.2 – Тепловая аномалия (показана серым цветом), связанная с землетрясением (г. Измит, Турция, 17.08.1999), выявленная по данным тепловой космической съемки (цит. по А. А. Тронину, 2011)

В 1990-е гг. для изучения землетрясений начала применяться спутниковая радиолокационная интерферометрия, были построены интерферограммы изображений земной поверхности до и после сейсмического толчка, на которых четко наблюдались деформации земной поверхности, вызванные землетрясением.

Радиолокационная интерферометрия – это метод обработки данных радиолокации, основанный на выделении разности фаз сигналов, отраженных разными участками земной поверхности. Он позволяет рассчитать путь, пройденный радиосигналом до земной поверхности, и получить данные об абсолютных высотах рельефа и смещениях поверхности. Интерферометрия предполагает совместную обработку не менее двух результатов съемки одного и того же участка земной поверхности, зафиксированных антенной при повторных наблюдениях (двухпроходная интерферометрия) или двумя антеннами, одновременно принимающими сигнал от одной точки под разными углами (однопроходная интерферометрия). Однопроходная интерферометрия имеет преимущество по сравнению с двухпроходной, так как сдвиг по времени может сказаться на изменениях влажности и состоянии атмосферы, что повлияет на разность фаз отраженного сигнала, а следовательно, на точность съемки. Результатом обработки является интерферограмма, представляющая собой совокупность цветных полос – изолиний расстояния между земной поверхностью и радаром (Балдина, Чеснокова, 2011).

Деформации земной поверхности регистрировались с помощью ряда спутниковых систем ERS, ENVISAT (спутники Европейского космического агентства, предназначенные для высокоточных измерений земной поверхности и атмосферы), в настоящее время – COSMO-SkyMed (итальянские 4 спутника, оснащенные радиолокационными датчиками с синтезированной апертурой, имеющие глобальный охват), Pleiades (французские спутники, ведущие мультиспектральную съемку сверхвысокого разрешения и высокоточную стереосъемку).

Спутниковая радиолокационная интерферометрия, основанная на измерении амплитуды и фазы радиолокационного сигнала (съемка ведется с двух и более параллельных орбит), позволяет фиксировать деформации с очень высокой точностью (несколько миллиметров на дальности в сотни километров). На рисунке 5.3 показаны косейсмические деформации гаитянского землетрясения 2010 г., восстановленные на основе такой съемки.

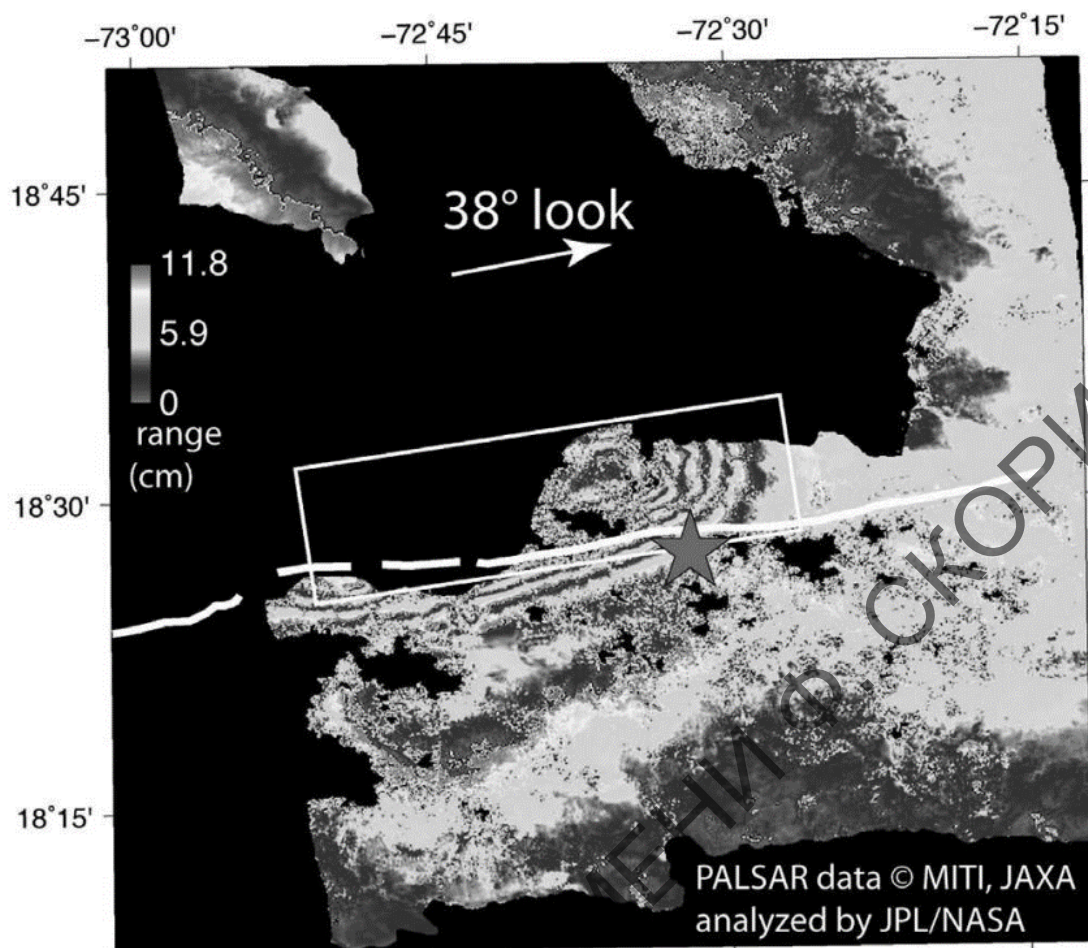


Рисунок 5.3 – Деформации при землетрясении на Гаити (12.01.2010), зафиксированные спутниковой радиолокационной интерферометрией:
 белая линия – сейсмогенный разлом;
 звезда – эпицентр землетрясения (цит. по А. А. Тронину, 2011)

Для измерения перемещения земной коры в большом масштабе (до сотен и тысяч километров) лучше всего подходят спутниковые геодезические приемники, работающие по сигналам систем GPS и ГЛОНАСС. Благодаря появлению относительного метода измерений, развитию электроники и математических методов обработки результатов наблюдений точность определения координат станций с использованием спутниковой навигации повысилась до единиц миллиметров.

Основной сферой применения глобальных навигационных спутниковых систем являются исследования движений земной коры. Они также используются для решения задач сейсмологии, связанных с сильными землетрясениями. Так, с помощью зарегистрированных глобальными навигационными спутниковыми системами косейсмических (постоянных) смещений земной поверхности проводится моделирование очага сильных землетрясений. Такие смещения обычно рассчитывают

по среднесуточным координатам GPS-антенны или в режиме реального времени. Если GPS-антенна жестко закреплена относительно земной поверхности, а обработка измерений осуществляется кинематическим способом, то получаемая запись изменений положения антенны будет содержать все ее перемещения, в том числе и колебания вследствие прохождения сейсмических волн от землетрясений. Оценки косейсмических смещений могут быть получены очень быстро, даже для сильнейших землетрясений на это обычно требуется не более 1–2 мин. Системы раннего предупреждения землетрясений являются основной и наиболее перспективной сферой применения GPS-координат, получаемых в реальном времени.

Мониторинг сейсмических процессов с помощью глобальных навигационных спутниковых систем ведется во многих странах, в том числе в Японии, США и России. Например, в Японии имеется национальная сеть, включающая более 1 200 GPS-станций, расположенных на расстоянии 20–50 км, и проводящая измерения каждые 30 сек. На рисунке 5.4 в качестве примера показаны зафиксированные с помощью GPS смещения, связанные с движением плиты, и прогнозируемый очаг землетрясения.

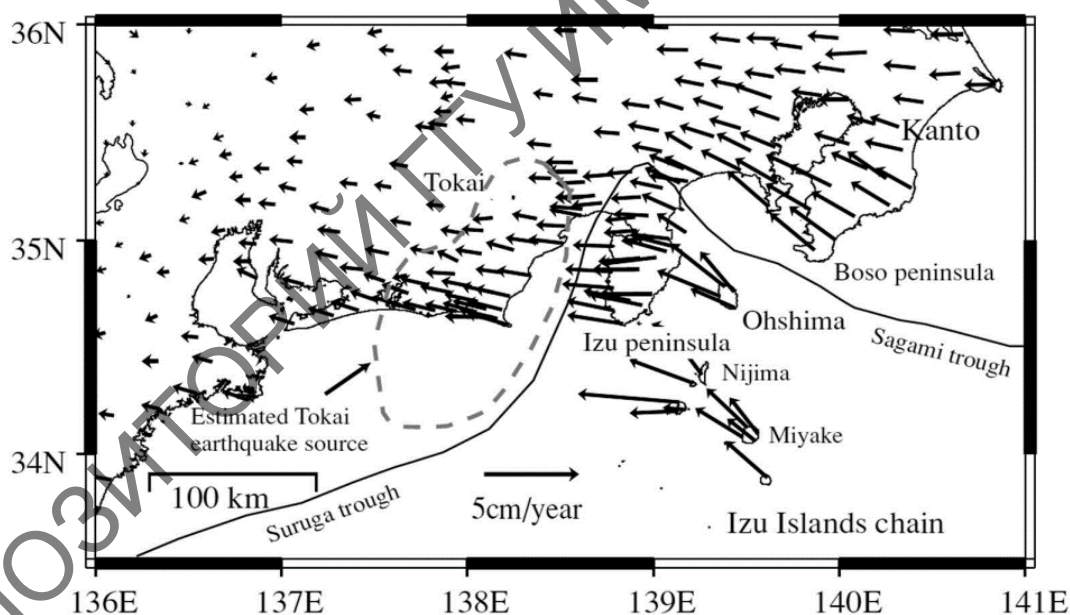


Рисунок 5.4 – Горизонтальные деформации по данным GPS измерений сети GEONET при движении Филиппинской плиты и прогнозируемый очаг землетрясения (штриховая линия)
(цит. по А. А. Тронину, 2011)

Электромагнитные наблюдения осуществляют несколько спутников – DEMETER (специализированный французский спутник для

наблюдения электромагнитной активности в высокосейсмичных регионах), ESPERIA (специализированный итальянский спутник для наблюдения за электромагнитными полями ионосферы и атмосферы при землетрясениях). Так, спутник DEMETER зарегистрировал ионосферные электромагнитные аномалии, предваряющие землетрясение на Гаити (12.01.2010 г.).

Одним из перспективных космических методов является метод оперативного анализа геодинамики сейсмоопасных территорий, связанный с регистрацией изменчивости систем космолинеаментов (смотри главу 4). Возможность использования такого метода основана на предположении, что системы линеаментов тесно связаны с системами сейсмогенных нарушений и реагируют на изменение плана деформаций, которое обусловлено изменением поля напряжений земной коры (Бондур, Зверев, 2005).

Для организации мониторинга геодинамики были созданы базы данных космических изображений, полученных со спутника TERRA с помощью аппаратуры MODIS (спектральный диапазон 620–670 нм, пространственное разрешение 250 м). Для каждого исследуемого участка сейсмоопасной территории выбирались фрагменты определенных размеров. Выбор размеров фрагментов изображений обусловлен особенностями дальнейшей обработки. Как правило, выбирались фрагменты размерами от 400×400 до 2000×2000 пикселей (от 100×100 км² до 500×500 км² в масштабе земной поверхности). Оперативный мониторинг геодинамики сейсмоопасной территории Южной Калифорнии осуществлялся в период с июля по ноябрь 2004 г. Совместный анализ времени и места происхождения землетрясений и результатов линеаментного анализа космических изображений показал: геодинамические особенности территории Южной Калифорнии проявлялись в неустойчивости плотности, направленности и относительного количества линеаментов, особенно секущих, направленных с северо-востока на юго-запад, приблизительно перпендикулярно направлению линеаментов, которые соответствуют разлому Сан-Андреас; за 3–5 дней до землетрясений с $M \geq 4$ плотность секущих линеаментов значительно увеличилась; в периоды времени больше 3–5 дней до землетрясений и через 3–5 дней после них количество секущих линеаментов существенно снижалось и соответствовало спокойному (фоновому) состоянию для этого региона (рисунок 5.5). Выявленные особенности поведения линеаментов в период подготовки и прохождения землетрясений могут быть использованы для средне-краткосрочного и краткосрочного прогноза землетрясений. Для выявления особенностей влияния более слабых

землетрясений на поведение линейментов требуется проведение дополнительных более тщательных исследований (Бондур и др., 2005).

