



ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

teach-in
ЛЕКЦИИ УЧЕНЫХ МГУ

ГЕОЛОГИЯ ДЛЯ ШКОЛЬНИКОВ

ГЕОЛФАК МГУ

КОНСПЕКТ ПОДГОТОВЛЕН
СТУДЕНТАМИ, НЕ ПРОХОДИЛ
ПРОФ. РЕДАКТУРУ И МОЖЕТ
СОДЕРЖАТЬ ОШИБКИ.
СЛЕДИТЕ ЗА ОБНОВЛЕНИЯМИ
НА [VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).

ЕСЛИ ВЫ ОБНАРУЖИЛИ
ОШИБКИ ИЛИ ОПЕЧАТКИ,
ТО СООБЩИТЕ ОБ ЭТОМ,
НАПИСАВ СООБЩЕСТВУ
[VK.COM/TEACHINMSU](https://vk.com/teachinmsu).



БЛАГОДАРИМ ЗА ПОДГОТОВКУ КОНСПЕКТА
СТУДЕНТКУ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА МГУ
ГИРЕНКО ЕЛЕНУ ЮРЬЕВНУ



Содержание

Лекция 1. Структура геологического факультета МГУ	5
1.1. Структура геологического факультета МГУ	5
1.2. Кафедра динамической геологии	6
Лекция 2. Минералы	22
2.1. Разновидности кварца	22
2.2. Кристаллическая структура	26
2.3. Образование кварца	29
2.4. Применение кварца	38
Лекция 3. Геоархеология: как геологи помогают археологам	44
3.1. Греческий город Фанагория	44
3.2. Дистанционные методы, используемые для геоархеологии	46
3.3. Уникальные находки	50
Лекция 4. Магматические и метаморфические горные породы	60
4.1. Группы горных пород	60
4.2. Состав горных пород	62
4.3. Магматические породы	63
4.4. Метаморфические породы	72
Лекция 5. Жизнь кристаллов	78
5.1. Кристаллография	78
5.2. Геологический факультет. Кафедра геохимии	90
Лекция 6. Что такое палеонтология и зачем она нужна	94
6.1. Палеонтология	94
6.2. Направления палеонтологии	99
6.3. Роль палеонтологии в датировании горных пород	102
Лекция 7. Геологические карты: зачем они нужны и как их составляют	104
7.1. Геологическая карта	104
7.2. Историческая справка	105
7.3. Создание геологической карты	111
Лекция 8. Инженерная геология. Часть 1. Грунтоведение	117
8.1. Магматические горные породы	118
8.2. Осадочные горные породы	124
8.3. Задачи грунтоведения	126
Лекция 9. Инженерная геология. Часть 2. Инженерная геодинамика	127

9.1. Эндогенные процессы	127
9.2. Экзогенные процессы.....	132
Лекция 10. Планета Земля и ее удивительный магнетизм.....	138
10.1. Магнитное поле Земли	138
10.2. Палеомагнитология	142
Лекция 11. Магия подземных вод.....	148
11.1. Классификация подземных вод.....	149
11.2. Строение, структура и состав воды (H ₂ O).....	150
11.3. Подземные воды как источник питьевого водоснабжения.....	160

Лекция 1. Структура геологического факультета МГУ

Геология (от «гео» и «логия») – комплекс наук о составе, строении и истории развития земной коры и Земли. [Большой Энциклопедический словарь]. Предмета «геология» нет в школьной программе. Отдельные части геологии рассматриваются в курсах физики, химии, биологии и географии.

1.1. Структура геологического факультета МГУ

Рассмотрим структуру геологического факультета МГУ (рис. 1.1, 1.2).

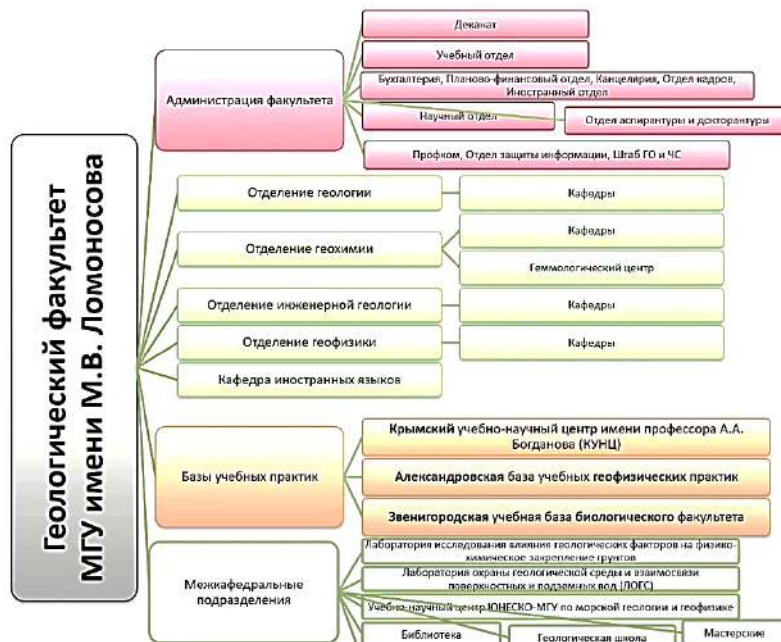


Рис. 1.1. Структура геологического факультета

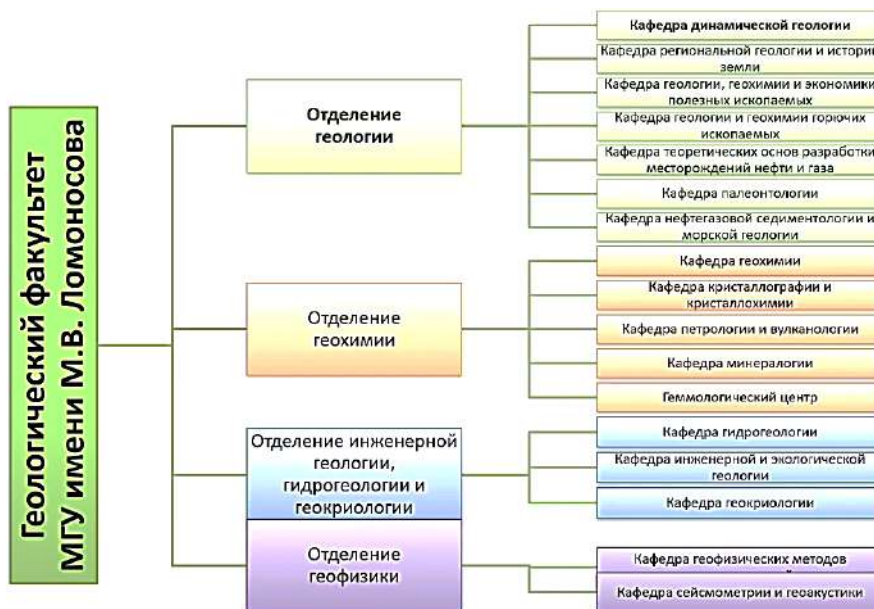


Рис. 1.2. Структура геологического факультета

В общей структуре факультета выделяется 4 отделения:

- геологическое отделение (7 кафедр);
- отделение геохимии (4 кафедры и геммологический центр);
- отделение инженерной геологии (кафедры: инженерной геологии, гидрогеологии, геоэкологии);
- отделение геофизики.

1.2. Кафедра динамической геологии

Коллектив кафедры «Динамическая геология» достаточно обширный: профессора, доценты, научные сотрудники (рис. 1.3). Возглавляет кафедру: профессор Короновский Николай Владимирович.



Рис. 1.3. Коллектив кафедры «Динамическая геология» геологического факультета МГУ

Динамическая геология

Курс «Общая геология» читается преподавателями кафедры «Динамическая геология».

Иван Васильевич и Дмитрий Иванович Мушкетовы (рис. 1.4, 1.5) в 1920 г. издали учебники «Физическая геология» (2 тома). Они попытались показать взаимосвязь наук, в частности, с такими разделами физики, как статика, кинематика, динамика, оптика, электромагнетизм т.д. В тот момент, физика являлась основополагающей наукой для научного сообщества. В рамках динамической геологии происходит изучение тех сил, которые прилагаются к различным геологическим объектам (любого масштаба). Силы приводят к изменению горных пород.

Дина – единица измерения силы (в СГС).

Таким образом, динамическая геология занимается изучением всех сил, которые влияют на Землю, как планету, начиная от масштабного уровня кристалла и заканчивая масштабным уровнем всей планеты, а иногда и Вселенной.



Рис. 1.4. Мушкетов И.В.



Рис. 1.5. Мушкетов Д.И.

Специализация

Направления специализации:

- Научная (что написано в интернете):
 - Теоретическая и региональная тектоника (строение Земли и отдельных ее регионов);
 - Геодинамика (рассмотрение глобальных сил, воздействующих на Землю целиком);
 - Тектонофизика (смесь физики и геологии в применении к геологическим объектам);
 - Неотектоника и сейсмотектоника (изучение новейших и современных движений земной коры, землетрясений и закономерностей их возникновения);
 - Геоморфология (наука о рельефе);
 - Космическая геология;
 - История и методология геологических наук.
- Практическая (чему учат студентов):
 - Структурная геология (размещение МПИ);
 - Неотектоника (геологические катастрофы);
 - Геоморфология (инженерно-геологические изыскания).
- По диплому: «Геологическая съёмка, поиски и разведки месторождений полезных ископаемых», что является научной и практической составляющей обучения на кафедре «Динамической геологии».

Лаборатории кафедры

На кафедре динамической геологии взаимодействуют следующие лаборатории:

- Петромагнитная лаборатория;
- Тектонофизики и геотектоники им. В.В. Белоусова;
- Моделирования геодинамических процессов;
- Геологических исследований космическими методами;
- Исследования геокатастроф;
- Истории и методологии геологических наук;
- Прикладных методов геодинамических исследований.

Петромагнитная лаборатория

Петромагнитная лаборатория в настоящее время является одной из ведущих лабораторий. В лаборатории изучается магнитное поле Земли прошедших эпох. В частности, при исследовании вектора остаточной намагниченности (рис. 1.6) изучаются вектор магнитного наклонения (вертикальный) и вектор магнитного склонения (горизонтальный) – в сумме эти два вектора дают общий вектор.

Любая порода, возникшая на Земле, содержит в себе соответствующие минералы, которые могут намагничиваться, и сохраняет эту намагниченность на протяжении практически всего существования. Понимание соотношения северного магнитного полюса в прошлом и его положения в настоящее время, понимание направлений на северный магнитный полюс на разных блоках земной коры для определенных участков времени, помогает говорить о положении блоков Земной коры в те или иные периоды времени (рис. 1.7).

Интересной является проблема исследования океанов: объект исследования находится глубоко на дне и изучить его без магнитных исследований – невозможно.

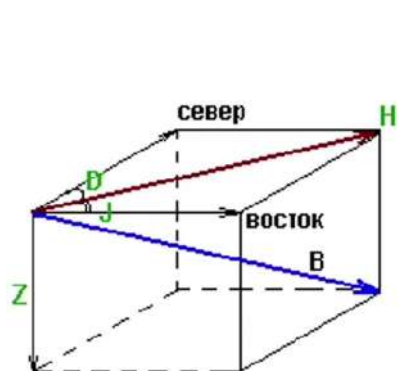


Рис. 1.6. Вектор
остаточной
намагниченности

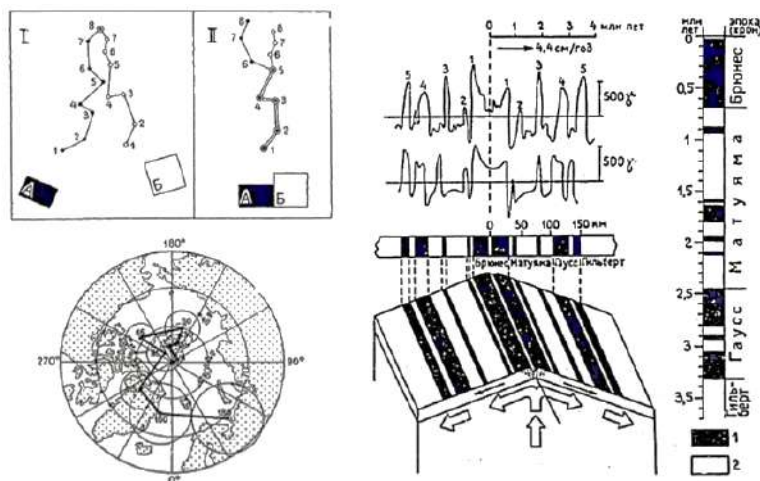


Рис. 1.7. Исследования положения северного
магнитного полюса и направлений на северный
магнитный полюс

Условные обозначения к рисунку 1.6:

B – вектор напряженности,

H – величина напряженности геомагнитного поля,
 I – наклонение,
 D – склонение.

Петромагнитная лаборатория оснащена большим количеством современных датчиков и приборов. Результатом палеомагнитных исследований, например, может быть карта (рис. 1.8) с положением Восточно-Европейской и Сибирской древних платформ.

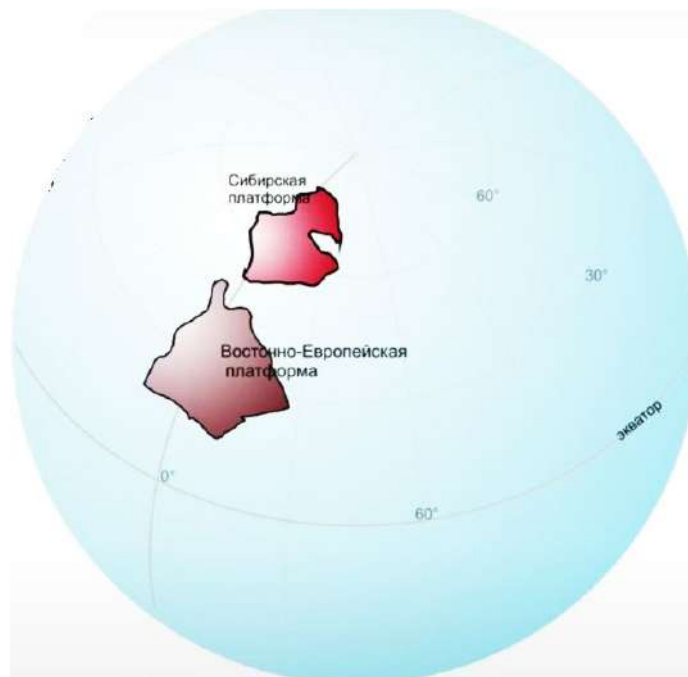


Рис. 1.8. Восстановление положения Восточно-европейской и Сибирской древних платформ. Красной областью выделено положение Сибирской платформы, рассчитанное исходя из траппового полюса, полученного в данной работе. Коричневой областью выделено положение Восточно-Европейской платформы (Веселовский Р.В., диссертация)

Лаборатория моделирования геодинамических процессов

Как известно, с развитием компьютерной техники и способов визуализации различного рода данных, стали активно использоваться математические модели. В частности, например анализ данных *GPS*, которые представляют собой векторное поле (рис. 1.10, 1.11). Для этого необходимо картографическая визуализация данных. Кроме того, математические модели могут охватывать целые блоки земной коры, как например, модель континентальной коллизии (рис. 1.9). Модель была рассчитана для Памирского сегмента Альпийского пояса – крупнейшие области максимального утолщения, развития деформации. Все модели рассчитываются и обрабатываются математически.

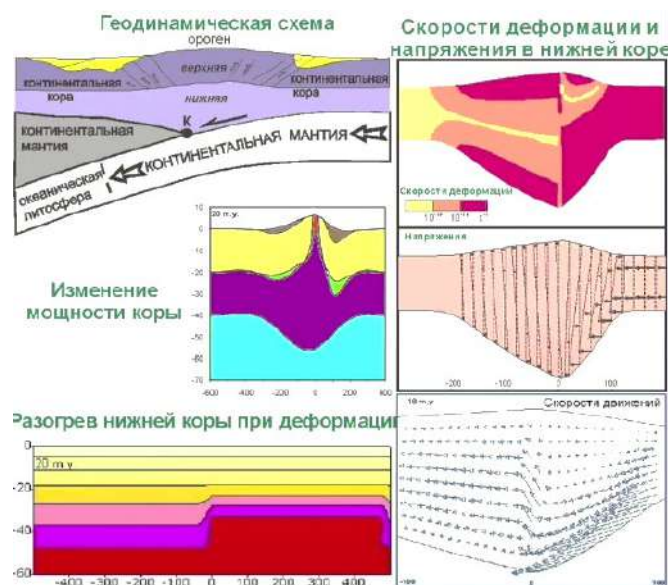


Рис. 1.9. Модель континентальной коллизии

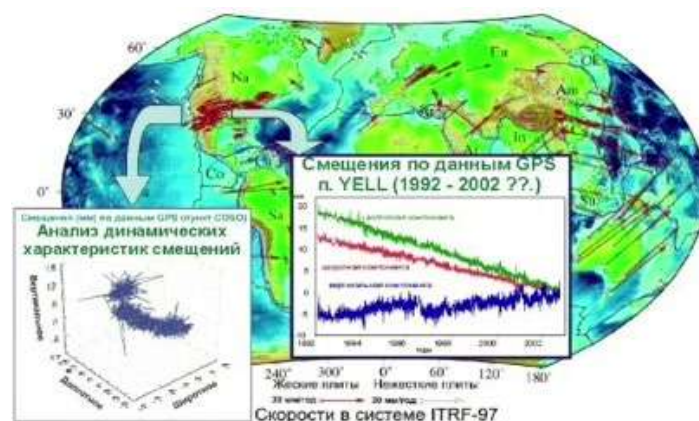


Рис. 1.10. Геодинамический анализ данных GPS

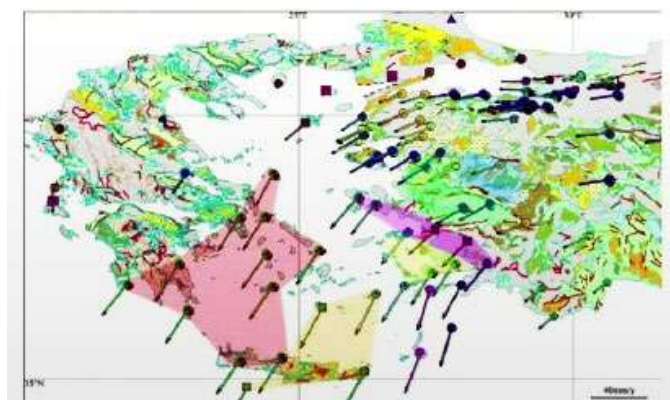


Рис. 1.11. Выделение блоков земной коры по данным GPS

До настоящего момента не существует ни одной скважины, пробуренной глубже, чем 12 км. Самая глубокая скважина – Кольская сверхглубокая, ее глубина достигает 12 262 м от поверхности земли.

Модель распределения напряжений и деформаций в литосфере (рис. 1.12) показывает области, в которых литосфера подвержена сжатию (механизмы возникновения землетрясений, рельефообразование).

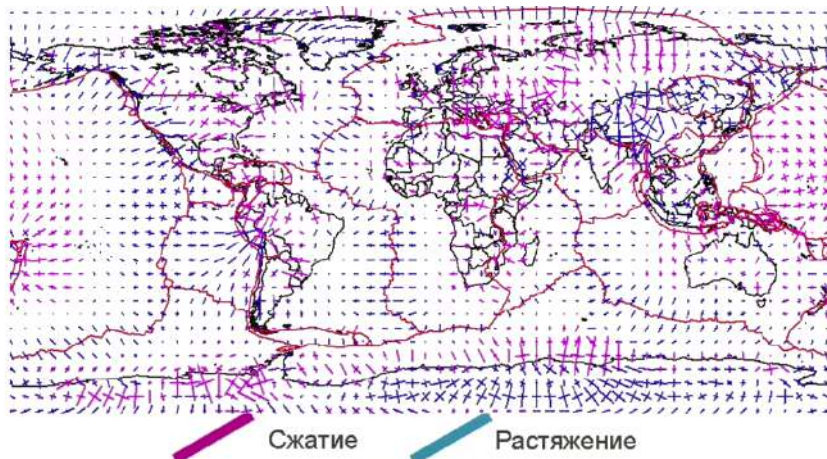


Рис. 1.12. Модель распределения напряжений и деформаций в литосфере

Самоподобные (фрактальные) характеристики сейсмичности и разломной сети

Фрактальность – наиболее востребованный из математических терминов (рис. 1.14).

Основные учебные курсы призваны внедрить в сознание студентов-геологов необходимость и полезность применения математических методов при решении геологических задач.

При этом мы руководствуемся соображением, что «целью расчетов является не число, а понимание».

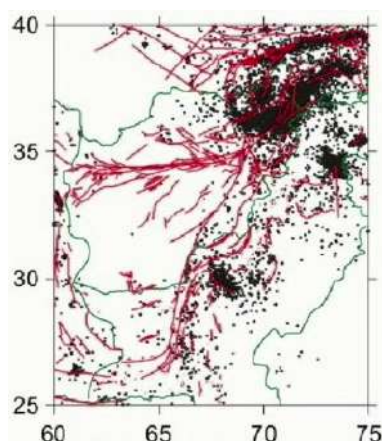


Рис. 1.13. Речная сеть

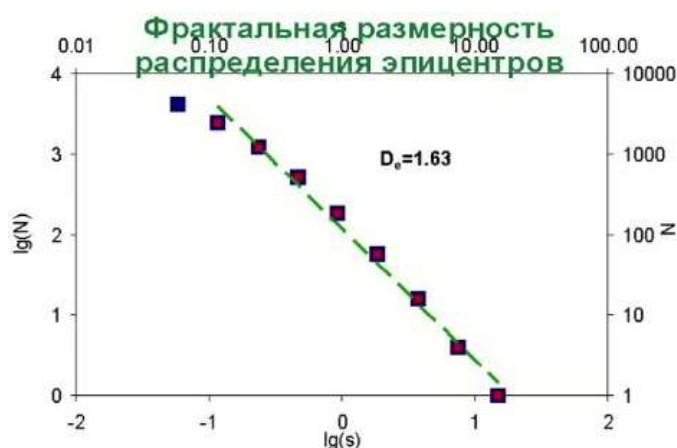


Рис. 1.14. Фрактальная размерность распределения эпицентров

Методы компьютерного моделирования – это новое знание, чего не было еще 30 лет назад (рис. 1.15, 1.16).

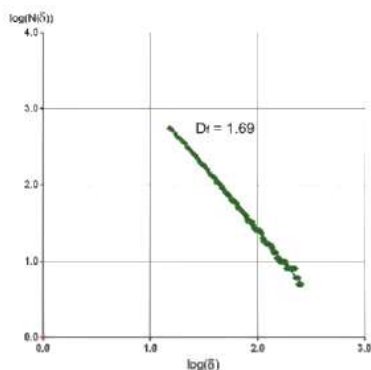


Рис. 1.15. Фрактальная размерность системы разломов

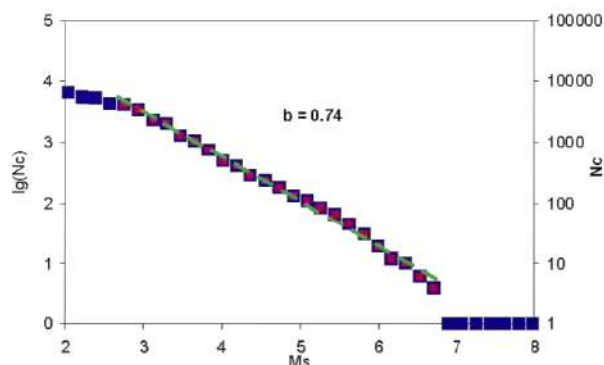


Рис. 1.16. Закон Гутенберга-Рихтера

Расчеты на суперкомпьютере «Ломоносов»

На суперкомпьютере «Ломоносов» были рассчитаны эффективные вязкости и плотности (рис. 1.17).

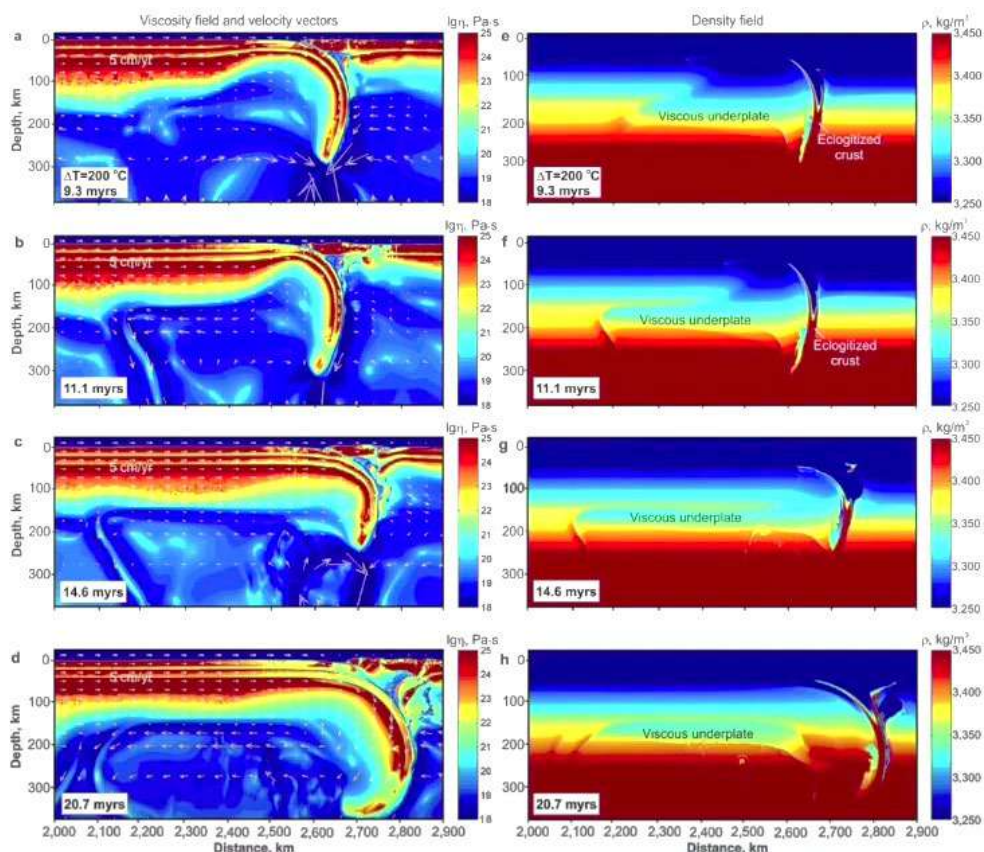


Рис. 1.17. Эволюция эффективной вязкости (левый столбец) и плотности (правый столбец), рассчитанные для эталонной модели при повышенной потенциальной

температуре мантии $T = 1500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($LT = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Стрелки в левом столбце показывают эволюцию поля скоростей (Перчук, А.Л., Геля Т.В., Захаров В.С., *Building cratonic keels in Precambrian plate tectonics. Nature 586, 395-401*)

Лаборатория исследования геокатастроф

Сайт лаборатории: geodisaster.ru

Согласно карте неотектоники Центральной России (рис. 1.18) выделяются ослабленные зоны, которые являются сложными для строительства (оползневые опасности, просачивание газов и др.).