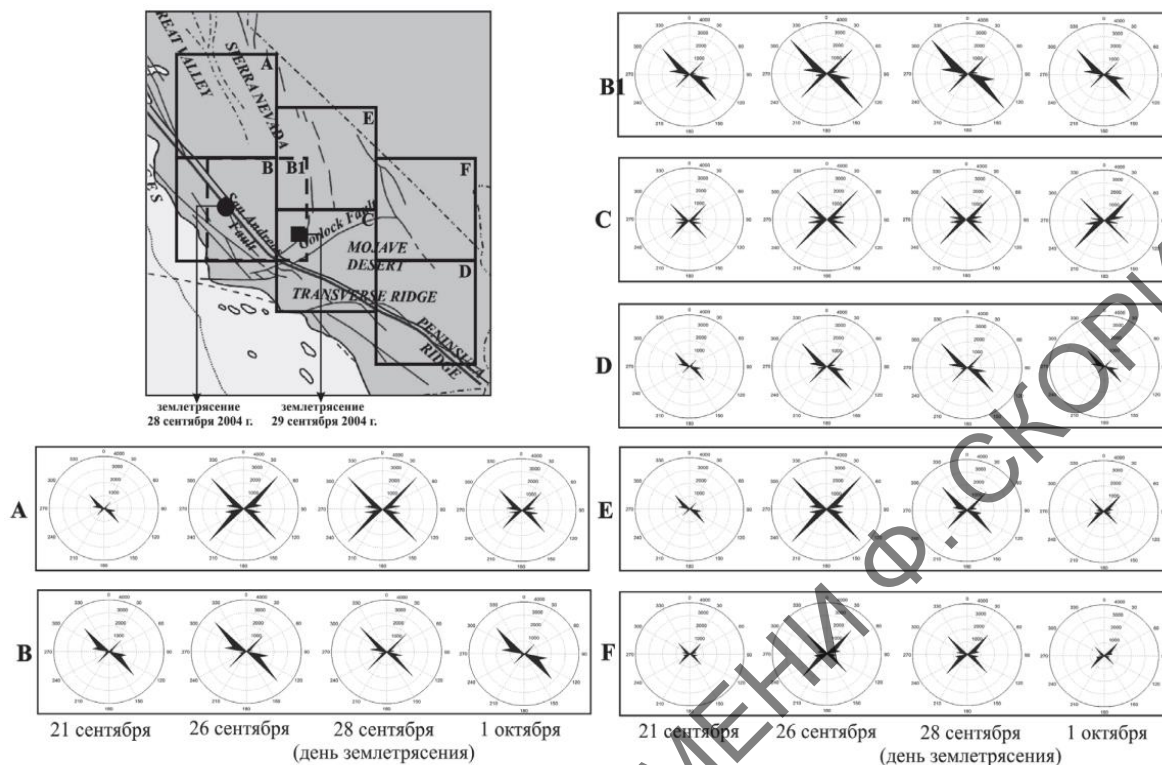


Рисунок 5.5 – Линеаментный анализ сейсмической активности разлома Сан-Андреас (цит. по Бондур и др., 2005)

Сейсмический мониторинг, осуществляемый на основе такого анализа, может позволить прогнозировать не только время, но и место землетрясения. Для этого необходимо исследовать всю сейсмоопасную зону по методу скользящего окна, т. е. дешифровать взаимоперекрывающиеся фрагменты космических изображений на всем протяжении сейсмических разломов (Бондур и др., 2005).

5.2 Спутниковый мониторинг вулканических процессов

Вулканические процессы связаны с движением магматических расплавов к земной поверхности. Когда жидкий магматический расплав достигает земной поверхности, происходит его извержение, характер которого зависит от состава магмы, температуры, давления, флюидов. Продукты извержения бывают жидкими, твердыми и газообразными.

В ходе извержения образуется вулканическая постройка, которая может быть простой (представлена относительно небольшим вулканическим конусом) или сложной (состоит из конусов, образованных потоками лавы и толщами пепла, нередко имеются побочные кратеры).

Выделяют несколько типов извержений:

а) гавайский (относительно слабые выбросы очень жидкой базальтовой лавы, образующей обширные покровы лавовых потоков, формирующих крупные, но плоские щитовые вулканы);

б) трещинный, или извержения покровных базальтов (отличается очень большими объемами излившихся лав и слабой взрывной деятельностью);

в) стромболианский (характеризуется ритмичными выбросами вулканических бомб и туфов, которые формируют шлаковые конусы);

г) вулканский (характеризуется умеренными или мощными взрывами без излияний лавовых потоков);

д) пелейский (характеризуется мощными взрывами и образованием раскаленных газовой-пепловых лавин);

е) плинианский (характеризуется взрывами, длительными пепло- и пемзоподами, образованием кальдер).

В настоящее время известно около 1 000 активных вулканов, из которых примерно 75 % располагаются по окраинам Тихого океана (Короновский, 2006).

В отличие от всех других эндогенных и экзогенных геодинамических процессов вулканы способны оказывать глобальный эффект, воздействуя на биосферу и вызывая экологические катастрофы (Трифонов, Караханян, 2004).

Использование космических методов позволяет на качественно новом уровне проводить изучение вулканических процессов и явлений. Единственным возможным способом снижения геоэкологического риска и минимизации последствий извержений на человека и биосферу является прогноз и своевременное оперативное оповещение о подготовке извержения. Для этого служит система космического мониторинга активных вулканов, которая решает такие задачи, как обнаружение и выявление предвестников катастрофических извержений, своевременное оповещение о предстоящих извержениях, контроль динамики извержений, оценка масштаба их последствий (Хренов, 2011).

По А. Н. Платэ (2012) дистанционный мониторинг активных вулканов включает: выявление критериев предвестников извержений, контроль за глобальными изменениями климата, контроль за распространением пепловых и аэрозольных облаков, вулканическое райони-

рование, исследования на тестируемых полигонах и компьютерное моделирование вулканических процессов, создание геоинформационных систем вулканических процессов для их прогноза.

На протяжении многих лет для оперативного мониторинга вулканов во всём мире используются данные полярно-орбитальных спутников серии NOAA (AVHRR). Научным сообществом мира созданы и совершенствуются методы обработки спутниковых данных для выделения и анализа в районах действующих вулканов, термальных аномалий, пепловых и аэрозольных облаков, проявляющихся при эксплозивных извержениях вулканов и представляющих серьёзную опасность для авиаперевозок (Гирина и др., 2017).

Можно привести в качестве примера систему ежедневного мониторинга вулканов, разработанную Камчатской группой реагирования на вулканические извержения (KVERT — Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team, <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>). Оперативный спутниковый мониторинг вулканов Камчатки включает в себя: обнаружение пепловых облаков и шлейфов, определение их параметров (высота, протяженность от вулкана и азимут распространения, площадь); детектирование термальных аномалий в районах вулканов, определение их параметров (размер, температура аномалии и фона); выпуск оперативных сообщений Volcano Observatory Notice for Aviation (VONA) об обнаружении пепловых облаков или шлейфов в районах вулканов и о прогнозах развития эксплозивных извержений, опасных для авиаперевозок и населения; размещение данных спутникового мониторинга в базе данных KVERT.

Основой для мониторинга вулканической активности является спутниковая информация, оперативно поступающая от различных метеорологических спутниковых систем, таких как NOAA (прибор AVHRR), Terra и Aqua (MODIS), Suomi NPP (National Polar-orbiting Partnership), VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), Метеор-М (МСУ-МР). Геостационарный спутник Himawari-8 позволяет проводить наблюдения за территорией Камчатки и Курил с временным разрешением 10 мин.

Аляскинская вулканологическая обсерватория использует геостационарные и полярные орбитальные спутники (GEOS, AVHRR, SAR) для мониторинга вулканов Аляски и Камчатки (Платэ, 2012).

Наряду со спутниковыми данными среднего и низкого разрешения для анализа и долгосрочного прогноза активности вулканов широко используется спутниковая информация высокого разрешения. С помощью специальных инструментов можно проводить совместный анализ

информации, поступающей из разных спутниковых систем, например, синтез различных разновременных данных для выявления изменений, происходящих в районах вулканов. Так, обеспечена возможность анализа данных гиперспектрометра Hyperion (EO-1) по вулканогенным объектам (Гирина др., 2017).

Ретроспективный анализ активности вулканов Камчатки и Северных Курил с помощью спутниковых данных среднего и высокого разрешения позволил провести детальные исследования вулканогенных продуктов (тефра, лавовые и пирокластические потоки) после конкретного извержения вулкана и определить их параметры (структуры, протяжённости, площади и объёма отложений) для оценки геологического и экологического эффектов; выполнить анализ изменения содержания в атмосфере аэрозолей (дым, пепел, пыль) различных газов (озона, диоксида азота, диоксида серы); провести анализ динамики активности вулканов с течением времени для прогноза риска (Гирина и др., 2017).

Мониторинг вулканов ведется с помощью тепловой съемки (рисунок 5.6), радарной интерферометрии, мультиспектральной съемки оптического диапазона. Радиолокаторы с синтезированной апертурой вместе с тепловой съемкой используются для идентификации лавовых потоков, установления их характеристик.

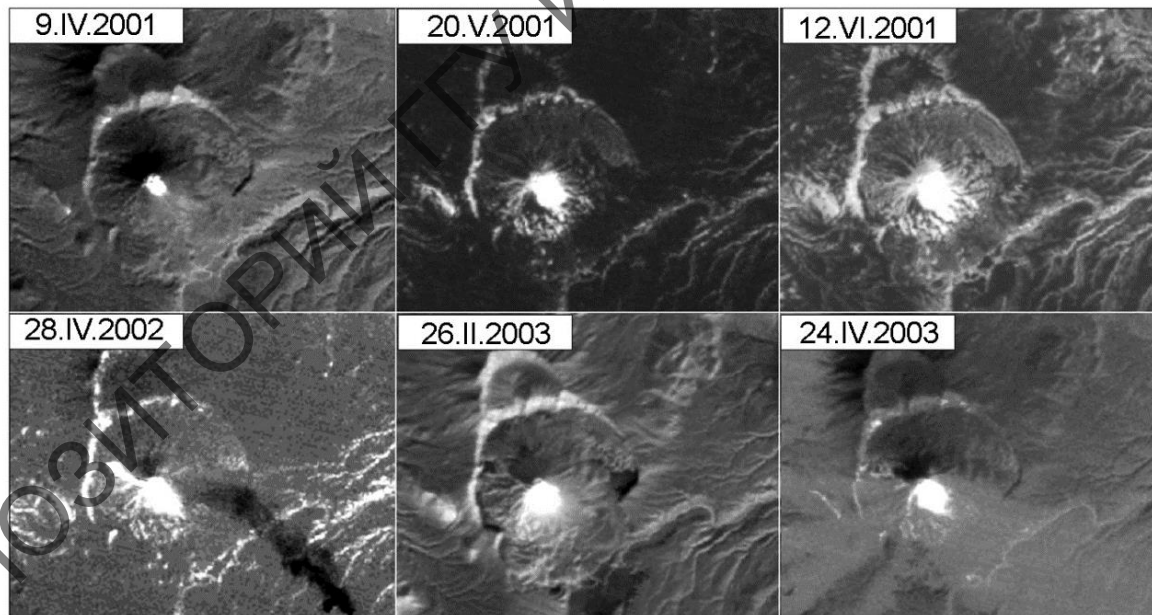


Рисунок 5.6 – Извержение вулкана Карымский на серии инфракрасных снимков Landsat-7 (по Грищенко, Балдиной, 2017)

Радиолокационные съемки позволяют изучить процесс внедрения магмы в постройку вулкана, динамику пирокластических и лавовых по-

токов, динамику взрывов, движения раскаленных лавин, селей, процесс обрушения постройки вулкана (Платэ, 2012).