Любая геокатастрофа оставляет следы в рельефе. \

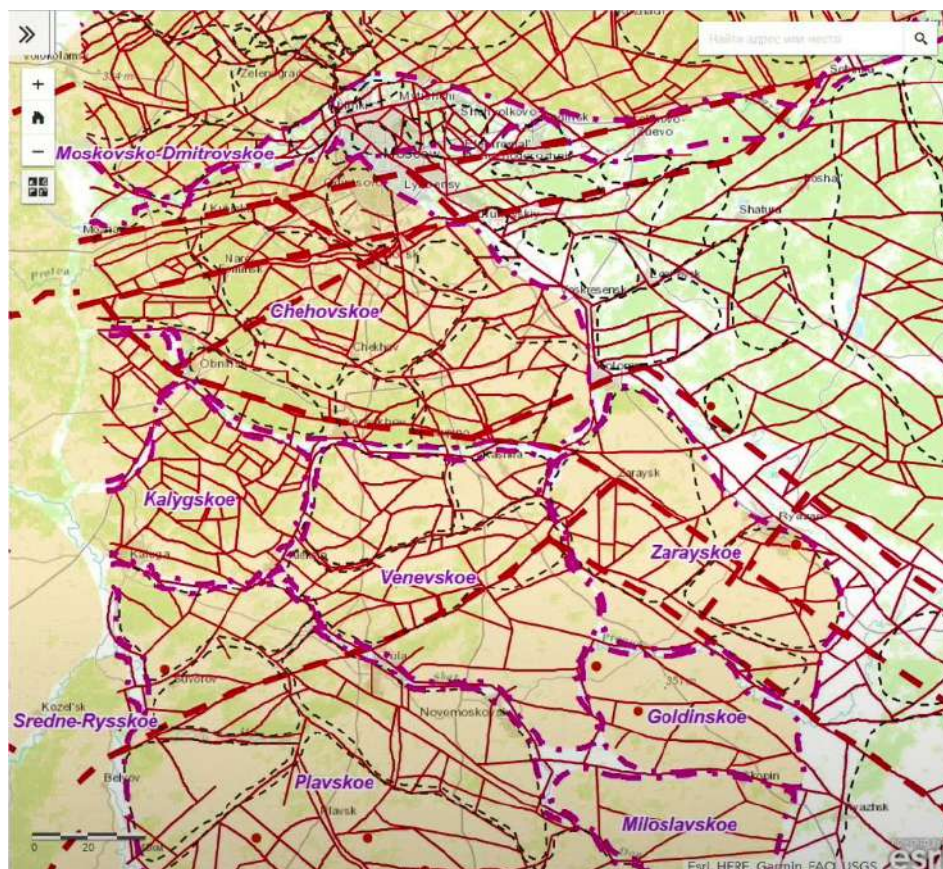
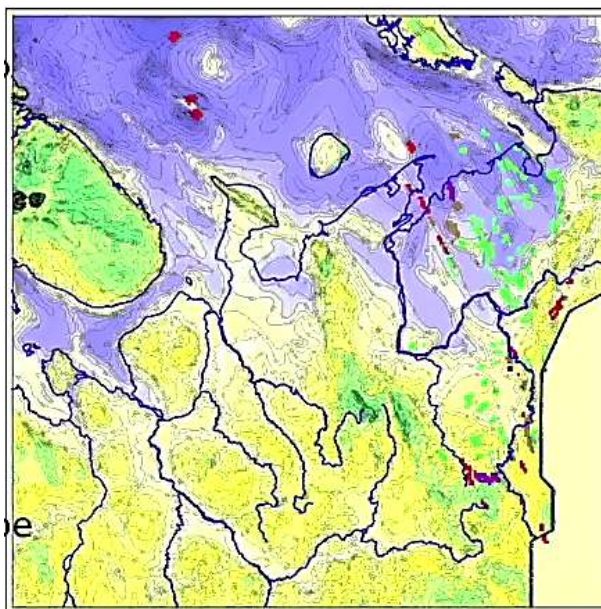


Рис. 1.18. Фрагмент интерактивной карты неотектоники Центральной России

В дисциплине «Неотектоника и катастрофические процессы» обучают:

- определять степень геодинамического риска для конкретного промышленного объекта;
- рассчитывать морфометрические параметры рельефа;
- выбирать материалы космического зондирования для решения задач новейшей геодинамики;
- проводить анализ новейшей геодинамики с помощью

- аэрокосмических методов;
- использовать специальное программное обеспечение для анализа материалов дистанционного зондирования Земли (рис. 1.19);
- делать прогноз нефтегазоносности по результатам дешифрирования космических материалов с использованием геоинформационных систем (ГИС) и картографических БД.



Условные обозначения:

- 0.02 — - амплитуды неотектонических движений
- участки на которых известны месторождения
- - газовые
 - - нефтяные
 - - нефте-газовые
 - - нефте-газо-конденсатные

Рис. 1.19. Карта исследования неотектонических движений

История и методология геологических наук

Геология – традиционная, исторически сложившаяся наука. Возникновение геологического образования в России стоит относить к кафедре геогнозии, созданной в конце 19 века А.П. Павловым.

Алексей Петрович Павлов (1854-1929) (рис. 1.20) – хранитель геологического кабинета. Обстоятельства сложились так, что что уже в 1884 году после защиты магистерской диссертации А.П. Павлов получил звание приват-доцента и возглавил кафедру геогнозии, которой руководил до 1929 года.

В 1953 г. из кафедры динамической геологии выделилась самостоятельная кафедра гидрогеологии и инженерной геологии, которую оставил за собой О.К. Ланге (рис. 1.21).

С этого момента в 1953 г. заведующим кафедрой динамической геологии стал профессор Георгий Петрович Горшков (1909-1984), который руководил кафедрой до 1984 г.

В 1953 г. по инициативе члена-корреспондента АН СССР, профессора кафедры В.В. Белоусова (рис. 1.22) была организована Лаборатория тектонофизики, впоследствии (1970) переименованная в «Лаборатория тектонофизики и геотектоники».



Рис. 1.20. Павлов А.П.



Рис. 1.21. Ланге О.К.

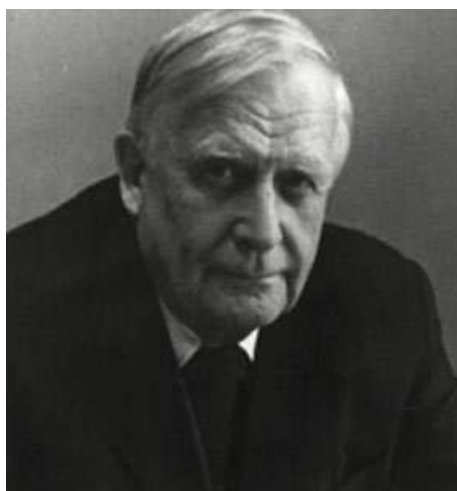


Рис. 1.22. Белоусов В.В.

Из динамической геологии были выделены кафедры гидрогеологии, инженерной геологии, геокриологии (мерзлотоведения).

Лаборатория геологических исследований космическими методами

Лаборатория позволяет по наблюдениям из космоса делать выводы о размещении полезных ископаемых, катастрофических процессах.

На рисунках 1.23 и 1.24 приведены космических снимок Москвы и схема дешифрирования разрывных нарушений фундамента Московского региона с

выделением некоторых закономерностей. Часто к зонам глубинных разрывов приурочены карстовые проявления. Например, на улице Большая Дмитровка наблюдались проседания грунта, которые связаны не только с карстом, но и с техническими вопросами.

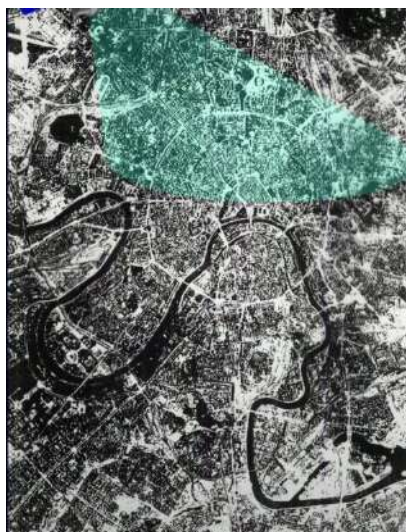


Рис. 1.23. Космический снимок Москвы

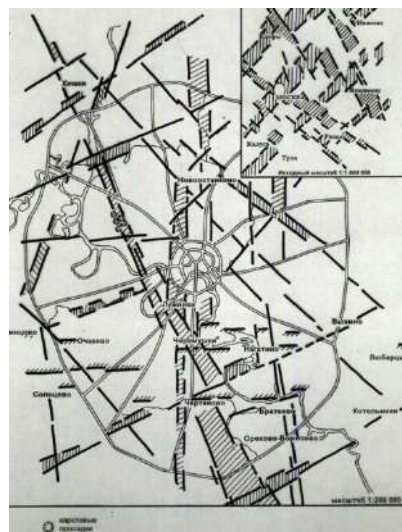


Рис. 1.24. Схема дешифрирования
разрывных нарушений фундамента
Москвы

Газлийская узловая структура

Населенный пункт Газли – крупнейшее газовое месторождение в Узбекистане (рис. 1.25). После начала добычи газа произошли два крупнейших землетрясения магнитудой 4 балла. Поселок был два раза полностью разрушен. При дешифрировании разрывных нарушений было выяснено, что структура находится в узле трех крупных разрывных нарушений (рис. 1.26). В момент откачивания газа возникли неустойчивые условия, при которые земная кора начала движение.



Рис. 1.25. Очаг землетрясений в 1976 и 1984
гг (по В.И. Макарову и В.Г. Трифонову)

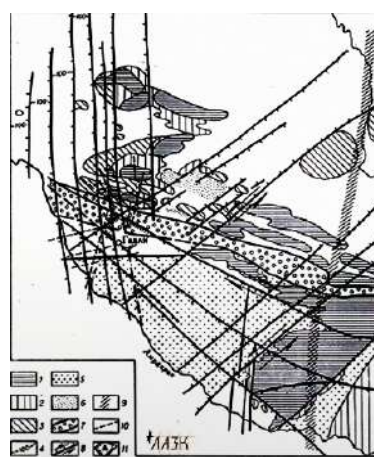


Рис. 1.26. Схема дешифрирования
разрывных нарушений фундамента

*Узбекистана на территории н.п.
Газли*

Линеаментный анализ и сейсмодислокации Ловозерского массива

В результате работы были выделены две зоны потенциальных очагов землетрясений (рис. 1.27).

Выделенные зоны (рис. 1.28) дополнительно подтверждаются локализованными на их территории очагами землетрясений с магнитудами более 2.

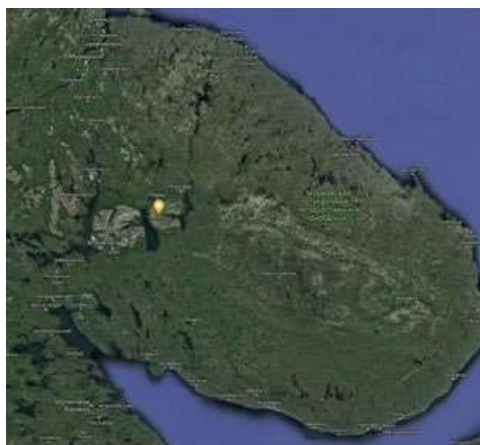


Рис. 1.27. Космический снимок

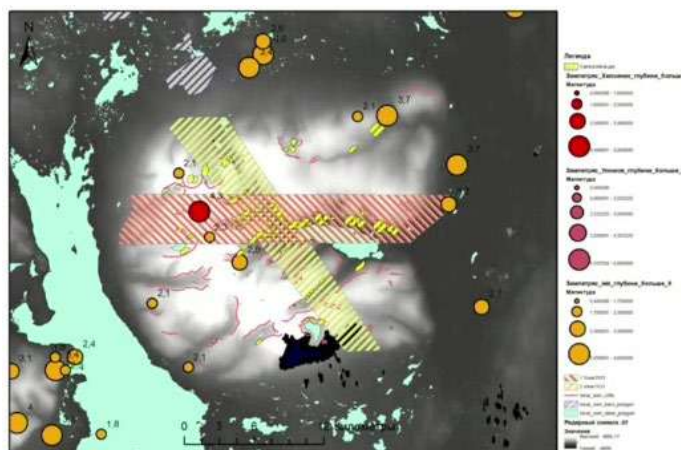


Рис. 1.28. Выделение зон в блоковых структурах по результатам исследования

Лаборатория тектонофизики и геотектоники им. В.В. Белоусова

Изучение механизма формирования трансформных разломов СОХ:

- физическое моделирование процесса сдвигания по трансформным разломам (рис. 1.29, 1.30);
- модель валиковой конвекции А.Г. Кирдяшкина.



*Рис. 1.29. Фотография студентов в лаборатории тектонофизики (2004 г.).
Исследование сдвиговых моделей*



Рис. 1.30. Изучение структур, возникающих при инверсии плотностей

Лабораторий тектонофизики в России очень мало.

На рисунке 1.31 показана песчаная модель чехла при сдвиге фундамента – моделирование месторождения углеводородов Западной Сибири. В ходе эксперимента возникли валообразные поднятия с трещинами.

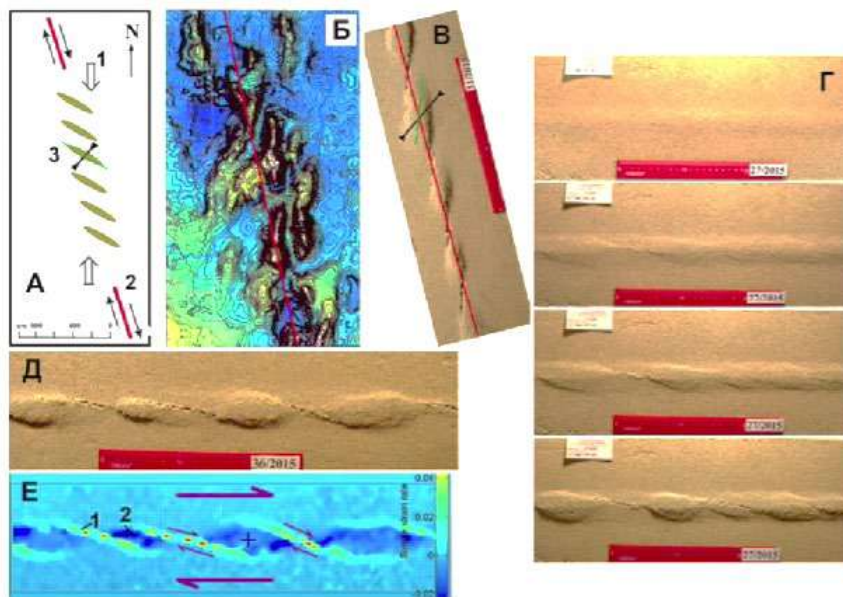


Рис. 1.31. Эшелонированные валообразные поднятия типа push-up в природе и эксперименте

Тектонофизические опыты проводятся и на базе музеев землеведения (лаборатория Е.П. Дубинина). В опытах хорошо показан момент формирования новообразования океанской коры и откалывания микроконтинента – моделирование условий возникновения и развития Синайского полуострова (рис. 1.32, 1.33, 1.34).

Тектонофизика занимается изучением развития не только отдельных структур, но и более глобальных (крупных отдельных блоков земной коры).

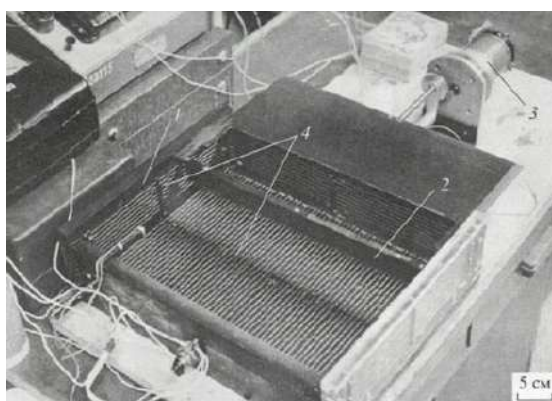


Рис. 1.32. Экспериментальная установка для моделирования процесса деформации литосферы 1 – текстолитовая ванна, 2 –

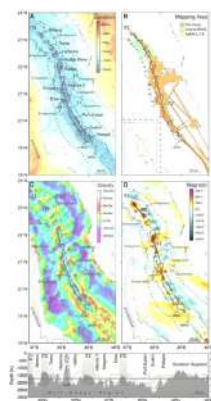


Рис. 1.33. Моделирование возникновения и развития Синайского полуострова

*поршень, 3 – электромеханический привод, 4 –
нагреватели*

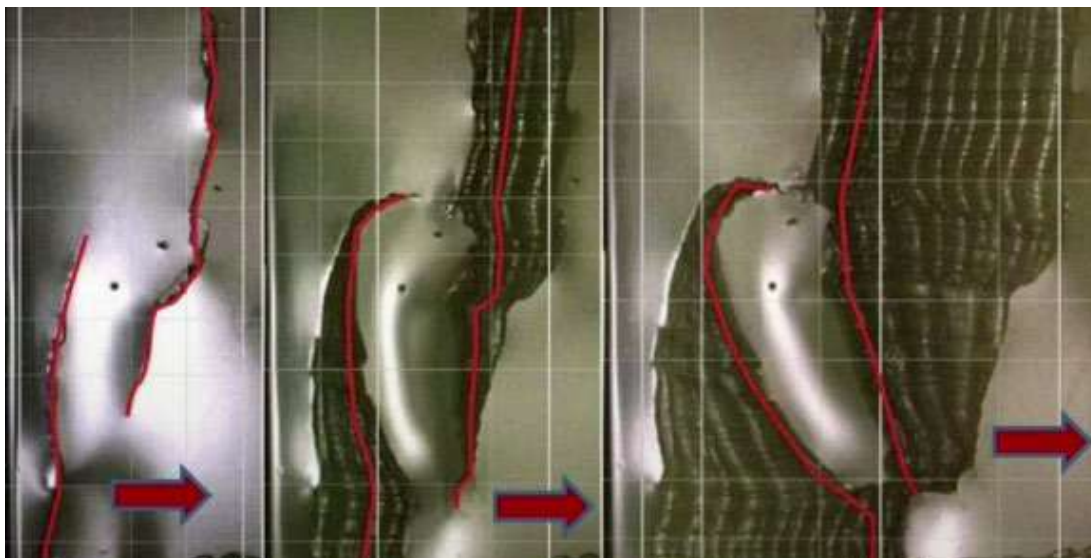


Рис. 1.34. Фотографии экспериментов с микроблоком, по форме и местоположению, еще далеким от Синайского полуострова. Стрелкой показано направление растяжения. Эксперимент 1537/с'/43/3/1/80/24,5/23

Лаборатория прикладных методов геодинамических исследований

Лаборатория организована на кафедре в 2018 году в рамках программы «Зеленый свет» ректората МГУ имени М.В. Ломоносова.

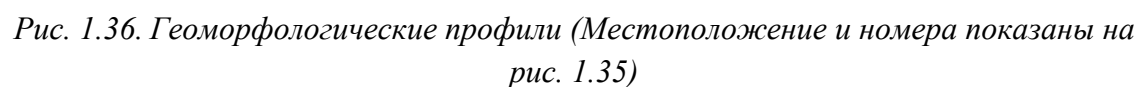
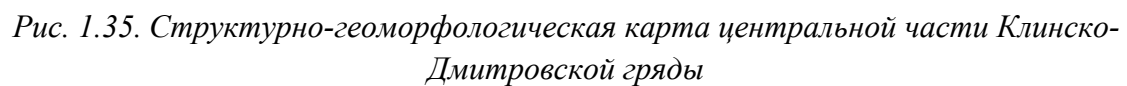
Основная цель сотрудников лаборатории заключается в освоении, совершенствовании и применении современных методов геотектоники, геофизики, петрологии, геохронологии и геохимии для решения широкого спектра фундаментальных и прикладных задач.

Рабочие группы на кафедре

Помимо официально действующих лабораторий, на кафедре собираются временные рабочие группы для выполнения каких-либо проектов. Они объединяют сотрудников разных лабораторий.

Примеры: изучение объектов Крымской практики, интерпретация сейсмических данных для поисков МПИ, неотектоника Московской синеклизы и др.

На рисунке 1.35 показан промежуточный результат исследования неотектоники Московской синеклизы – Московско-Дмитровское поднятие с выделением ослабленных зон. Геологические профили (рис. 1.36) через Московско-Дмитровское поднятие даст понимание вертикальных амплитудных движений на новейшем этапе (с олигоцена по настоящее время, около 40 млн лет).



Кем и где работают выпускники кафедры.

- Академия наук (большинство выпускников-москвичей, рис. 1.37):
 - ГИН РАН;
 - Институт Океанологии;
 - ИФЗ РАН;

- Полнос-Золото;
- Лукойл;
- Роснефть;
- Газпром.



Рис. 1.37. Коллектив кафедры «Динамическая геология»

Лекция 2. Минералы

В настоящее время известно около 6 тысяч видов минералов. Около 100 новых минералов открывается каждый год.

Структура лекции:

1. Разновидности кварца, типы и виды окраски.
2. Кристаллическая структура, состав и примеси.
3. Геологические процессы, в которых образуется кварц, и месторождения кварца.
4. Применение и использование кварца.

2.1. Разновидности кварца

Горный хрусталь

Горный хрусталь – типичная разновидность кварца. В древности считалось, что горный хрусталь (рис. 2.1, 2.2) – это кусочки льда, образованные в горах и затвердевшие под толщей горных пород. На самом деле, горный хрусталь не имеет никакого отношения ко льду, это лишь прозрачная бесцветная разновидность кварца.



Рис. 2.1. Горный хрусталь



Рис. 2.2. Горный хрусталь

На рисунках 2.3, 2.4 показаны длиннопризматические кристаллы кварца.



Рис. 2.3. Длиннопризматический кристалл кварца



Рис. 2.4. Длиннопризматические кристаллы кварца

Раухтопаз

Раухтопаз (рис. 2.5) – это дымчатый кварц, не имеющий отношения к другому минералу – топазу. Топаз – это ювелирный камень, а раухтопаз – светлоокрашенная, сероватая разновидность кварца. Иногда у этого присутствует окраска чайного цвета (желтый оттенок).

Морион

Иногда окраска кварца практически черная. Такой вид кварца называется *морионом* (рис. 2.6).



Рис. 2.5. Дымчатый кварц, раухтопаз



Рис. 2.6. Морион

Цитрин

Желтый кварц называется *цитрином*. Цитрин – прозрачный минерал (рис. 2.7, 2.8).



Рис. 2.7. Цитрин



Рис. 2.8. Цитрин

Аметист

Аметист (рис. 2.9-2.11) – прозрачный кварц, имеющий фиолетовую окраску. Среди аметистов встречаются как длиннопризматические кристаллы, так и короткопризматические. Кроме того, существуют кристаллы аметиста, у которого выросли только верхние части («головки»), а граней призмы – практически нет.

Аметрин

Аметрин – зональный (секториальный) кварц, состоящий из аметиста и цитрина (рис. 2.12, 2.13). У этой разновидности кварца некоторые сектора роста окрашены в фиолетовый цвет, а другие – в желтый цвет.



Рис. 2.9. Длиннопризматические кристаллы аметиста



Рис. 2.10. Короткопризматический аметист



Рис. 2.11. Кристаллы аметиста



Рис. 2.12. Аметрин

Розовый кварц

Розовый кварц (рис. 2.14, 2.15) получил свое название по характерному розовому цвету и отдельного названия у него нет. В отличие от других разновидностей кварца, розовый кварц практически никогда не образует хорошо ограненных кристаллов, так как он образуется в глубинных пегматитах на глубине 15-20 км, где не образуется полостей свободного роста.



Рис. 2.13. Аметрин (зональная окраска кварца)



Рис. 2.14. Розовый кварц

Красный и оранжевый кварц

Все вышеупомянутые разновидности кварца имеют собственную окраску, в то время как красный и оранжевый кварц имеет *аллохроматическую* (несобственную) окраску (рис. 2.16, 2.17). Собственный кварц – бесцветный, а красная окраска связана с тем, что внутри бесцветных кристаллов кварца находится множество мелких пластинчатых включений другого минерала – гематита (рис. 2.18, 2.19).



Рис. 2.15. Розовый кварц



Рис. 2.16. Красный и оранжевый кварц



Рис. 2.17. Аллохроматическая окраска кварца



Рис. 2.18. Включения гематита внутри кристалла кварца

Празем

Празем – зеленый кварц, имеющий аллохроматическую окраску (рис. 2.20).



Рис. 2.19. Включения гематита внутри кристалла кварца



Рис. 2.20. Празем

Красный кварц и зеленый кварц (празем) встречаются на Дальнегорских месторождениях в Приморском крае (Дальний Восток).