5.3 Спутниковый мониторинг современных движений земной коры

Современные движения земной коры (земной поверхности) подразделяются на три основные группы:

- быстрые (импульсные) – сейсмические толчки различной силы и длительности;
- короткопериодные (от нескольких часов до нескольких лет) – обусловлены приливными деформациями, изменениями температурных, барических, гидротермических условий и т. д.;
- вековые (от первых десятилетий до нескольких тысяч лет).

По направлению различают *вертикальные* (восходящие и нисходящие) и *горизонтальные движения*. Сочетания и наложение друг на друга разнопериодных колебательных движений формирует систему циклов, которая в более длительном временном масштабе отражает направленности или тренд тектонических движений на данном участке земной коры. Значения скоростей вековых движений (медленные опускания и поднятия) в пределах платформ составляют в среднем 2–4 мм/год. Направленность вековых движений выявляется в интервале 20–25 лет.

Объектом спутникового мониторинга являются *активные разломы*. Под активным разломом понимается линейно вытянутое пликативно-дизъюнктивное малоамплитудное нарушение, проявляющееся в кайнозое вплоть до современности, выраженное смещениями, флексурными и другими изгибами слоев, повышенной трещиноватостью и проницаемостью земной коры, аномалиями геофизических полей, влияющее на рельеф, речную сеть, сейсмичность. Разломы подразделяются на суперрегиональные, региональные, субрегиональные и локальные. Они могут различаться по морфологии, кинематике, глубине проникновения и т. д.

Принято различать унаследованные и новообразованные разломы. *Унаследованные активные разломы* совпадают или близки по своему пространственному положению и ориентации ранее существовавшим платформенных или доплатформенным разломам. *Новообразованные активные разломы* имеют меньшую амплитуду или представляют со-

бой протяженные системы субпараллельных мегатрещин, которые пространственно не связаны с более древними разломами. Тип и ранг активных разломов не всегда соответствует типу и рангу наследуемых древних разломов. Поэтому ранжирование активных разломов ведется независимо от системы древних разломов (Гарецкий и др., 2013).

Например, на территории Беларуси выделяют 4 разновозрастные системы разломов и разломных зон:

- 1 – доплатформенные погребенные разломы фундамента;
- 2 – допозднеолигоценовые разломы платформенного чехла;
- 3 – новейшие (позднеолигоцен-четвертичные) активные разломы;
- 4 – современные активные разломы (Гарецкий и др., 2013).

Основным критерием выявления активных разломов является изучение современных движений земной поверхности. Так, установлено, что на платформах имеют место локальные аномалии современных движений земной поверхности, приуроченные к зонам разломов различного типа и порядка. Эти движения характеризуются высокой амплитудой (50–70 мм/год), коротким периодом (0,1–1 год), пространственной локализацией (0,1–1 км), пульсационным и знакопеременным режимом. Такие движения имеют высокие скорости относительных деформаций. Аномалии вертикальных смещений земной поверхности не могут объясняться сдвиговыми перемещениями в вертикальной плоскости. В пределах одной разломной зоны пространственное распределение деформаций носит неоднородный и дискретный характер. Среднегодовые деформации в таких зонах активных разломов достигают величин порядка $5 \cdot 10^{-5}$ – 10^{-4} в год.

Например, активным является Речицкий региональный разлом, в некоторых частях которого выявлены вышеуказанные аномалии вертикальных смещений земной поверхности (рисунок 5.7).

Предлагается считать опасным активный разлом, в котором происходят современные короткопериодные (первые месяцы, годы) пульсационные или знакопеременные движения со скоростями относительных деформаций более $5 \cdot 10^{-5}$ в год. При это следует также учитывать все деформационные процессы, связанные с сейсмичностью (Кузьмин, 2019).

Важную роль в изучении активных разломов играют космические методы. Для выявления разломов используются спутниковые съемки в различных диапазонах и разного разрешения. Широко применяется метод линеаментного анализа (смотри раздел 4). Визуальное дешифрирование разломных зон происходит как по прямым, так и по косвенным признакам (таблица 5.1). Большая часть раз-

ломных нарушений проявляется в рельефе, гидрографической сети, растительном покрове. Подвижки по активным разломам генерируют целый комплекс экзогенных геологических процессов – осыпей, обвалов, суффозии, деформаций, которые отражаются в рельефе, и, соответственно, на космических снимках.

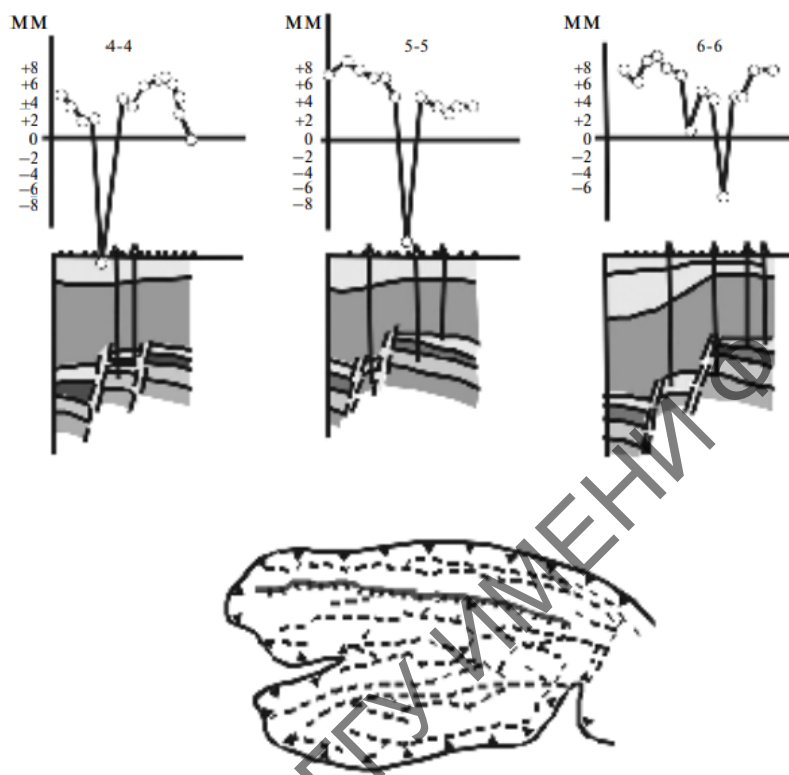


Рисунок 5.7 – Вертикальные смещения земной поверхности по нивелирным профилям через Речицкий региональный разлом (Кузьмин, 2019)

Возраст активизации разломов может индцироваться по признакам, указанным в таблице 5.1.

Возможность выявлять определенные элементы глубинных (погребенных) тектонических структур, основываясь на анализе спектрально-отражательных свойств земной поверхности, значительно расширяет арсенал методов изучения земной коры и повышает надежность интерпретаций геофизических и геохимических данных.

Для выявления разломных зон могут использоваться геоботанические индикаторы. Например, в условиях Беларуси наиболее достоверна индикация активных разломов по геоботаническим признакам в пределах низменных ландшафтов приледниковых бассейнов и обширных аллювиально-аккумулятивных равнин. Геоиндикационный

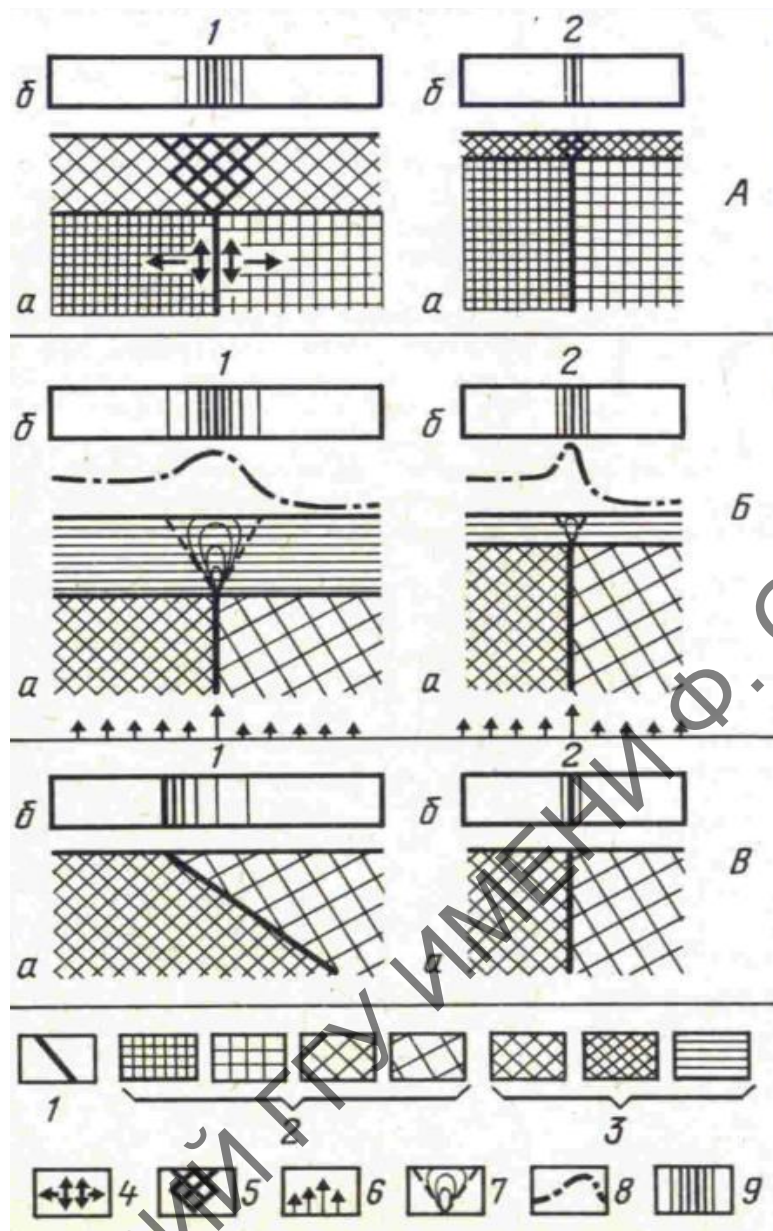
анализ растительности Припятского Полесья показывает, что линейная конфигурация контуров фитоценозов во многих случаях тяготеет к зонам Северо-Припятского, Речицкого, Червонослободско-Малодушинского и других разломов. Среди различных сочетаний растительных сообществ ведущими признаками разрывных нарушений являются черноольшаники таволговые и осоковые, которые приурочены к зонам разгрузки и повышенной минерализации подземных вод вдоль линий разрывных нарушений (Обуховский, Тяшкевич, 1976).