Окраска празема связана с включениями длинно игольчатого кристалла зеленого актинолита. Иногда игольчатые включения довольно крупные (например, включения рутила) – их называют «Волосы Венеры», а такой называется кварц «Волосатик» (рис. 2.21, 2.22).



Рис. 2.21. Игольчатые включения зеленого актинолита в кварце



Рис. 2.22. Кварц «Волосатик». Рутил в кварце. Николай-Шор, Приполярный Урал

Включения рутила бывают более желтого или более красного цвета (рис. 2.23, 2.24).



Рис. 2.23. Кварц «Волосатик», рутил в кварце. Николай-Шор, Приполярный Урал



Рис. 2.24. Кварц «Волосатик», рутил в кварце. Скалистое, Приполярный Урал

2.2. Кристаллическая структура

В составе кварца находится атом кремния и два атома кислорода. Каждый атом кремния находится в тетраэдре и соединен с четырьмя атомами кислорода (красные шарики на рисунках 2.25, 2.26), а каждый атом кислорода соединен с двумя атомами кремния. Кристаллическая структура кварца состоит из подобных кремнекислородных тетраэдров, которые объединяются в бесконечные кристаллические решетки с

чередованием тетраэдров. В результате образуются хорошо ограненные кристаллы кварца.



Рис. 2.25. Кристаллическая структура кварца

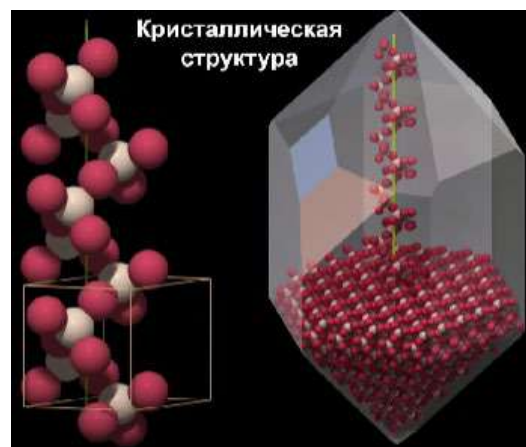
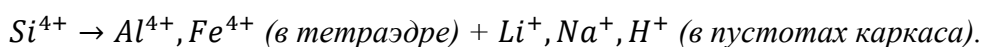
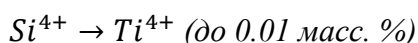
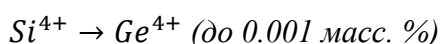


Рис. 2.26. Кристаллическая структура кварца

Химический состав

Состав кварца близок теоретической формуле SiO_2 . Кроме этого, в структуру кварца могут входить и другие химические элементы – *изоморфные замещения*:



Характерны вакансии $\text{Si}(\text{V}_{\text{Si}})$ и $\text{O}(\text{V}_{\text{O}})$

Изоморфизм – процесс, при котором часть атомов одного сорта (атомы кремния) замещаются на атомы другого сорта: например, на атомы германия Ge или титана Ti . Для того, чтобы одни атомы замещались другими, необходимо выполнение нескольких условий:

1. Сохранение электронейтральности структуры.
2. Атомы, замещающие друг друга, должны иметь близкие химические свойства.
3. Радиусы ионов, замещающих друг друга атомов, должны быть примерно равны.

Атомы германия или титана отличаются по размеру от атомов кремния, поэтому они только в небольшом количестве могут входить в структуру кварца. Атомы алюминия или железа (трехвалентные) могут замещать четырехвалентный кремний. При этом, для сохранения электронейтральности структуры необходимы атомы-компенсаторы, в данном случае это могут быть одновалентные катионы лития, натрия или водорода, которые располагаются в пустотах кремнекислородного каркаса.

В результате изоморфного замещения могут образовываться электронно-дырочные центры окраски, с которыми связано образование разновидностей кварца.

Причина окраски аметиста (рис. 2.27)– присутствие Fe^{3+} и возникновение электронно-дырочных центров окраски как дефектов структуры, образовавшихся под воздействием радиоактивного излучения.

Причина окраски цитрина/серого дымчатого кварца (рис. 2.28) – электронно-дырочные центры, возникающие при замене Si^{4+} на Al^{3+} и/или Fe^{3+} с компенсацией валентности ионами Li^{+} и H^{+} .



Рис. 2.27. Аметист



Рис. 2.28. Цитрин

Электронно-дырочные центры окраски

Рассмотрим кристаллическую решетку кварца (рис. 2.29): атомы кремния в тетраэдрах, часть из которых замещена на атомы алюминия; между тетраэдрами находятся ионы-компенсаторы (водород); на внешней орбитали кислорода находится два электрона. При воздействии γ -кванта при радиоактивном облучении, один электрон может вылететь с внешней электронной орбиты и образуется электронно-дырочный центр, который может захватывать фотон при видимом спектре излучения и вызывать окраску в кристаллах.

В музее института синтеза минерального сырья (ВНИИСИМС) находятся образцы синтетического кварца (рис. 2.30), частично облученного γ -квантами. При этом часть кристалла была закрыта свинцовой пластиной и не подвергалась излучению. Облученная часть окрасилась в темно-фиолетовый цвет.

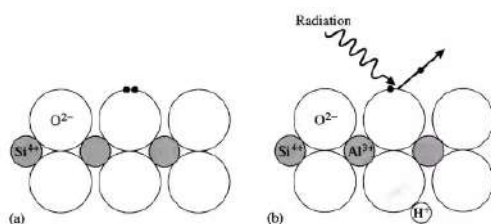


Рис. 2.29. Схема образования электронно-дырочных центров в кварце



Рис. 2.30. Кристалл синтетического кварца, частично облученный γ -квантами

Таким образом для того, чтобы кристаллы были окрашены необходимы:

1. Изоморфные замещения (вхождение других элементов-примесей)
2. Радиоактивное излучение (радиоактивное излучение может быть как сильным в течение короткого промежутка времени, так и слабым, но в течение длительного промежутка времени).

Степень радиоактивности гранита (рис. 2.31, 2.32) можно косвенно оценить по густоте окраски кварца в его составе. Гранит состоит из полевых шпатов, кварца и слюд. Большинство гранитов обладает радиоактивным фоном. Даже у самых радиоактивных гранитов невысокая радиоактивность и не опасна для жизни и здоровья человека. Те граниты, в которых кварц практически черный, обладают повышенным радиоактивным фоном (около 30-40 микрорентген/час).



Рис. 2.31. Гранит с менее высоким радиоактивным фоном



Рис. 2.32. Гранит с более высоким радиоактивным фоном

2.3. Образование кварца

Наиболее красивые формы кристаллов образуются в кварцевых хрусталеносных жилах (рис. 2.33, 2.34).

В горных породах (чаще всего, в метаморфических) образуются трещины, по которым начинают циркулировать гидротермальные водные растворы. В этих гидротермальных растворах при температурах 150-200 градусов может растворяться кремнезем, карбонаты и другие химические элементы. Раствор переносит эти частицы, которые начинают откладываться в определенных местах – так происходит образование жил и хрусталеносных гнезд.



Рис. 2.33. Кварцевые хрусталеносные жилы

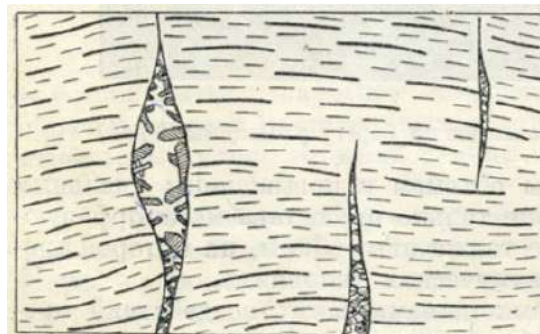


Рис. 2.34. Кварцевые хрусталеносные жилы

Жилы альпийского типа

Впервые жилы такого типа были открыты в Альпах. В 17-19 веках в швейцарских и французских Альпах (рис. 2.36) были добыты красивые кристаллы кварца.

Альпийские жилы (рис. 2.35) выполняют отдельные трещины и системы трещин гидроразрыва среди метаморфических пород.

Минеральное выполнение альпийских жил обычно соответствует минеральному составу окружающих метаморфических пород.



Рис. 2.35. Жила альпийского типа

Рис. 2.36. Вид на месторождение Пуйва

Месторождения Приполярного Урала показаны на карте (рис. 2.37).

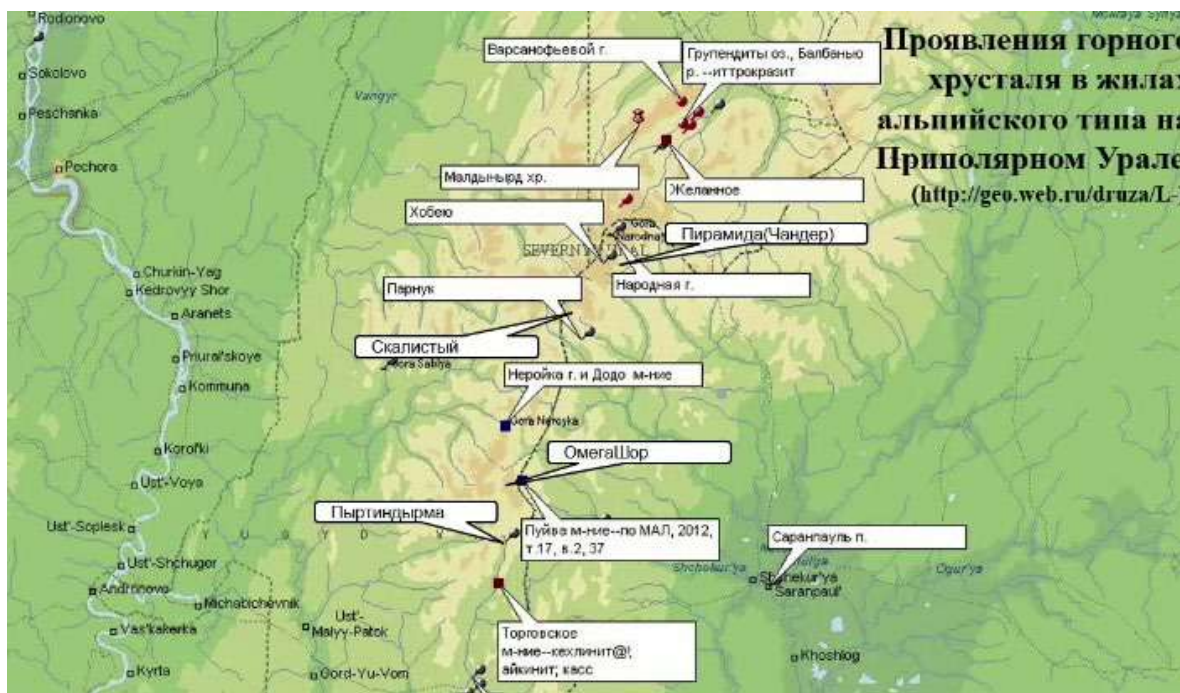


Рис. 2.37. Проявления горного хрусталя в жилах альпийского типа на Приполярном Урале

Месторождения Приполярного Урала (рис. 2.37):

- Неройка (Додо);
- Пуйва;
- Мегашара;
- Желанное;
- Скалистый;
- Парнук;
- Пирамида;
- (Чандер);
- Пыртиндырма.

Южный Урал:

- Астафьевское.

Месторождение Додо

Самое знаменитое месторождение кварца на Урале – *месторождение Додо*. В нем расположено множество штолен – горизонтальных горных выработок для добычи.

Схема месторождения Додо (рис. 2.38): *розовым цветом* показаны вмещающие породы (сланцы и гнейсы), почти *вертикальные линии* – буровые скважины; *голубым цветом* показаны кварцевые жилы и хрусталеносные гнезда.

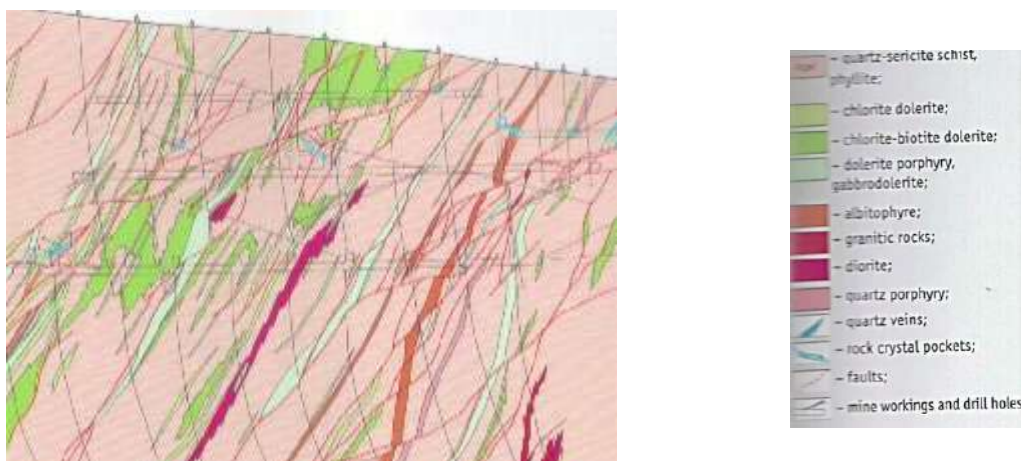


Рис. 2.38. Разрез рудной зоны месторождения Додо (Скобель, 1989)

На рисунках 2.39, 2.40 показаны схематические рисунки хрусталеносных гнезд: розовым цветом показаны вмещающие породы (сланцы и гнейсы). Часто хрусталеносные гнезда могут быть заполнены более поздними минералами, в данном случае – зеленым мелкозернистым хлоритом.

На рисунке 2.41 показаны две фотографии: одна с месторождения Додо на Приполярном Урале, на которой видны отвалы штолен, а вторая – с австрийских Альп с крупным кристаллом кварца (рис. 2.42).

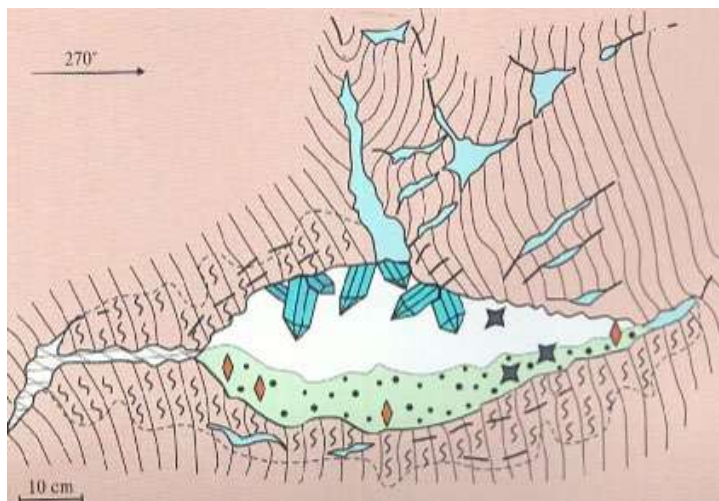


Рис. 2.39. Кварцевое хрусталеносное гнездо

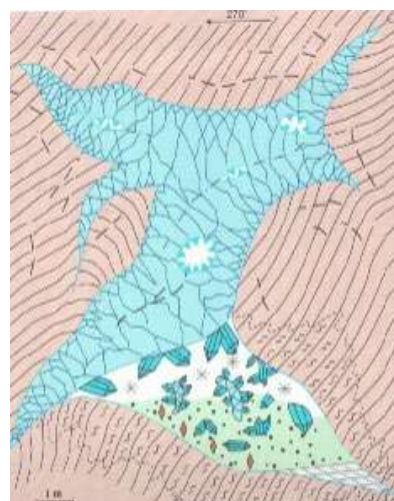


Рис. 2.40. Кварцевое хрусталеносное гнездо



Рис. 2.41. Фотографии с месторождения Додо, Приполярный Урал (слева) и австрийских Альп (справа)



Рис. 2.42. Кристаллы кварца

Месторождение Перекатное

Месторождение Перекатное расположено в 60 км к западу от города Алдан в районе Чомполинской излучины реки Алдан (рис. 2.43-2.48).

Перекатное в Южной Якутии является вторым по значимости (после Астафьевского) хрусталеносным (пьезокварцевым) объектом бывшего СССР.

Месторождение горного хрусталя Перекатное открыто в 1961 году Б.М. Дудаковым. Оно разведывалось до 1983 года и отработывалось до начала 1990-х годов. Сейчас месторождение не разрабатывается и полностью заброшено. Штольни заледенели.



Рис. 2.43. Месторождение Перекатное



Рис. 2.44. Штольни на месторождении Перекатное, Южная Якутия



Рис. 2.45. Штольни на месторождении Перекатное, Южная Якутия



Рис. 2.46. Хрусталеносное кварцевое гнездо на месторождении Перекатное, Южная Якутия



Рис. 2.47. Хрусталеносное кварцевое гнездо на месторождении Перекатное, Южная Якутия



Рис. 2.48. Кристаллы кварца на месторождении Перекатное, Южная Якутия

Все кварцевые кристаллы покрыты коричневой пленкой/налетом. После его чистки можно получить чистые бесцветные прозрачные кристаллы горного хрусталя (рис. 2.49, 2.50, 2.51).

Происхождение жил отлично от происхождения жил альпийского типа. Источником гидротермальных растворов служили гранитные интрузивы, которые при остывании выделяли флюиды (в том числе и воду). Растворы уходили на большие расстояния от интрузивных массивов с образованием кварцевых жил. Однако, мне мнению ученых образование жил все-таки схоже с жилами альпийского типа: выщелачивание вещества из более ранних кварцевых жил.



Рис. 2.49. Кристаллы горного хрусталя, полученные на выработке месторождения Перекатное, Южная Якутия



Рис. 2.50. Хрусталеносное гнездо

Кварц в гранитных пегматитах

По концепции, предложенной в 1920-х гг. академиком А.Е. Ферсманом, пегматиты (рис. 2.52) образуются из остаточного силикатного расплава, богатого соединениями редких и редкоземельных элементов и летучими веществами-минерализаторами (соединения хлора, фтора, бора).



Рис. 2.51. Хрусталеносное гнездо с кристаллами кварца (горного



Рис. 2.52. Пегматитовая жила, Хетоламбино, Северная Карелия

*хрусталя), месторождение
Перекальное, Южная Якутия*

Образование гранитных пегматитов

Гранит состоит из кварца, полевого шпата и слюд – это расплав, богатый кремнеземом, алюминием, калием, натрием, железом и флюидами. При образовании полевого шпата и кварца, летучие компоненты не входят в состав минералов, и они остаются в остаточном расплаве (рис. 2.53).

Условные обозначения к рисунку 2.53:

- 1 – мелкозернистый гранит;*
- 2 – крупнозернистый гранит;*
- 3,4 – «письменный гранит»;*
- 5 – зона микроклина;*
- 6 – зона кварца;*
- 7 – зона альбита;*
- 8 – минералы Li и Be;*
- 9 – мусковит-кварц-альбитовая зона;*
- 10 – вмещающие породы.*

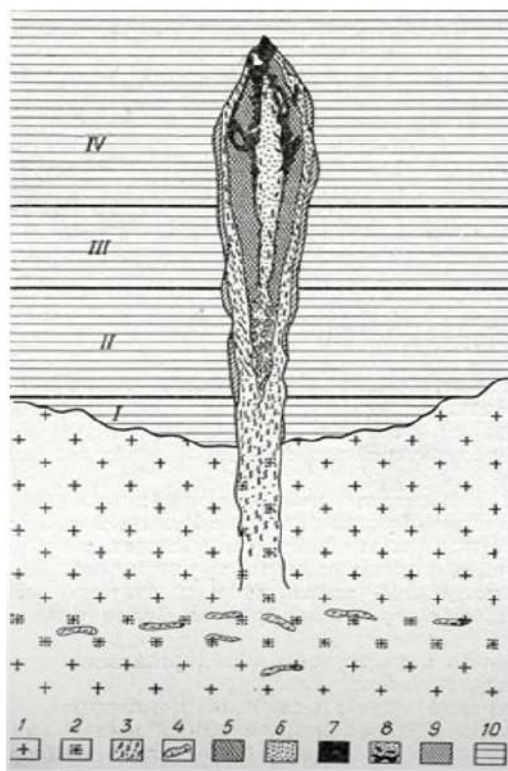


Рис. 2.53. Зональное строение пегматитов

Гранитный пегматит по составу близок к гранитам (рис. 2.54). В нем образуются кристаллоносные полости, заполненные кристаллами. На рисунке 2.54, коричневые – кристаллы полевого шпата, черные – кристаллы кварца, розовые – кристаллы турмалина, голубые кристаллы – топаза.

На рисунке 2.55 показан пример гранитных пегматитов Казахстана: письменный гранит с полостями полевого шпата, дымчатого кварца и мориона.



Рис. 2.54. Кварц-микроклин-топаз-турмалиновое гнездо в пегматите Малхан. Забайкалье



Рис. 2.55. Миароловая полость с кристаллами кварца и полевых шпатов в пегматите. Месторождение Ортау, Карагандинская область, Казахстан

Из крупных полостей можно добыть кристаллы мориона с полевым шпатом (рис. 2.56, 2.57).



Рис. 2.56. Морион с микроклином



Рис. 2.57. Морион на микроклине

Хрусталеносные жилы и жилы альпийского типа разрабатывают для добычи кварца, а пегматиты разрабатываются для добычи других минералов, в первую очередь ювелирного сырья (топазы, аквамарины).

На месторождении Малхан в Забайкалье находятся крупные пегматитовые жилы, которые разрабатываются для добычи розовых турмалином (рис. 2.60, 2.61) и топазов. Вместе с ними встречается и кварц.



Рис. 2.58. Кристаллоносные гранитные пегматиты. Морион с бериллом - аквамагрином



Рис. 2.59. Карьер на пегматитовой жиле Моховая, Малханское пегматитовое поле, Забайкалье



Рис. 2.60. Кристаллы полихромного турмалина с дымчатым кварцем размером до 2,1 см, лепидолитом и белым альбитом



Рис. 2.61. Кристалл дымчатого кварца на розовом эльбаите (6,5x4,5 см) с наростишим лепидолитом

Кыштымское месторождение гранулированного кварца

Единственное месторождение в России, где в настоящее время происходит добыча кварца – это *Кыштымское месторождение* на Южном Урале в Челябинской области. На месторождении добываются не крупные красивые кристаллы кварца, а белый мелкозернистый гранулированный кварц.

Месторождение активно разрабатывалось в 20 веке (карьеры, штольни, рис. 2.62, 2.63). Позже разработка прекратилась. Месторождение было расконсервировано уже в начале 21 века.

В настоящее время добытый на месторождении кварц на 98% уходит на экспорт, так как он используется в промышленности для высоких технологий, которые в России не применяются.



Рис. 2.62. Гранулированный кварц, рассеченный карбонатитовым прожилком



Рис. 2.63. Штольни на Кыштымском месторождении гранулированного кварца. Челябинская область, Южный Урал

Кварц может образовываться практически везде, в том числе и в Подмосковье (рис. 2.64-2.67). В некоторых известняковых карьерах могут находиться полости, в которых встречаются кристаллы бесцветного кварца (горного хрусталя), аметистовидного кварца.



Рис. 2.64. Карьер в Подмосковье



Рис. 2.65. Кварц Подмосковья



Рис. 2.66. Жеода кварца



Рис. 2.67. Кварц Подмосковья

2.4. Применение кварца

Применение кварца:

- использование при создании ювелирных украшений (колец, бус, браслетов и т.д.) (рис. 2.68-2.70);
- создание камнерезных изделий (рис. 2.71);
- посуда (рис. 2.72, 2.73).



Рис. 2.68. Ювелирный камень из кварца



Рис. 2.69. Ювелирный камень из кварца



Рис. 2.70. Ювелирное украшение из кварца



Рис. 2.71. Камнерезное изделие из кварца



Рис. 2.72. Чаши, вырезанная из крупного кристалла горного хрусталя



Рис. 2.73. Чаша, вырезанная из крупного кристалла горного хрусталя

Посуда из кварцевого стекла

Из кварцевого сырья делают посуду, которая отличается химической стойкостью и жаропрочностью (рис. 2.74).

Кварцевые тигли

Кварцевые тигли (емкости) для нагрева, высушивания, сжигания, обжига или плавления монокристаллов кремния требуют использования кварцевых концентраторов с высокими требованиями к чистоте (рис. 2.75).

Примеси в материале тигля сильно влияют на качество и анизотропию физических свойств однородных кристаллов.



Рис. 2.74. Посуда из кварцевого стекла



Рис. 2.75. Производство тиглей для «солнечной» энергетики

Кварцевые лампы

Оптическое применение кварца обусловлено его главной особенностью – широтой светопропускания, в том числе в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазоне (рис. 2.76, 2.77).

На основе кварца «варят» однокомпонентное и многокомпонентное стекло для различных применений: оптические системы, телескопы, гироскопы, тепловизоры, микроскопы, объективы.



Рис. 2.76. «Кварцевая лампа»



Рис. 2.77. «Кварцевая лампа»

Кварцевые часы

В кварцевых часах стоит кварцевый генератор с резонатором (рис. 2.78, 2.79, 2.80).



Рис. 2.78. Кварцевые часы



Рис. 2.79. Кварцевые часы

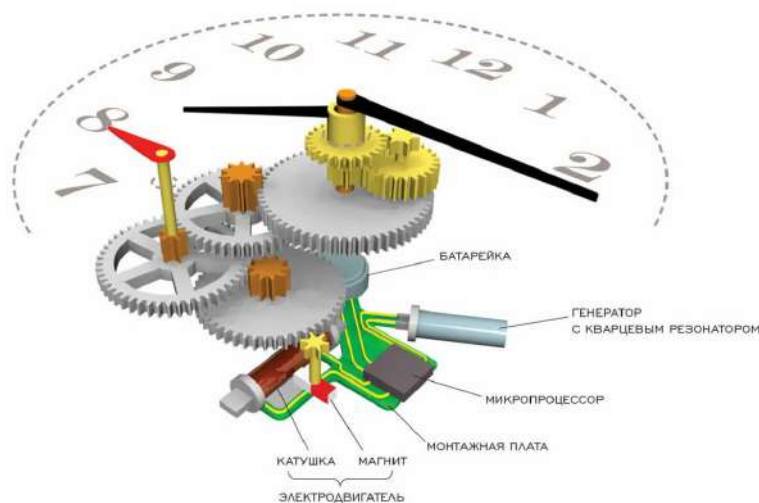


Рис. 2.80. Строение кварцевых часов

В 19 веке братья Кюри обнаружили у кварца необычное свойство: если к кварцу приложить воздействие, то на краткий промежуток времени на поверхности кристалла появляется напряжение (рис. 2.81).