Таблица 5.1 – Индикаторы возраста активизации разломов (Кузьмин, 2009)

| Возраст последней активизации разлома | Индикаторы |
|--|---|
| Современная (0–500 лет назад) | Деформация асфальтового покрытия; живые осыпи, блоки отседания и оползни на уступах, рвы на склонах; современные блоки отседания и оползни на уступах, рвы-отторженцы в теле оползней |
| Историческая (500–2500 лет назад) | Деформация и спрямление придолинного уступа; деформация позднеголоценовых террас |
| Голоцен (2500–10500 лет назад) | Уступы на склонах среднеголоценового возраста; террасированные склоны, смещения по локальным разломам |
| Плейстоцен | Крутой уступ, совпадающий с осевой зоной разлома; коленообразные изгибы русел рек; смещения осевых линий мелких распадков; спрямленный характер русел рек; спрямленный характер геоморфологических элементов пойменно-долинного комплекса |
| Дочетвертичное время (ранее 2,6 млн лет назад) | Эрозионно-денудационный рельеф платформенного типа с низкой энергетикой, реликтовый рельеф |

Принципиальная схема разломов и их отражения на космических снимках приведена на рисунке 5.8.

Использование космических изображений разных масштабов в принципе дает возможность сделать заключение о геологической структуре исследуемой местности как альтернативе морфометрическим методам анализа, основанным на анализе рельефа топографических карт, корректировка которых происходит в лучшем случае раз в несколько десятилетий.



А, Б – скрытые (не достигающие земной поверхности) разломы, на больших (1) и меньших (2) глубинах, в разрезах земной коры (а) и космических (б);
 В – открытые (достигающие земной поверхности) разломы, наклонные (1) и вертикальные (2) в разрезе (а) и на космическом изображении (б); 1 – разломы; 2 – блоки земной коры, разделяемые разломами; 3 – слои земной коры, не затронутые разломами; 4 – механические смещения по разломам; 5 – конус рассеяния деформаций; 6 – поток глубинных флюидов, тепла; 7 – конус рассеяния потока флюидов; 8 – тепловой поток; 9 – интенсивность спектральных индикаторов разломов.

Рисунок 5.8 – Принципиальная схема разломов и их отражения на космических снимках (Трифонов, Макаров, 1987)

В случае использования космических данных работа происходит непосредственно с реальным изображением поверхности Земли. Это

позволяет осуществлять мониторинг района и оперативно выявлять зоны активных разломов, требующие внимания при планировании строительства важных объектов или учитывать их при эксплуатации уже существующих (Боярчук и др., 2012).

Так, например, для подтверждения эффективности использования космических методов были осуществлены исследования древней платформы в западной части Московской области на основе обработки космических снимков разных масштабов. В результате было подтверждено наличие разломов на территории Истринского района, ограничивающих тектонические блоки, перемещающиеся друг относительно друга; рисунок выделенных блоков отражает различные иерархические уровни наблюдаемых объектов; выявлен узел сочленения крупных тектонических блоков, геологические проявления которого в рельефе наблюдаются на стереопарах и сопровождаются оползнями (Боярчук и др., 2012).

Разломы и их активизацию можно диагностировать по линейно протяженным облачным аномалиям, которые наблюдаются над активными разломами разной глубины заложения во всех регионах планеты. На космических снимках эти аномалии выглядят как узкие гряды облаков на фоне безоблачного пространства, темные области каньонов в облачных полях, резкие линейные границы облачных массивов (Морозова, 2012).

Причиной возникновения линейно протяженных облачных аномалий, наблюдающихся только в приземном слое атмосферы и имеющих небольшую протяженность, может быть повышенная концентрация металлизированных флюидов, водорода и радона в зоне разлома, повышенная грозовая активность (Морозова, 2012).

Появление облачных аномалий в атмосфере является следствием динамики земной коры, поэтому по изменению положения такой аномалии на космическом снимке можно судить о направлении и скорости распространения напряжения в земной коре в региональном и глобальном масштабе. Процесс дешифрирования облачных аномалий на метеорологических спутниковых снимках проводят в визуальном интерактивном режиме распознавания образов. Визуальная информация в данном случае репрезентативна и может быть представлена в течение нескольких минут после получения снимка (Морозова, 2012).

Актуальным направлением является использование GPS-измерений в зонах расположения сложных техногенных объектов, аварии на которых могут вести к серьезному экономическому ущербу и человеческим жертвам. Так, например, в Беларуси ведутся GPS-измерения

на реперах, заложенных в районе Краснослободского разлома, входящего в геодинамически активную зону Старобинского месторождения калийных солей. Сеть включает четыре геодинамических репера, расположенных в линию, перпендикулярную Краснослободскому разлому. Данная методика показала высокую эффективность GPS-наблюдений и подтвердила возможность оперативного определения пространственного положения фундаментальных пунктов геодезической сети на миллиметровом уровне точности (Михайлов и др., 2013).

Согласно имеющейся международной практики в настоящее время для мониторинга активных разломов используются такие методы, как космическая мультиспектральная съемка в оптическом диапазоне, тепловая космическая съемка, космическая радарная интерферометрия, системы глобального позиционирования, гравитационные спутниковые наблюдения и другие.

Задания для самостоятельной работы

1 Какова роль космических методов в изучении эндогенных геологических процессов?

2 Какие спутниковые системы и сенсоры могут быть использованы для мониторинга землетрясений?

3 Какие спутниковые системы и сенсоры могут быть использованы для мониторинга вулканических процессов?

4 Какие спутниковые системы и сенсоры могут быть использованы для мониторинга современных тектонических движений земной коры?

5 Назовите примеры использования космической съемки в инфракрасном диапазоне для изучения эндогенных геологических процессов.

6 Назовите примеры использования радарной космической съемки для изучения эндогенных геологических процессов.

7 Какие спутниковые системы могут быть использованы для оценки риска эндогенной геодинамики? Обоснуйте.

6 СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ЭКЗОГЕННОЙ ГЕОДИНАМИКИ

6.1 Спутниковый мониторинг процессов, связанных с деятельностью ветра

Ветер является одним из мощных экзогенных факторов, вызывающим такие процессы и явления, как ураганы, смерчи, нагоны, песчаные, соляные и пыльные бури, а также эоловые процессы (развевание, обтачивание, перенос и отложение частиц разрушенных пород). Эоловые отложения делят на подвижные и закрепленные. *Подвижные эоловые отложения* – это скопления песка, которые могут передвигаться под действием ветра (барханы, дюны). *Закрепленные эоловые отложения* – это неподвижные продукты и формы ветровой аккумуляции (грядовые и бугристые пески). Процессы, связанные с деятельностью ветра наиболее широко распространены в зонах пустынь.

Ареалы развития ветровой эрозии почв индицируются по более светлому тону, чем окружающий ландшафт, однородным крупнопятнистым рисунком. Подвижные пески в пустынях диагностируются по специфическим формам рельефа – барханам. Серия снимков позволяет оценить их направление и скорость движения. В других природно-ландшафтных условиях подвижные пески диагностируют по дюнам. Степень закрепленности песков можно индицировать по характеристикам растительного покрова (проективное покрытие, доминирующие жизненные формы), по рисунку и тону изображения. Незакрепленные пески имеют почти белый тон и слабо выраженный точечный рисунок. Закрепленные пески характеризуются наиболее темным густым тоном, не имеют точечного рисунка, покрыты растительностью. Перемещения массивов песков, их направление и скорость движения устанавливаются по сравнению материалов повторных съемок с интервалом времени примерно 5–10 лет.

Для диагностики незакрепленных песков также применяется космическая мультиспектральная съемка, на основе которой рассчитываются спектральные индексы – GSI (Topsoil Grain Size Index, Brabant et al., 1996) и NDSDI (нормализованный разностный индекс песчаных дюн, Fadhil, 2009). Для спутника Sentinel-2 формулы указанных индексов имеют вид:

$$\text{NDSDI} = (B4 - B12)/(B4 + B12),$$

$$\text{GSI} = (B4 - B2)/(B4 + B2 + B3),$$

где B2, B3, B4, B12 – номера каналов Sentinel-2.

Использование мультиспектральной космической съемки основано на существенных различиях спектрально-отражательных свойств подвижных песков и окружающего ландшафта. На рисунке 6.1 показаны спектральные кривые обнаженных песков, растительного покрова и дерновых песчаных почв (на основе мультиспектральной съемки спутников Sentinel-2 территории Белорусского Полесья, программа Multispec).

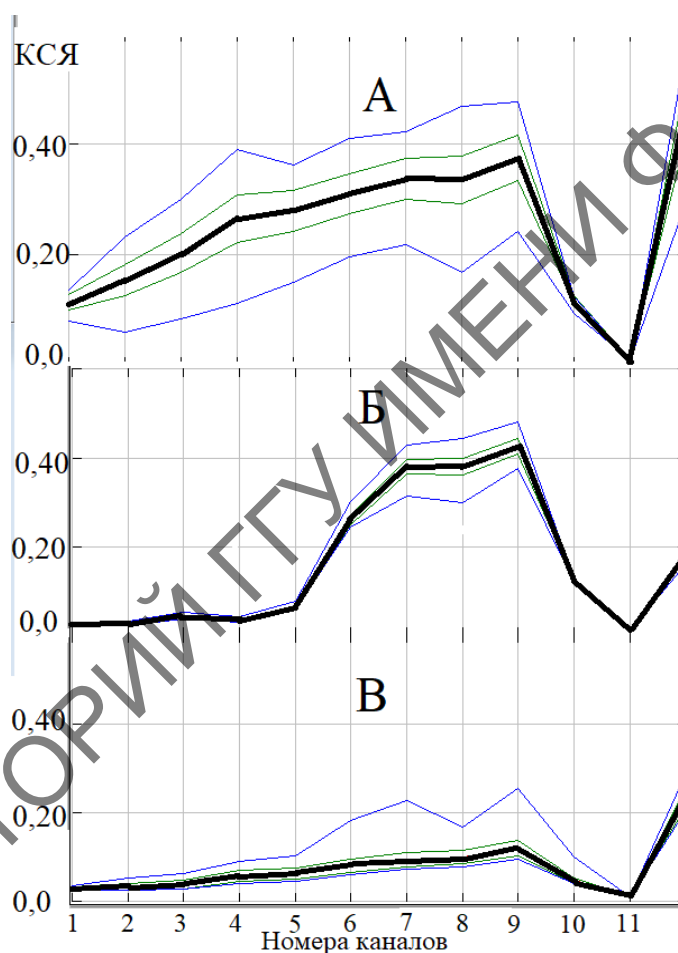


Рисунок 6.1 – Спектральные кривые: обнаженные незакрепленные пески (А), растительный покров (Б), дерновая песчаная почва (В) в ландшафтах Белорусского Полесья

На рисунке 6.2 показаны средние значения спектральных индексов GSI и NDSDI по трем типам объектов земной поверхности: обнаженные пески, эродированные песчаные почвы и незэродированные

песчаные почвы (на примере ландшафтов Белорусского Полесья). Видно, что обнаженные пески четко отличаются от почв: по NDSDI – в 2,8 раза, по GSI – в 1,3 раза. На основе повторных снимков можно проследить пространственно-временную динамику ареалов незакрепленных песков в ландшафте с помощью указанных индексов.