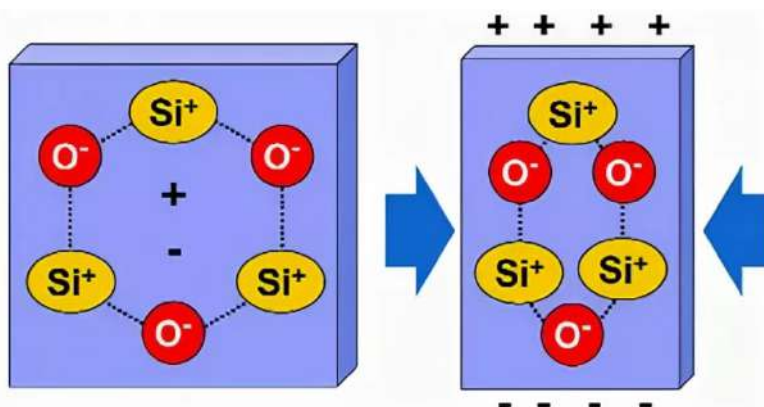


Рис. 2.81. Пьезооптический эффект

Пьезооптический эффект – это эффект, при котором поднесенное к пластине напряжение вызывает колебания самой пластины с определенной частотой (рис. 2.82). Вещества, которые обладают этим свойством называются *пьезоэлектриками*.

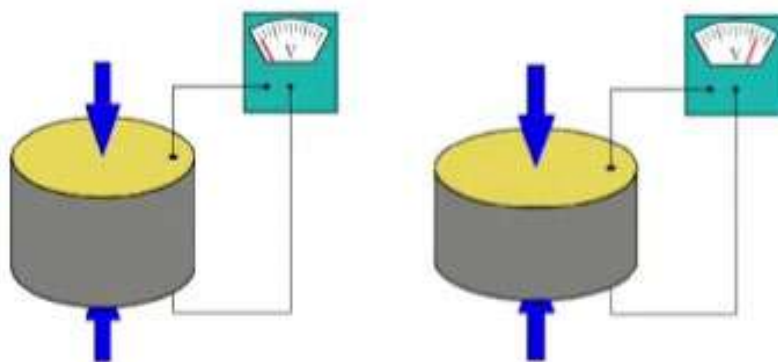


Рис. 2.82. Появление напряжения на кварце при воздействии

Во всех кварцевых часах стоит кварцевый резонатор (рис. 2.83, 2.84) – пластинка кварца, к которой подведены электроды, через которые подается напряжение. Раньше эти пластины вырезали из природного кристалла кварца. Но такие кристаллы должны были быть совершенными:

- с малым количеством примесей,
- без дефектов кристаллической решетки,
- без механических примесей (примесей и включений других минералов).

Таких кристаллов кварца было мало. Впоследствии люди научились выращивать хорошие оптические кристаллы кварца в лабораторных условиях.



Рис. 2.83. Кварцевый резонатор



Рис. 2.84. Кварцевая пластина в резонаторе

Кварцевый резонатор используется не только в часах, но и в кварцевых осцилляторах (рис. 2.85, 2.86).

В середине 20 века кварцевые резонаторы использовали в качестве средства связи Второй мировой войны – радиопередатчика (с кварцевой стабилизацией частоты).

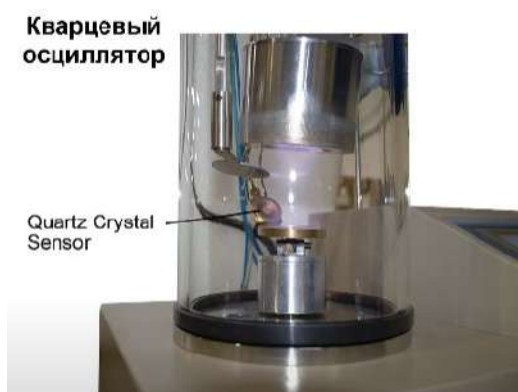


Рис. 2.85. Кварцевый осциллятор

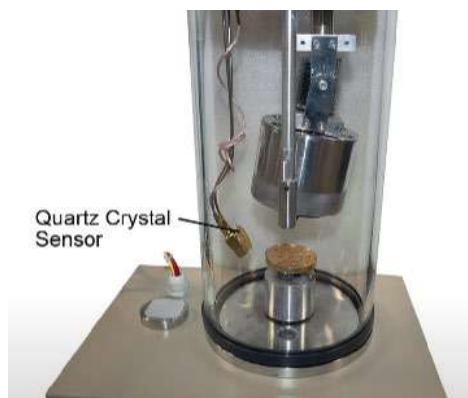


Рис. 2.86. Кварцевый осциллятор

Серийное производство радиостанции «Север» начато в октябре 1941 г. Она предназначалась для оснащения разведывательных подразделений и партизанских отрядов (рис. 2.87-2.90).



Рис. 2.87. Переносная радиостанция
«Север»



Рис. 2.88. Радиопередатчик с двумя
кварцевыми резонаторами



Рис. 2.89. Кварцевый резонатор.
Середина 20 века



Рис. 2.90. Кварцевый резонатор.
Середина 20 века

Лекция 3. Геоархеология: как геологи помогают археологам

Геоархеология включает в себя две науки – геологию и археологию. Археологи занимаются изучением истории остатков древних городов – деятельности человека, его культуры и т.д. Археология включает своеобразный набор методов, которые не всегда помогают получить всеобъемлющие результаты. При необходимости изучить археологические объекты на помощь археологам приходят геологи.

3.1. Греческий город Фанагория

Древнегреческий город Фанагория располагается в Таманском заливе (рис. 3.1) – в месте, где Крымский полуостров граничит с Краснодарским краем. Фанагория была основана выходцами из Греции на южном побережье Таманского залива в середине 1 тысячелетия до н.э. Исторически сложилось, что Фанагория стала большим и цветущим городом, численностью населения в несколько тысяч человек.

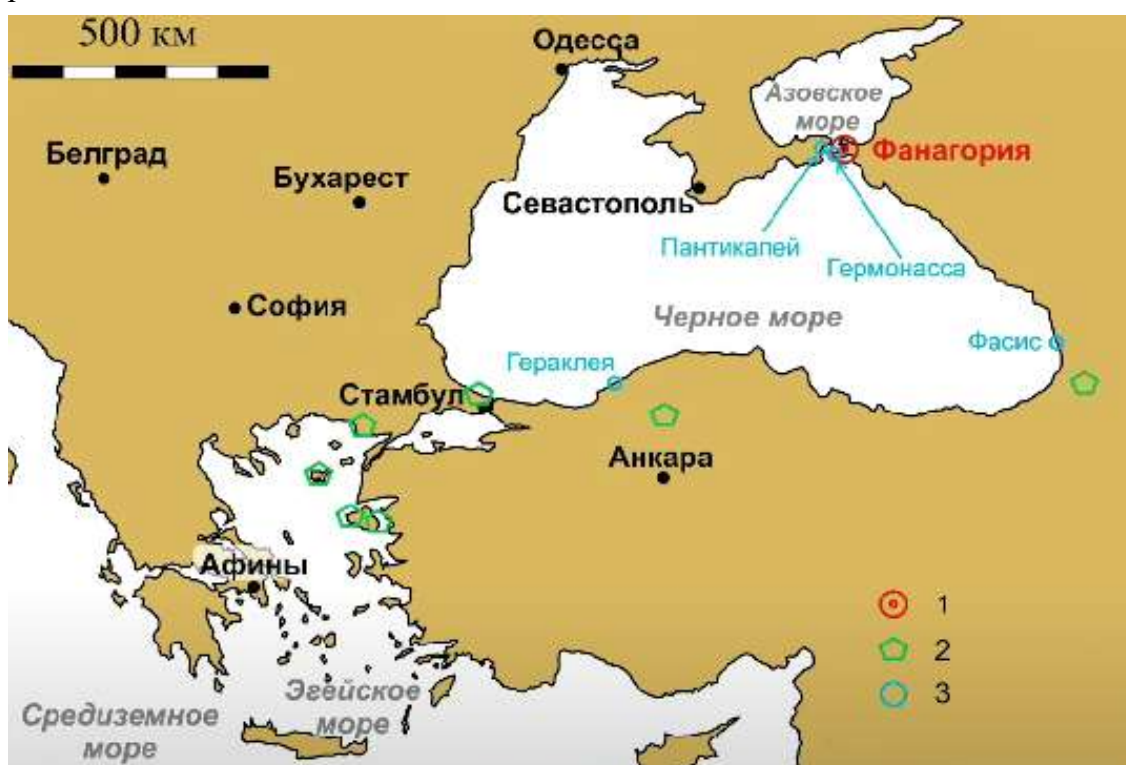


Рис. 3.1. Расположение древнегреческого города Фанагория

На рисунке 3.2 контуром показана современная территория на месте некогда существовавшего города.

В результате повышения уровня Черного моря прибрежная часть Фанагории и ее портовая инфраструктура оказались под водой. Цветной контур: предполагаемые границы города, площадь участка акватории – около 15-40 га.

В прибрежной полосе археологи находят большое количество обломков керамики и камней. На поверхности от города практически ничего не осталось и в современности на этой территории другого города нет.



Рис. 3.2. Таманский полуостров

Старый город окружен большим количеством курганов. На карте (рис. 3.3) красными кружками показаны все известные курганы. Именно большое количество курганов указывает на то, что это был большой и оживленный город.

Археологи ведут изучение Фанагории достаточно давно. Активные раскопки там начались около 100 лет назад и не прекращаются до сих пор.

В процессе современных наземных раскопок было найдено много интересных объектов. Исследования ведутся как в центральной части – Акрополе, так и на месте массовых захоронений (в Некрополе).



Рис. 3.3. Наземные раскопки Фанагории

С середины первого тысячелетия до н.э. уровень Таманского залива менялся и поднимался. Из-за длительного разрушения морем берегового обрыва все затопленные

археологические объекты перекрыты песком и незаметны на поверхности дна (рис. 3.4, 3.5).



Рис. 3.4. Фотография современных наземных раскопов в Фанагории



Рис. 3.5. Берег на территории Таманского залива

3.2. Дистанционные методы, используемые для геоархеологии

Археологам необходимы какие-то дистанционные методы, которые позволят установить перспективные точки, где начинать раскопки. Вести подводные раскопки «наобум» очень непродуктивно и сложно.

Эхолокация

Сонар, гидролокатор, эхолот – устройства, которые работают по принципу эха: фактически, приборы испускают звуковую волну различной длины и ловят «эхо», пришедшее ото дна. Рассчитывая время, за которое пришло эхо, приборы устанавливают расстояние до дна – таким образом, получает модель строения поверхности дна. Все современные крупные суда используют эти механизмы для изучения поверхности дна (на наличие рифов).

Таким образом, эхолокация:

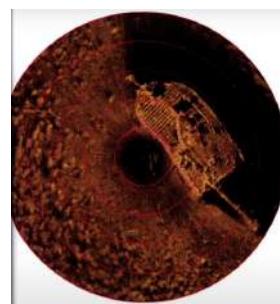
- традиционный способ изучения дна акваторий;
- позволяет получить модель рельефа дна и объектов на поверхности;
- подходит для объектов, расположенных на поверхности дна;
- не подходит для объектов, засыпанных осадками;
- плохо работает, если густые водоросли.

Для изучаемого региона была проведена эхолокация (рис. 3.6). На сонограмме (рис. 3.7) виден затонувший корабль, потопленный во время Великой Отечественной войне и пока еще не полностью засыпленный илом, поэтому хорошо виден на получаемых данных.

Если объекты захоронены под несколькими метрами ила, тогда эхолокаторы не могут обнаружить их. Кроме того, с помощью эхолокации нельзя выделить фундамент. Таким образом, эхолот не очень подходит для целей археологии.



*Рис. 3.6. Прибрежная часть территории
раскопок*



*Рис. 3.7. Сонограмма плавкрана
сделанная сонаром кругового
обзора*

Морская магнитная съемка

Магнитная съемка – один из геофизических методов, которые помогают без горных выработок и раскопок понимать, что находится в толще земли: состав, структуру горных пород, их слоистость/пористость и другие свойства.

Магнитная съемка – способ, основанный на замере интенсивности магнитного поля и создания карты магнитного поля. Магнитные свойства разных материалов сильно отличаются. Так, например, глина, песок, илы – осадки со слабыми магнитными свойствами. На их фоне в картине магнитного поля хорошо видны сильномагнитные объекты – камни, и, керамика, металл.

Съемка может проводиться с судов (лодка) или пешим оператором, в зависимости от глубины (рис. 3.8, 3.9).