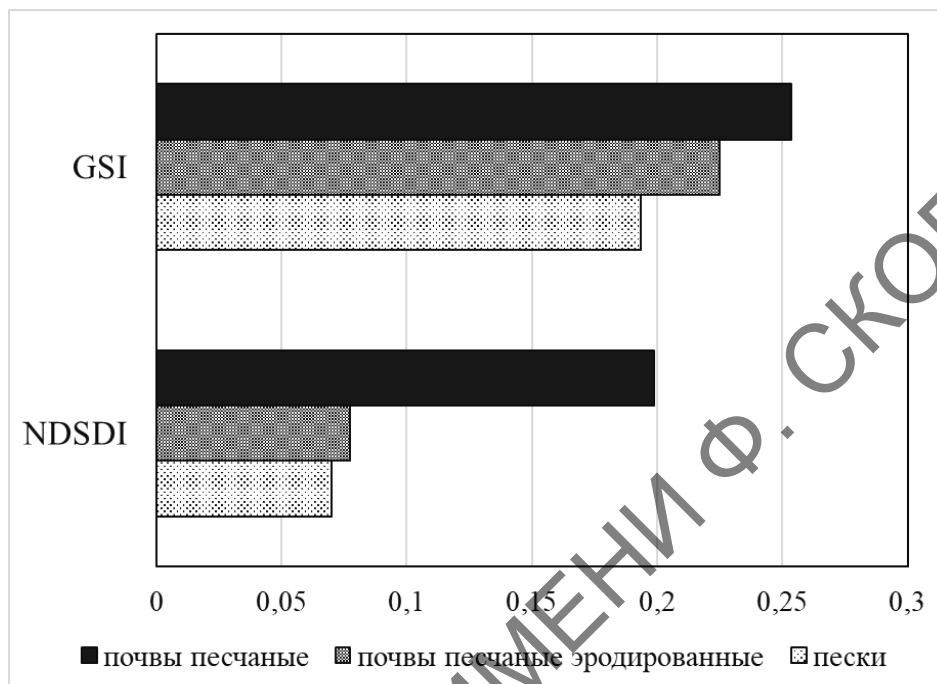


Рисунок 6.2 – Спектральные индексы GSI и NDSDI как индикаторы дефлированности почв в ландшафтах Белорусского Полесья

6.2 Спутниковый мониторинг процессов, связанных с деятельностью поверхностных вод

Процессы, вызванные деятельностью поверхностных вод, представлены таким процессами, как водная эрозия, геологическая деятельность рек, геологическая деятельность морей и озер, сели.

Эрозия – это комплекс процессов разрушения почв и горных пород (размыв, истирание, растворение) текучими поверхностными водами. Различают плоскостной смыв, линейную эрозию временных водотоков, речную эрозию. *Плоскостной смыв* (почвенная эрозия) – это результат размывающей деятельности дождевых капель и мельчайших водяных струй при дождях и снеготаянии. Размыв вызывает образование начальных форм эрозии – *потяжин*. Потяжины имеют вид нешироких извилистых или относительно прямолинейных полос более светлого тона, чем окружающий ландшафт, так как смывается верхняя

гумусовый горизонт почв. Размеры и густота потяжин указывает на интенсивность плоскостного смыва. По мере развития эрозионного процесса потяжины становятся все более широкими и четкими, сливаясь в сплошные поля. Участки плоскостного смыва индицируются по более светлому фототону.

Линейная эрозия временных водотоков обусловлена струйчатым размывом. Вначале образуются промоины (неглубокие эрозионные борозды), которые по мере развития превращаются в овраги и балки. Промоины дешифрируются по характерному рисунку и тоновым контрастам с окружающим ландшафтом (могут быть светлее или темнее окружения). Овраги и балки относительно просто дешифрируются визуально по характерным формам (рисунок 6.3). Динамика эрозионных процессов изучается на основе сравнения повторных космических съемок, выполненных в разные годы.



Рисунок 6.3 – Овражная эрозия в лесостепном ландшафте (Тульская область)

Для изучения овражно-балочной сети информативны зимние снимки. Благодаря низкому углу освещения Солнцем и длинным теням на таких снимках создается эффект трехмерного отображения рельефа, который позволяет выделить практически все формы эрозионного рельефа даже по снимкам среднего пространственного разрешения. Различить овраги и балки по таким снимкам можно на основе крутизны склонов и типа профиля, который хорошо просматривается благодаря освещенности или затененности склонов, а также по наличию или отсутствию древесной растительности на склонах. Эрозионные формы с крутыми обрывистыми склонами, лишенные растительности,

с большей вероятностью являются активными оврагами (Тематическое дешифрирование... 2020).

Для диагностики эродированности почв можно использовать космическую мультиспектральную съемку, на основе которой рассчитываются спектральные индексы, чувствительные к изменениям спектрально-отражательных свойств почв под воздействием водноэрозионных процессов. Так, для дистанционной оценки эродированности почв в условиях ландшафтов Белорусского Полесья можно использовать такие спектральные индексы, как QI (Quartz Index) и FII (Ferric iron Index), рассчитываемые по каналам сенсора ASTER спутника Terra:

$$FII = B2/B1,$$

$$QI = B11 \cdot B11 / B10 \cdot B12,$$

где B1, B2, B11, B10, B12 – номера каналов сенсора ASTER.

Так, значения FII для неэродированных почв достоверно выше, чем для эродированных (рисунок 6.4). Этот факт указывает на то, что при эрозии пахотных почв в них возрастает содержание оксидов Fe (III), вероятно, за счет распахивания иллювиального горизонта, обогащенного железом. Соответственно, по мере разрушения гумусового горизонта снижается содержание форм Fe (II), что отражает рост интенсивности процессов окисления.

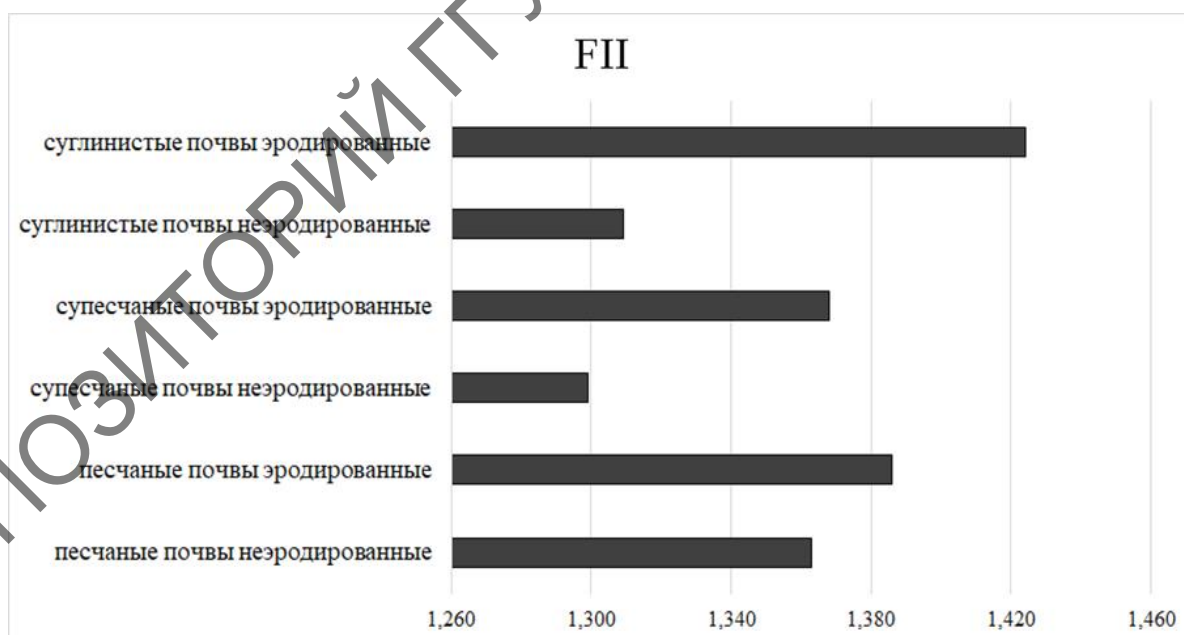


Рисунок 6.4 – FII (Ferric iron Index) как индикатор эродированности почв в ландшафтах Белорусского Полесья

Значения QI при росте эродированности почв увеличиваются (рисунок 6.5), что объясняется увеличением содержания песчаной фракции (кварцевый песок) при разрушении почвенного профиля, сформированного на мощных песках, широко распространённых в Белорусском Полесье.

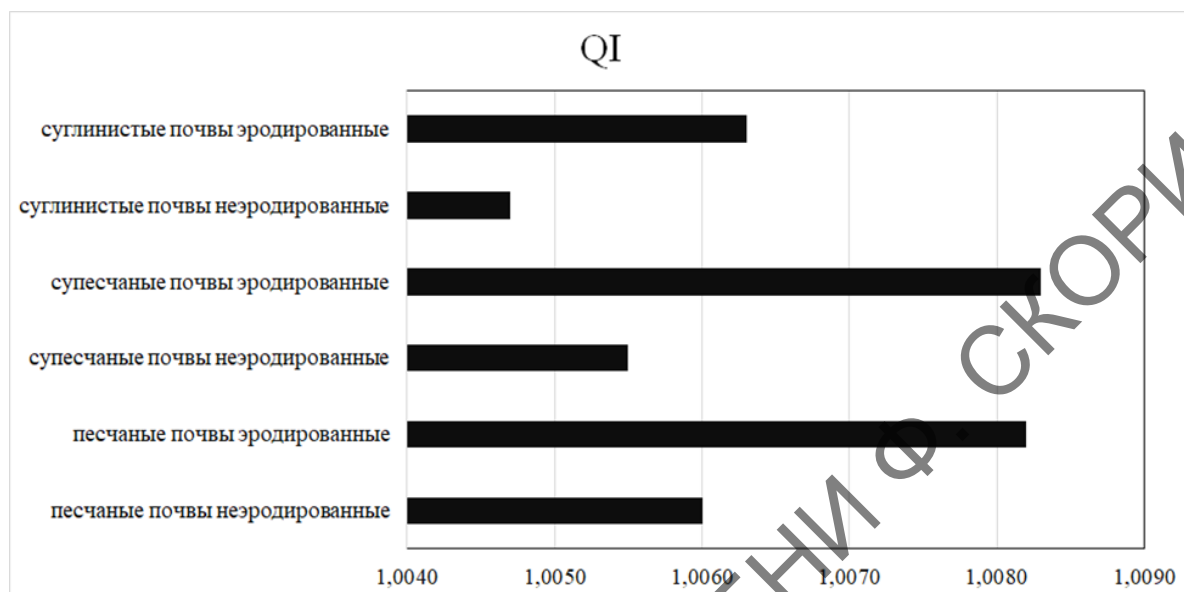


Рисунок 6.5 – QI (Quartz Index) как индикатор эродированности почв в ландшафтах Белорусского Полесья

Поскольку водноэрозионные процессы в существенной степени зависят от рельефа, то важную роль в их прогнозировании и оценке играют цифровые модели рельефа, которые получают на основе космической съемки. Наиболее доступными являются такие модели, как цифровая модель рельефа, построенная по результатам съемки ASTER (разрешение 30 м), цифровая модель рельефа, построенная по результатам съемки шаттла – SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission, разрешение 30–90 м), цифровая модель рельефа по данным ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite, Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar, разрешение 12,5 м).

Цифровые модели рельефа позволяют производить следующие операции: быстрое получение информации о морфометрических показателях (высота, угол наклона, экспозиция склона) в любой точке модели; анализ крутизны и экспозиций склонов, построение «на лету» соответствующих карт; генерация горизонталей; построение профилей поперечного сечения рельефа по направлению прямой или ломаной линии; анализ поверхностного стока; генерация сети тальвегов и водоразделов; расчёт объёмов; расчёт площадей поверхности и т. д.

Например, в специализированной ГИС SAGA на основе цифровых моделей рельефа рассчитывают такие характеристики, как Slope (уклоны), Aspect (аспект), Plan Curvature (плановая кривизна), Profile Curvature (профильная кривизна), Convergence Index (индекс конвергенции), Catchment Area (площадь водосбора), Wetness Index или Topographic Wetness Index (индекс влажности), LS-Factor (LS-фактор), Altitude above Channel Network (высота речной сети), Channel Network Base Level (базовый уровень речной сети), Channel Network (речная сеть), Valley Depth (глубина долины), Drainage Basins (дренаж).

6.3 Спутниковый мониторинг процессов, связанных с деятельностью подземных вод

Процессы, вызванные геологической работой подземных вод, представлены суффозией и карстом. *Суффозия* – процесс выноса частиц грунта током подземной воды с образованием пустот, воронок, провалов, которое сопровождается оседанием земной поверхности. *Карст* – процесс выщелачивания растворимых пород движущимися поверхностными и преимущественно подземными водами, вызывающий образование воронок, провалов и других пустот, также сопровождающихся оседанием земной поверхности.

Закарстованный массив – это массив горных пород, в строении которого принимают участие растворимые скальные породы и в пределах которого развиваются карст и/или карстово-суффозионные процессы.

Закарстованная территория (район, участок) – это территория, в пределах которой карст и связанные с ним суффозионные процессы проявлялись, проявляются или могут проявиться как на земной поверхности, так и в толще растворимых скальных пород.

Карстово-суффозионный процесс – это образование карстовых деформаций земной поверхности в покрывающей толще закарстованного массива вследствие выноса пород покровной толщи в трещинно-карстовые коллекторы и перераспределения заполнителя карстовых полостей и трещин подземными водами. Обрушение земной поверхности (и/или основания фундамента зданий или сооружений) с образованием воронки, обусловленное развитием (наличием) карста, – *карстовый провал*. Любые поверхностные и подземные проявления карста и карстово-суффозионных процессов – *карстовые формы*.

Выделяют следующие типы деформаций земной поверхности, связанные с карстом:

- провалы;
- общие оседания территории (площадью до нескольких десятков км²);
- локальные оседания территории (площадью до десятков м², глубиной до 1–2 м);
- карстовые (карстово-суффозионные) просадки (как правило, диаметром до 1–2 м, глубиной до 0,5 м);
- коррозия поверхности карстующихся пород.

Нередко развиваются комбинированные и промежуточные типы деформаций земной поверхности.

Использование космических материалов при изучении карстовых и суффозионных процессов проводят для определения: границ распространения генетических типов четвертичных отложений; тектонических нарушений и зон повышенной трещиноватости; областей питания и разгрузки подземных вод; границ различных ландшафтов; наличия и распространения поверхностных карстовых проявлений (в том числе полей карстовых воронок/провалов); предварительной плотности карстовых форм на территории изысканий; относительного возраста поверхностных карстовых форм (по геоморфологическим и геоботаническим признакам); взаимосвязи поверхностных карстовых проявлений с геоморфологическими, геологическими (в том числе тектоническими), гидрогеологическими и другими условиями развития карста и карстово-суффозионных процессов; факторов техногенной нагрузки; наличия видимых деформаций поверхности земли, зданий и сооружений, вызванных проявлением карста; динамики развития карстовых форм на основе сопоставления снимков разных лет съемки.

Рекомендуется при дешифрировании космических материалов для объективного выявления пространственных закономерностей развития карста и карстово-суффозионных процессов проводить анализ не только исследуемой, но и прилегающей территорий (шириной не менее 100 м). По результатам дешифрирования космоснимков уточняют предварительные карты распространения карстующихся пород и карстовых проявлений.

Визуальное дешифрирование карста и суффозии выполняют главным образом по формам их проявления в ландшафтах (по особенностям планового рисунка гидросети, рельефу, структуре ландшафтных комплексов). На космических снимках сверхвысокого

разрешения информации о карсте и суффозии получают на основе выявления форм карстового и суффозионного рельефа и морфометрических показателей каждой конкретной воронки, западины, долины, ниши, котловины, а также изучения характера растительности и ее динамики в зависимости от эволюции провальных форм. На космических снимках высокого и среднего разрешения ограничиваются изучением их плановых характеристик и тональных различий. Провальные формы поверхности, сформировавшиеся в результате карста, на космоснимках дешифрируют прямым образом лишь в открытых районах и только в случае их групповой концентрации. Единичные карстовые формы могут определяться при размерах диаметра в десятки метров. Наиболее характерным признаком визуального дешифрирования карстовых форм рельефа является зернистость, создающая точечный характер изображения, как правило, с более темным фототонном внутри зерен по сравнению с окружающим ландшафтом. Ошибок в распознавании карста и суффозии на космоснимках сверхвысокого и высокого разрешения, как правило, не возникает. Карстовые формы, особенно провальные, имеют в плане резко очерченные границы овальных пятен (рисунок 6.6), а суффозионные котловины и западины характеризуются пятнами неправильной формы и преобладанием удлиненных, зигзагообразных, звездообразных очертаний.



Рисунок 6.6 – Карстовые воронки на космоснимке высокого разрешения (по Антипову и др., 2016)

Космические изображения карстовых и суффозионных форм идентичны. За счет оптической генерализации не различаются особенности плановой конфигурации отдельных форм, однако группировки их четко контрастируют с фоновым ландшафтом. Отличать карстовые формы от суффозионно-просадочных на космических снимках следует на основе привлечения ландшафтных индикаторов. Например, карст развивается в полускальных и скальных карбонатных или соленосных горных породах. Характер гидросети в массивах с активным карстом отличается обилием резких коленообразных перегибов и спрямленными участками в продольном профиле, что вызвано трещиноватостью горных пород. Кроме того, часто отмечается наличие «слепых» и «полуслепых» долин и суходолов. В областях развития суффозии, связанной с распространением песчано-глинистых пород, гидросеть имеет другой рисунок, типичный для рыхлых отложений, – перистый, дендритовидный. Густота речной сети в рыхлых отложениях также значительно больше, чем в полускальных и скальных.

Так, для открытого карста характерны следующие дешифровочные признаки:

- опознаваемый на космоснимках высокого разрешения участок (карстовое поле) со специфической карстовой формой «гусиная кожа» с компактно расположенными углублениями (воронками) диаметром до 10–15 м в пределах карбонатных или иных карстующихся пород, выходящих на поверхность;

- незначительные различия размеров воронок в пределах одного карстового поля;

- расположение карстовых полей на склонах долин рек и оврагов;
- вытянутость карстовых полей вдоль водотока (Антипов и др., 2016).

Дешифровочными признаками суффозионно-карстовых воронок (западин) покрытого карста могут являться:

- а) объекты округлой формы, контрастные по спектральным характеристикам мультиспектральных снимков, фиксирующие углубления в рельефе (западины) в области развития подстилающих карбонатных или иных карстующихся пород;

- б) неупорядоченное расположение нескольких расположенных рядом западин;

- в) размер западины от 15 до 150 м в поперечнике (в среднем 50–70 м);

- г) углубления в рельефе или мелкие водоемы, болота округлой формы;

д) наличие деревьев и/или кустарников в западине, расположенной на поле;

е) объект с признаками западин, не совпадающий с местами расположения известных опор ЛЭП и других техногенных объектов (Антипов и др., 2016).

Для оперативного дистанционного мониторинга карстово-суффозионных процессов в основном подходят данные, получаемые с космических аппаратов, ведущих съемку сверхвысокого разрешения: WorldView-1, WorldView-2, WorldView-3, GeoEye-1, Pleiades-1A, Pleiades-1B, «Ресурс-П».

6.4 Спутниковый мониторинг процессов, связанных с действием силы тяжести на склонах

Геологические процессы, обусловленные действием силы тяжести на склонах (гравигенные), представлены оползнями, обвалами, камнепадами и осыпями. Эти процессы представляют собой процессы перемещения горных пород по склону под действием силы тяжести.

Оползень – перемещение масс горных пород вниз по склону под действием силы тяжести, связанное с деятельностью поверхностных и подземных вод и носящее характер скольжения или сдвижения пород.

Обвалы – это внезапное обрушение больших массивов горных пород, сопровождающееся опрокидыванием и дроблением. Возникают в результате ослабления внутренних связей вследствие выветривания и увлажнения пород.

Камнепады – падение со склонов отдельных камней или глыб. Причиной камнепадов являются атмосферные осадки (дождь, снеготаяние), вызывающие увеличение силы тяжести на склоне и уменьшение сил трения и сцепления.

Осыпи – скопления глыбового или обломочного материала на склоне или у его основания.

Главным фактором, предопределяющим развитие этих процессов, является рельеф. Факторами активизации выступают движения поверхностных и подземных вод, сейсмичность, нарушения растительного покрова.

Гравитационные процессы приводят к образованию характерных форм мезо- и микрорельефа, поэтому относительно хорошо дешифрируются на космических снимках высокого разрешения. Например,

оползни резко выделяются на склоне, отличаясь от фонового рисунка и тона. Для них характерна пятнистость, обусловленная бугристым или ступенчатым строением оползневых тел, неоднородным увлажнением и нарушением растительности. При визуальном дешифрировании космических снимков высокого разрешения можно определить ориентировку, конфигурацию, высоту, крутизну склона, форму и размеры оползня, характер его границ, состояние обрывов, кроме того, получить характеристику рельефа оползневого тела и даже отдельных морфологических элементов оползня. Свежие оползни диагностируются по четким формам рельефа, светлому тону обнаженной поверхности. С течением времени оползни зарастают растительностью, поэтому по характеру растительного покрова в лесном ландшафте можно установить их возраст.

Обвалы визуальнo дешифрируются по тону и структуре изображения. Хорошо видны свежие обвалы в лесной зоне, которые резко контрастируют с окружающим ландшафтом.

ДЗЗ (мультиспектральные, в том числе в тепловых диапазонах, радиолокационные, лидарные данные, полученные космическими аппаратами) широко используется при изучении оползней, включая обнаружение, инвентаризацию, картирование, создание карт подверженности оползням, анализ опасности оползней, а также их мониторинг (Смирнова, Кирсанов, 2021).

Космические методы используются для решения таких задач, как обнаружение и инвентаризация оползней и обвалов, создание карт оползневой и обвальной опасности, прогнозирование оползней и обвалов, оперативный мониторинг оползней и обвалов.

Так, например, при обнаружении и инвентаризации в качестве вызывающих оползни факторов рассматриваются топографические и геоморфологические факторы, которые получают с помощью цифровых моделей рельефа (уклон, экспозиция, кривизна склона и рельефа), ландшафтные и гидрологические факторы (по результатам дешифрирования мультizonальных съемок Landsat, Sentinel, ASTER и других спутниковых систем). Для выяснения ландшафтных и гидрологических факторов оползнеобразования практикуется использование различных спектральных индексов (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index, NDBI – Normalized Difference Built Index, NDWI – Normalized Difference Water Index и MNDWI – Modification of Normalized Difference Water Index). С помощью NDVI оценивают состояние растительного покрова, NDBI – застроенность территорий, NDWI и MNDWI – гидрологические условия оползнеобразования.

На основе анализа цифровых моделей рельефа рассчитывают такие показатели, как топографический индекс влажности (TWI – Topographic Wetness Index), индекс переноса наносов (STI – Sediment Transport Index), индекс мощности потока (SPI – Stream Power Index) и другие. Как уже указывалось выше, цифровые модели рельефа также получают на основе космической съемки. При изучении гравитационных процессов используют:

а) модель рельефа, построенную по результатам съемки ASTER (разрешение 30 м),

б) цифровую модель рельефа, построенную по результатам съемки шаттла SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission, разрешение 30–90 м),

в) цифровую модель рельефа по данным ALOS PALSAR (Advanced Land Observing Satellite, Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar, разрешение 12,5 м).

Разработаны системы автоматического распознавания оползней по результатам космических мультizonальных съемок на основе нейронных сетей, сверхточных нейронных сетей, глубокого обучения и т. д. (Смирнова, Кирсанов, 2021).

По радарным данным ведется мониторинг деформаций и смещений оползней. Например, мониторинг прибрежного оползня в районе Маяка Тазонес (Северная Испания) проводился методом DInSAR по радарным данным Envisat с 2002 по 2012 г., а затем Sentinel-1 с 2014 по 2019 г. для получения временных рядов деформации и карты скорости деформации. Карта скоростей смещений получена по району развития береговых оползней на побережье Гранады в Андалусии (Испания) обработкой временных рядов радарной съемки Sentinel-1 методом InSAR. Проведены выделение, классификация активных зон смещения и детальный анализ выбранных прибрежных оползней. Показано, что полученная на основе радарной съемки карта смещений в основном совпадает с картой смещений этих оползней на основе наземных исследований. Результаты мониторинга оползневых процессов в бассейне р. Карнади (Непал) по радарным данным Envisat и Sentinel-1 методом InSAR показали, что этот метод может успешно использоваться для оценки медленно движущихся масс от сантиметров до нескольких дециметров в год или глубинных деформаций склона, приводящих к частичной или полной реактивации оползня (Смирнова, Кирсанов, 2021).

Перспективным направлением в изучении оползневых процессов является космическая инфракрасная (тепловая) съемка. Эффективность комплексирования методов космической инфракрасной съемки и интерферометрии (DInSAR) для мониторинга оползней продемонстрирована

на примере одного из крупнейших оползней на северо-востоке Сицилии (Италия). Применение инфракрасной съемки позволило выявить области с различной температурой поверхности, связанные с растительностью, крутыми склонами, обнажёнными участками, контактами между породами, и обнаружить зарождающиеся оползни и древние оползневые тела. Участки оползневых смещений, полученные с помощью DInSAR, в основном совпадают с областями, выделенными по тепловым снимкам. В комплексе с лазерным сканированием и использованием глобальных систем позиционирования тепловая съемка применяется также для изучения динамики оползней, выделения потенциально опасных зон, выяснения оползневой дренажной сети и т. д. (Смирнова, Кирсанов, 2021).

Наблюдение динамики зоны оползня на р. Бурее по радарным снимкам Sentinel-1 в период 2016–2018 гг. было проведено методами дифференциальной интерферометрии. Измерены смещения поверхности оползневого склона в холодное время года, когда интерферометрическая когерентность отражённых поверхностью сигналов достаточно высока. По характеру изменения когерентности во времени сделан вывод о резкой активизации оползневых процессов (Захарова, Захаров, 2019; Бондур и др., 2019).

Методы радарной интерферометрии (InSAR) были использованы в районе Большого Сочи для обнаружения, мониторинга движений оползней и оценки оползневого риска. Применялись данные спутников ALOS PALSAR (2007–2010) L-диапазона (23,5 см) и Sentinel-1 C-диапазона. Карта оползневых участков по данным радарной интерферометрии построена по результатам расчётов полей смещений с использованием Sentinel-1 с восходящей и нисходящей орбит за период 2015–2016 гг. Интерферометрическая обработка проводилась с применением методов DInSAR и PS-InSAR, реализованных в программных пакетах SNAP и StaMPS/MTI, и метода SBAS (ENVI SARscape). Комплексование различных методов обработки снимков Sentinel-1 позволило выявить активные, периодически активизирующиеся и временно стабильные оползневые склоны, а также новые медленные оползни, которые не отмечены по наземным данным (Смолянинова и др., 2018).

Таким образом, имеющийся в мировой практике опыт показывает, что космические снимки оптического диапазона среднего разрешения в основном применяются для обнаружения оползней и составления карт инвентаризации оползней с учётом длинных временных рядов Landsat, SPOT-1–5, ASTER, Sentinel-2, RapidEye и др. При мониторинге

оползней и количественной оценке смещений используются космическая мультizonальная съемка высокого разрешения (GeoEye, QuickBird, WorldView и др.), инфракрасная съемка, а также данные радарной интерферометрии (Смолянинова и др., 2018; Захарова, Захаров, 2019; Бондур и др., 2019; Смирнова, Кирсанов, 2021).

6.5 Спутниковый мониторинг геокриогенных процессов

Дистанционные методы в зоне распространения многолетнемерзлых пород могут решать целый ряд задач:

- картирование геокриогенных геологических процессов, вызванных протаиванием или промерзанием горных пород (морозобойного растрескивания, морозного пучения, наледей, солифлюкции, термокарста и т. д.);
- определение глубины сезонного промерзания и протаивания по площади и разрезу;
- изучение температурного поля мерзлых пород;
- определение интенсивности геокриогенных процессов;
- собственно мониторинг геокриогенных процессов.

Актуальность космического мониторинга геологических процессов, происходящих в многолетнемерзлых породах, обусловлена их активизацией в связи с глобальными изменениями климата. Развитие криогенных процессов увеличивает риск аварий в технических системах, расположенных на многолетнемерзлых породах.

Морозобойное растрескивание индицируется полигональной трещиноватостью земной поверхности – прерывистая сеть тонких темных линий на общем сером фоне фотоснимка. Морозное пучение индицируется на снимке четкими крупными пятнами. Бугры пучения – пятна более светлого тона, с концентрическим рисунком и темным ободком у основания, индицирующим сильно обводненную зону. Наледи уверенно дешифрируются по почти белому тону, которым они отличаются от окружающего тундрового ландшафта. Можно определить площадь и в некоторых случаях мощность наледей.

Солифлюкция диагностируется по специфическим формам рельефа, полосчатому рисунку изображения (в том числе с хорошо выраженными текстурами течения), отличиями в тоновых характеристиках.

Глубина сезонного протаивания индицируется по растительному покрову: ковровая тундра, пятнистая тундра, мелкобугристая тундра, торфяно-бугристая тундра.

Индикаторами термокарстовых процессов служат термокарстовые формы – западины, блюдца, котлованы, которые достаточно уверенно дешифрируются на космических снимках.

Термокарстовые озёра, образующиеся в результате вытаявания подземных льдов различного генезиса, хорошо дешифрируются на космических изображениях (рисунок 6.7) и являются наиболее пригодными геоморфологическими индикаторами криогенных изменений поверхности в условиях потепления. Выделение термокарстовых озер можно осуществлять как визуально, так и автоматизированным способом на основе мультиспектральных снимков среднего и высокого разрешения (Landsat 4-5 TM, Landsat 7 ETM+, Landsat-8 OLI, Sentinel-2 и другие).

По многолетним рядам спутниковых снимков можно проследить изменения площади термокарстовых озер за последние 50 лет (например, по съемкам семейства спутников Landsat).



Рисунок 6.7 – Термокарст в тундровом ландшафте (полуостров Ямал)

При изучении изменений площади озер возможно также использование современных космических снимков сверхвысокого и очень высокого разрешения (Ikonos, QuickBird, SPOT-5, ALOS). С их помощью выполняют оценку надежности дешифрирования озер на космических

снимках со спутника Landsat или проводят детальное изучение форм озерно-термокарстового рельефа и наблюдаемых изменений в пределах небольшой ограниченной территории.

Отличительным признаком термокарстовых озер является их квазиокруглая или овальная форма. Хорошее отображение озер и аласов на космических снимках позволяет не только четко выделить районы распространения термокарстового рельефа, но и изучать стадии его развития. Можно индцировать молодые формы – это озерные термокарстовые котловины, полностью заполненные водой, зрелые – термокарстовые озера с каймой окружающих их аласов, старые – сухие аласы с остаточными озерами или без них. В самих аласах преобладает луговая растительность, а цвет их отображения на снимке зависит от стадии вегетации. Границы аласов хорошо видны благодаря изменениям растительного покрова.

Изменение характера геокриологических процессов (переход от сокращения площадей озер к их росту) наблюдается на границах зон сплошного и прерывистого типов распространения многолетнемерзлых пород. Наблюдая за динамикой термокарстовых озер, можно отслеживать и прогнозировать смещение границы между зонами многолетнемерзлых пород и оценивать в этом районе экологический риск для инфраструктуры нефтегазового комплекса, дорог и др.

Широко используется для мониторинга геокриогенных процессов тепловая съемка. При изучении геокриогенных процессов дешифрирование тепловых снимков включает:

- дешифрирование тепловых аномалий по одиночным тепловым снимкам и последующий анализ связи этих аномалий с конкретными природными и техногенными объектами;
- дешифрирование серии разносезонных тепловых снимков для выяснения пространственно-временной структуры тепловых полей;
- определение по тепловым снимкам количественных показателей (например, температуры земной поверхности).

Космическая съемка в тепловом диапазоне электромагнитного спектра выполняется спутниками семейства Landsat: 6 канал Landsat-5 TM и Landsat-7 ETM+ с разрешением 120 м, 10 и 11 каналы Landsat-8 TIRS с разрешением 100 м. На основе многозональной съемки сенсора MODIS спутника Terra разработан продукт MOD11_A2, содержащий композит из средних температур за 8 суток с разрешением 1 км (в градусах кельвина), который можно свободно скачать по ссылке <https://search.earthdata.nasa.gov/>.

Для исследования криогенных деформаций увлажненных грунтов используется метод спутниковой дифференциальной радарной интерферометрии.

Задания для самостоятельной работы

1 Какова роль космических методов в изучении экзогенных геологических процессов?

2 Назовите дешифровочные признаки эоловых форм рельефа.

3 Какие спутниковые системы и сенсоры могут быть использованы для изучения эоловых процессов?

4 Назовите дешифровочные признаки карстовых и суффозионных форм рельефа.

5 Какие спутниковые системы и сенсоры могут быть использованы для изучения карстовых и суффозионных процессов?

6 Какие спутниковые системы и сенсоры могут быть использованы для мониторинга оползней?

7 Какова роль космических методов в картировании и мониторинге геокриогенных геологических процессов (термокарт, солифлюкция, образование наледей и т. д.)?

8 Назовите примеры использования космической съемки в инфракрасном диапазоне для изучения геологических процессов в зоне многолетней мерзлоты.

9 Какие спутниковые системы могут быть использованы для оценки риска экзогенной геодинамики? Обоснуйте.

ЛИТЕРАТУРА

1 Антипов, В. С. Выявление карстовых и суффозионно-карстовых объектов по материалам космических съемок в центральной части Восточно-Европейской платформы / В. С. Антипов, К. А. Волин, Е. А. Журавлев // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2016. – Вып. 4. – С. 4–16.

2 Аэрокосмические методы геологических исследований / под ред. А. В. Перцова. – СПб : ВСЕГЕИ, 2000. – 316 с.

3 Аэрокосмический мониторинг объектов нефтегазового комплекса / под ред. В. Г. Бондура. – М. : Научный мир, 2012. – 558 с.

4 Балдина, Е. А. Радиолокационное зондирование Земли для географических исследований / Е. А. Балдина, О. А. Чеснокова // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5. География. – 2011. – № 1. – С. 16–21.

5 Бондур, В. Г. Метод прогнозирования землетрясений на основе линеamentного анализа космических изображений / В. Г. Бондур, А. Т. Зверев // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – № 1. – С. 76–83.

6 Бондур, В. Г. Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеamentов / В. Г. Бондур, А. Т. Зверев // Исследование Земли из космоса. – 2005. – № 3. – С. 37–52.

7 Бондур, В. Г. Космический мониторинг динамики систем линеamentов в период подготовки землетрясений в Калифорнии / В. Г. Бондур, А. Т. Зверев, Л. В. Кузнецова // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – № 5. – С. 47–55.

8 Бондур, В. Г. Физическая природа линеamentов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий / В. Г. Бондур, А. Т. Зверев // Исследования Земли из космоса. – 2007. – № 1. – С. 47–56.

9 Бондур, В. Г. Мониторинг состояния оползневой зоны на реке Бурья в 2018–2019 годах под радиолокационным и оптическим космическим изображениям / В. Г. Бондур, Л. Н. Захарова, А. И. Захаров // Исследования Земли из космоса. – 2019. – № 6. – С. 26–35.

10 Боярчук, К. А. Космический мониторинг геодинамической обстановки древних платформ / К. А. Боярчук, Л. В. Милосердова, М. В. Туманов // Геоматика. – 2012. – № 2. – С. 45–51.

11 Викторov, С. В. Индикационная геоботаника / С. В. Викторov, Г. Л. Ремезова. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1988. – 168 с.

12 Викторov, С. В. Ландшафтная индикация и ее практическое применение / С. В. Викторov, А. Г. Чикишев. – М. : Изд-во МГУ, 1990. – 200 с.

13 Виноградов, Б. В. Преобразованная Земля (аэрокосмические исследования) / Б. В. Виноградов. – М. : Мысль, 1981. – 295 с.

14 Виноградов, Б. В. Аэрокосмический мониторинг экосистем / Б. В. Виноградов. – М. : Наука, 1984. – 320 с.

15 Виноградов, Б. В. Основы ландшафтной экологии / Б. В. Виноградов. – М. : ГЕОС, 1998. – 418 с.

16 Воробьева, А. А. Дистанционное зондирование Земли / А. А. Воробьева. – СПб, 2012. – 168 с.

17 Гаврилов, В. П. Геодинамика : учебник для вузов / В. П. Гаврилов. – М. : МАКС Пресс, 2007. – 346 с.

18 Космотектоническая карта Беларуси масштаба 1:500000: создание и результаты / Р. Г. Гарецкий [и др.] // Літасфера. – 2013. – № 1. – С. 3–30.

19 Гирина, О. А. Спутниковый мониторинг вулканов Камчатки и Северных Курил / О. А. Гирина, Д. В. Мельников, А. Г. Маневич // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – № 6. – С. 194–209.

20 Гиперспектральное дистанционное зондирование в геологическом картировании / под ред. Г. Г. Райкунова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 136 с.

21 Горшков, С. П. Экзодинамические процессы освоенных территорий / С. П. Горшков. – М. : Недра, 1982. – 286 с.

22 Грищенко, М. Ю. Исследование возможностей применения снимков в тепловом инфракрасном диапазоне для создания тематических карт / М. Ю. Грищенко, Е. А. Балдина // Вопросы географии. Сборник 144. Картография в цифровую эпоху. – М. : Издательский дом «Кодекс», 2017. – С. 358–375.

23 Губин, В. Н. Дистанционные методы в геологии / В. Н. Губин. – Минск : БГУ, 2004. – 138 с.

24 Гусев, А. П. Фитоиндикаторы инженерно-геологических процессов на территории города / А. П. Гусев // Природные ресурсы. – 2006. – № 3. – С. 33–40.

25 Гусев, А. П. Использование спектральных индексов для оценки эродированности почв в природно-антропогенных ландшафтах Беларуси / А. П. Гусев, И. И. Козюлев, И. А. Шаврин // Российский журнал прикладной экологии. – 2020. – № 2. – С. 48–52.

26 Гусев, А. П. Геоэкология: геоэкологические аспекты неблагоприятных и опасных природных и антропогенных процессов и явлений : практическое руководство / А. П. Гусев. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2017. – 47 с.

27 Гусев, А. П. Космические методы в прикладной геологии : практикум / А. П. Гусев. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2021. – 77 с.

28 Захарова, Л. Н. Наблюдения динамики зоны оползня на реке Бурея по данным интерферометрической съемки Sentinel-1 в 2017–2018 гг. / Л. Н. Захарова, А. И. Захаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16. – № 2. – С. 273–277.

29 Златопольский, А. А. Новые возможности технологии LESSA и анализ цифровой модели рельефа. Методический аспект / А. А. Златопольский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8. – № 3. – С. 38–46

30 Зонненшайн, Л. П. Введение в геодинамику / Л. П. Зонненшайн, Л. А. Савостин. – М. : Недра, 1979. – 311 с.

31 Злобин, Т. К. Геодинамические процессы и природные катастрофы : учебное пособие / Т. К. Злобин. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2010. – 228 с.

32 Иванов, И. П. Инженерная геодинамика / И. П. Иванов, Ю. Б. Тржцинский. – СПб. : Наука, 2001. – 416 с.

33 Кац, Я. Г. Основы линеаментной тектоники / Я. Г. Кац, А. И. Полетаев, Э. Ф. Румянцева. – М. : Недра, 1986. – 144 с.

34 Кац, Я. Г. Основы космической геологии / Я. Г. Кац, А. В. Тевелев, А. И. Полетаев. – М. : Недра, 1988. – 235 с.

35 Кронберг, П. Дистанционное изучение Земли. Основы и методы дистанционных исследований в геологии / П. Кронберг. – М. : Мир, 1988. – 343 с.

36 Короновский, Н. В. Общая геология : учебник / Н. В. Короновский. – М. : КДУ, 2006. – 528 с.

37 Корчуганова, Н. И. Дистанционные методы геологического картирования / Н. И. Корчуганова, А. К. Корсаков. – М. : КДУ, 2009. – 288 с.

38 Кузьмин, С. Б. Активные разломы и новейшая геодинамика литосферы / С. Б. Кузьмин // География и природные ресурсы. – 1994. – № 3. – С. 145–152.

39 Кузьмин, С. Б. Геоморфологические критерии геодинамической опасности зон активных разломов для магистральных трубопроводов (на примере газопровода «Ковыкта-Иркутск») / С. Б. Кузьмин // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2009. – № 4. – С. 340–357.

40 Кузьмин, Ю. О. Современная геодинамика: от движения земной коры до мониторинга ответственных объектов / Ю. О. Кузьмин // Физика Земли. – 2019. – № 1. – С. 78–103.

41 Лапердин, В. К. Геодинамика опасных процессов в зонах природно-техногенных комплексов Восточной Сибири / В. К. Лапердин, Р. А. Качура. – Иркутск : ИЗК СО РАН, 2010. – 312 с.

42 Ломтадзе, В. Д. Инженерная геодинамика / В. Д. Ломтадзе. – Л. : Недра, 1977. – 479 с.

43 Компьютерный практикум по цифровой обработке изображений и созданию ГИС / И. К. Лурье [и др.]. – М. : Научный мир, 2004. – 148 с.

44 Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами / В. А. Малинников [и др.]. – М. : Изд. МИИГАиК, 2008. – 145 с.

45 Изучение геодинамических явлений в Солигорском горнопромышленном районе инновационными технологиями / В. И. Михайлов [и др.] // Наука и техника. – 2013. – № 6. – С. 60–63.

46 Морозова, Л. И. Проявления геодинамической активности земной коры в облачных полях / Л. И. Морозова // Геология и геофизика. – 2012. – Т. 53. – № 4. – С. 541–550.

47 Обуховский, Ю. М. Ландшафтная индикация : учебное пособие / Ю. М. Обуховский. – Минск : БГУ, 2008. – 299 с.

48 Обуховский, Ю. М. Индикационное картографирование : электронный учебно-методический комплекс для специальности 1-31 02 03 «Космоаэрокартография» / Ю. М. Обуховский, П. В. Жумарь. – Минск : БГУ, 2020. – 257 с.

49 Обуховский, Ю. М. Структура растительного покрова как индикатор глубинного геологического строения в условиях западной части Припятского прогиба / Ю. М. Обуховский, И. А. Тяшкевич // Доклады АН БССР. – 1976. – Т. 20. – № 8. – С. 729–732.

50 Платэ, А. Н. Комплексное использование данных дистанционного зондирования для оценки масштаба опасности современного вулканизма / А. Н. Платэ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9. – № 4. – С. 223–232.

51 Применение данных спутника Himawari для мониторинга вулканов Камчатки / О. А. Гирина [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14. – № 7. – С. 65–76.

52 Свидзинская, Д. В. Основы QGIS / Д. В. Свидзинская, А. С. Бруй. – Киев : Логос, 2014. – 83 с.

53 Свідзінська, Д. В. Методи геоекологічних досліджень: геоінформаційний практикум на основі відкритої ГІС SAGA : навчальний посібник / Д. В. Свідзінська. – Київ : Логос, 2014. – 402 с.

54 Смирнова, И. О. Состояние и перспективы использования данных дистанционного зондирования при изучении экзогенных геологических процессов на примере оползней / И. О. Смирнова, А. А. Кирсанов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2021. – Т. 18. – № 3. – С. 26–48.

55 О возможности применения РСА-интерферометрии с использованием снимков со спутников Sentinel-1 при изучении оползневой активности в районе горного кластера Большого Сочи / Е. И. Смольянинова [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15. – № 4. – С. 103–111.

56 Сладкопевцев, С. А. Изучение и картографирование рельефа с помощью аэрокосмической информации / С. А. Сладкопевцев. – М. : Недра, 1982. – 216 с.

57 Создание информационного ресурса «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» / В. Ю. Ефремов [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9. – № 5. – С. 155–170.

58 Спутниковые технологии в геодинамике / под ред. В. Н. Губина. – Минск : Минсктиппроект, 2010. – 87 с.

59 Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого разрешения : учебное пособие / А. Н. Шихов [и др.] – Пермь, 2020. – 191 с.

60 Трифионов, В. Г. Геодинамика и история цивилизаций / В. Г. Трифионов, А. С. Караханян. – М. : Наука, 2004. – 668 с.

61 Трифионов, В. Г. Космические исследования в геологии / В. Г. Трифионов, В. И. Макаров. – М. : Знание, 1987. – 48 с.

62 Тронин, А. А. Спутниковые методы изучения землетрясений / А. А. Тронин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8. – № 4. – С. 335–343.

63 Спектральные методы дистанционного зондирования в геологии. Обзор / А. А. Тронин [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8. – № 4. – С. 23–36.

64 Трофимов, В. Т. Экологическая геология / В. Т. Трофимов, Д. Г. Зилинг. – М. : ЗАО «Геоинформмарк», 2002. – 415 с.

65 Трофимов, Д. М. Аэрокосмические исследования на поисковом этапе геолого-разведочных работ на нефть и газ / Д. М. Трофимов. – М. : РУДН, 2010. – 307 с.

66 Хаин, В. Е. Геотектоника с основами геодинамики / В. Е. Хаин, М. Г. Ломидзе. – М. : Изд-во МГУ, 2005. – 480 с.

67 Хаин, В. Е. Цикличность геодинамических процессов: ее возможная природа / В. Е. Хаин, Э. Н. Халилов. – М. : Научный мир, 2009. – 520 с.

68 Хренов, А. П. Исследование активных вулканов методами дистанционного зондирования / А. П. Хренов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2011. – Т. 8. – № 2. – С. 166–178.

69 Чандра, А. М. Дистанционное зондирование и географические информационные системы / А. М. Чандра, С. К. Гош. – М. : Техносфера, 2008. – 312 с.

70 Чащин, А. Н. Основы обработки спутниковых снимков в QGIS : учебно-методическое пособие / А. Н. Чащин. – Пермь : ИПЦ «ПрокростЪ», 2018. – 47 с.

71 Чернова, И. Ю. Автоматизированный линейный анализ : учебно-методическое пособие / И. Ю. Чернова, И. И. Нугманов, Р. И. Кадыров. – Казань : КФУ, 2012. – 38 с.

72 Шалькевич, Ф. Е. Методы аэрокосмических исследований : курс лекций / Ф. Е. Шалькевич. – Минск : БГУ, 2005. – 161 с.

73 Шовенгердт, Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений / Р. А. Шовенгердт. – М. : Техносфера, 2010. – 560 с.

74 Яковенко, С. В. Комплексный мониторинг литосферных процессов с использованием GPS и лазерной интерферометрии / С. В. Яковенко // Вестник ДВО РАН. – 2010. – № 6. – С. 109–112.

Учебное издание

Гусев Андрей Петрович

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ГЕОДИНАМИКИ

Учебное пособие

Редактор А. А. Банчук
Корректор В. В. Калугина

Подписано в печать 23.06.2022. Формат 60x84 1/16.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 5,35. Уч.-изд. л. 5,85.

Тираж 15 экз. Заказ 320.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования

«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017.

Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013.

Ул. Советская, 104, 246028, Гомель.

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

РЕПОЗИТОРИЙ ГГУ ИМЕНИ Ф. СКОРИНЫ

А. П. ГУСЕВ

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ ГЕОДИНАМИКИ



Гомель
2022