*Рис. 3.8. Морская магнитная
съемка*



Рис. 3.9. Морская магнитная съемка

Для создания равномерной сети данных, оператор движается по предварительно запланированным маршрутам.

Результатом является карта магнитного поля (рис. 3.10), на которой цветом показана интенсивность магнитного поля. Изменение цвета происходит плавно: изменение зеленого цвета с плавным переходом в оранжевый и далее в малиновый цвет связано с увеличением мощности осадков. Отдельные яркие пятна на относительно

ровном желтом/зеленом фоне – это аномалии – объекты, отличающиеся по своим свойствам от окружающих их осадков. Эти аномалии являются объектом изучения археологов.

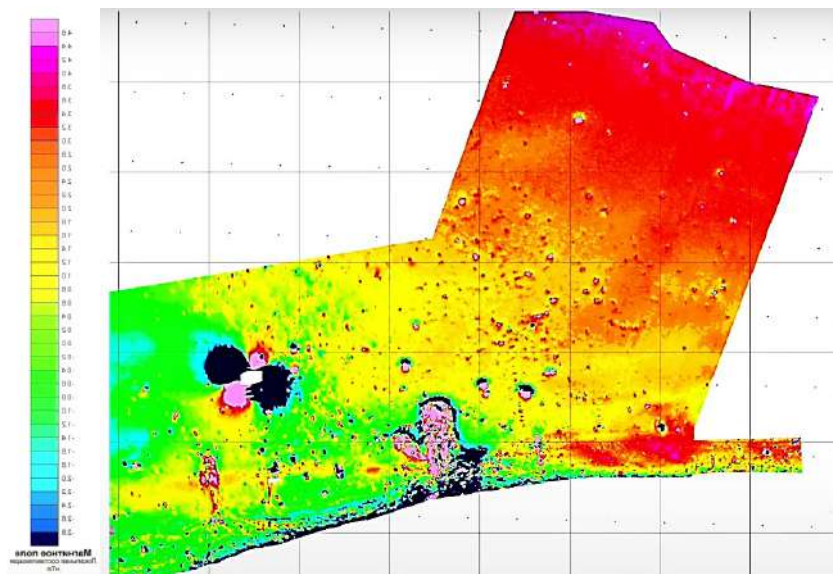


Рис. 3.10. Карта магнитного поля

К сожалению, многие из аномалий создаются железным мусором. Но не весь мусор – современный (рис. 3.11). Фанагория существовала с первого тысячелетия до н.э. практически до 10 века н.э. – т.е. почти полторы тысячи лет в этом месте активно жили люди. Древний мусор обычно представляет собой скопления керамики: обломки керамической посуды, черепицы, амфор, которые попали воду (рис. 3.12).



Рис. 3.11. Железный мусор



Рис. 3.12. Пример локальной магнитной аномалии, образованной скоплением керамики

Кроме керамического мусора, локальные аномалии могут создавать и скопления камней. Пример локальной магнитной аномалии, образованной скоплением темноцветных камней, показан на рисунке 3.13.

На Таманском полуострове практически нет скальных пород. В Тамани достаточно пологие склоны, сложенные песками и глинами, и в отдельных местах небольшие выходы известняков.

В результате заверки и изучения магнитных аномалий было обнаружено много интересных объектов. Около 10 лет назад был обнаружен крупный мраморный пьедестал (рис. 3.14).



Рис. 3.13. Пример локальной магнитной аномалии, образованной скоплением темноцветных камней



*Рис. 3.14. Фанагория-2004.
Подводные исследования. Расчистка
постаменты под статую Савромата
II*

Глубина в акватории не превышает полутора метров (рис. 3.15). Однако без специального снаряжения работать в ней нельзя. Человек может задержать дыхание под водой на 1 – 1,5 минуты. Для того, чтобы вести раскопки, под водой необходимо находиться иногда несколько часов. На рисунке 3.16 показан подводный археолог за работой: в руках он держит специальную трубу, которая предназначена для создания раскопов.



Рис. 3.15. Акватория вблизи Таманского полуострова



Рис. 3.16. Работа под водой

В работе археологи используют специальный прибор – грунтосос (рис. 3.17-3.18) – большой пылесос, который позволяет переместить с места на место большое

количество осадков. Прибор похож по своему действию на обычный пылесос, однако если во втором пыль и грязь скапливается в специальной бачке, то первый устроен таким образом, что большой струей воды засасывается вода и грунт и складировать на другом конце шланга. В результате, за достаточно небольшое время археологам удастся выкопать достаточно большой раскоп.



*Рис. 3.17. В процессе подготовки
грунтососа к работе*



*Рис. 3.18. Подготовка лодки с помпой для
грунтососа*

3.3. Уникальные находки

Чаще всего на поверхности дна археологи обнаруживают различные керамические объекты, которая хорошо сохраняется на протяжении долго отрезка времени. На рисунке 3.19 показан фрагмент чаши: видно, что он покрашен и имеет коричневый бортик.

В припортовой части бывшей Фанагории обнаруживается большое количество костей (чаще всего животных) (рис. 3.20)



*Рис. 3.19. Фрагмент керамической
посуды в осадках*



*Рис. 3.20. Фрагменты костей животных
в подводном раскопе*

Фанагория славится своими уникальными единичными находками, такими как судна. В 63 году до н.э. затонуло военное греческое судно. Длина судна около 15

метров. Обычно греческие порты старались очищать все от мусора, так как иначе порт приходил в негодность. Греки и римляне хорошо следили за своими акваториями и чистили их. Уникальность судна (рис. 3.21) состоит в том, что оно сохранилось.

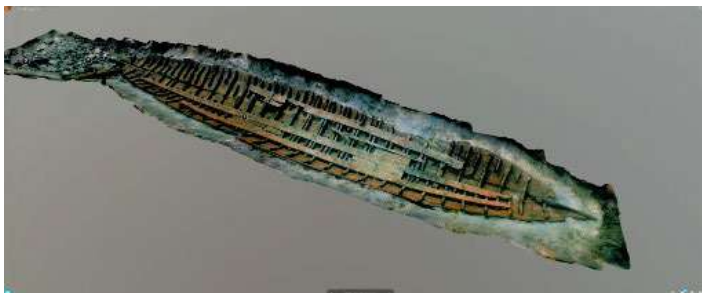


Рис. 3.21. Древнегреческое военное судно, затонувшее в 64 г. до н.э. 3D модель Фанагорийского музея-заповедника



Рис. 3.22. Древнегреческое военное судно, затонувшее в 64 г. до н.э.

Рассмотрим карту магнитных аномалий (рис. 3.23): зеленым цветом показана современная береговая линия. Две большие аномалии расположены перпендикулярно побережью.

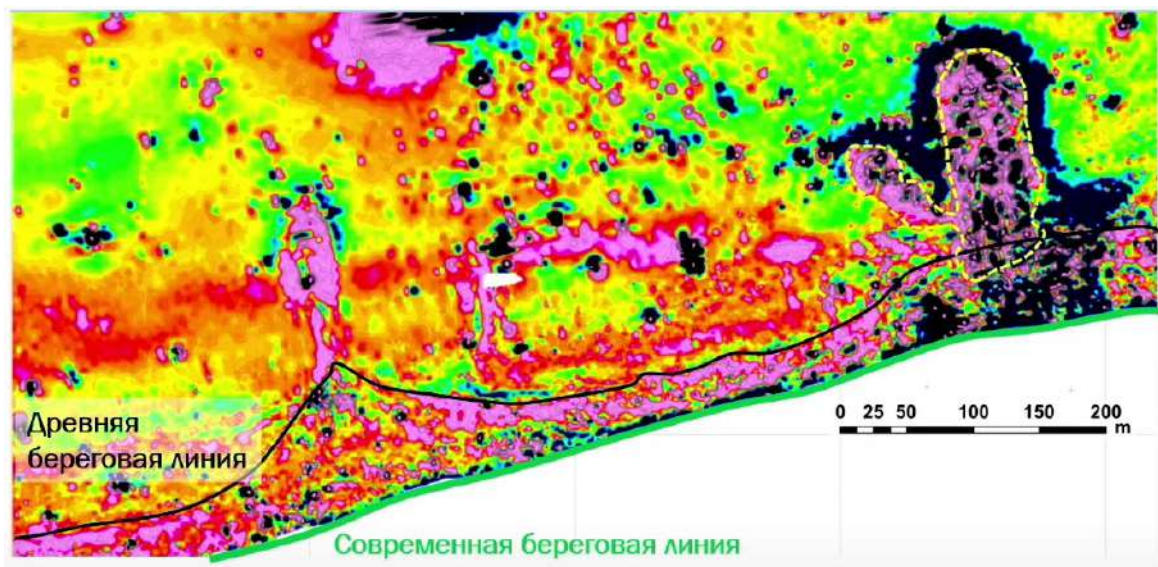


Рис. 3.23. Карта магнитных аномалий на территории Таманского полуострова

Эти две аномалии оказались двумя большими каменными насыпями, сложенными валунами (рис. 3.24, 3.25). Это говорит о том, что сооружение создано искусственно: валуны аккуратно уложены один на другой, а все интервалы забиты более маленькими камнями.



Рис. 3.24. Валунь каркаса размером до 40-45 см. Более мелкие камни заполнения размером 10-15 см

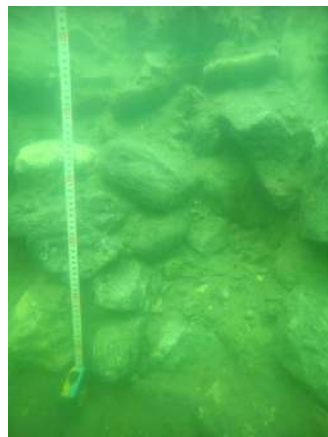


Рис. 3.25. Фрагмент стенки шурфа

Для четкого понимания, какими горными породами сложена насыпь, геологи провели изучение каменного материала: около 2000 образцов (рис. 3.26, 3.27). Для статистики были зафиксированы:

- форма обломков (степень окатанности);
- размер;
- состав.



Рис. 3.26. Процесс изучения каменного материала



Рис. 3.27. Исследование мелких камней

Поверхность причала

Археологи выполняли следующие задачи:

- оценка высоты причала относительно уровня моря;

- замеры глубин в один момент;
- поправки на нагонные изменения уровня моря.

Оказалось, во всех шурфах кровля находится на одной поверхности (рис. 3.28): перепады высот в пределах 20 см, что является размером примерно одного булыжника. Таким образом, насыпь была практически ровно, что является признаком того, что сооружение создано искусственно.

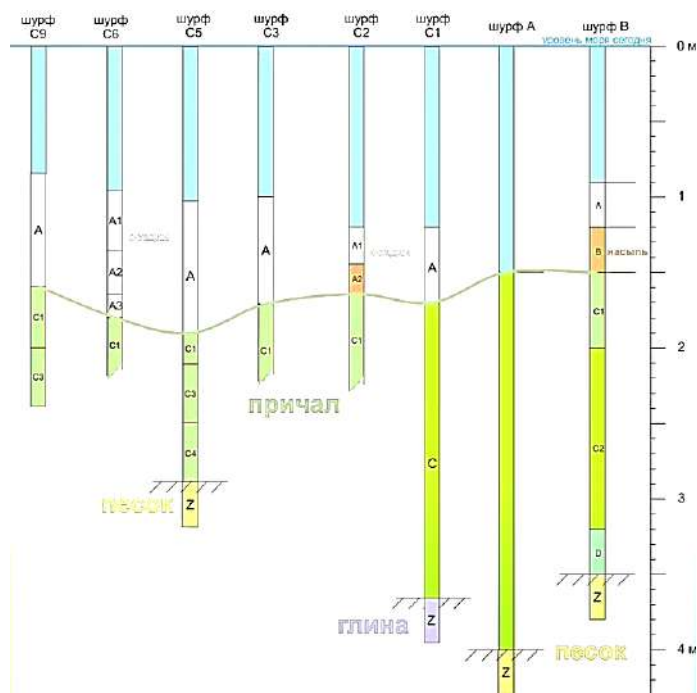


Рис. 3.28. Схема изучения поверхности причала

Более того отсыпка верхней поверхности причала выполнена мелкой галькой и обломками керамики. На фотографиях (рис. 3.29, 3.30) видна аккуратная кладка (мостовая) из крупных камней.

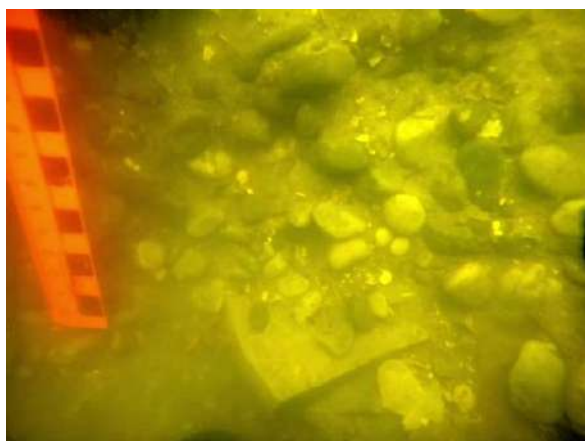


Рис. 3.29. Аккуратная кладка (мостовая) из крупных камней

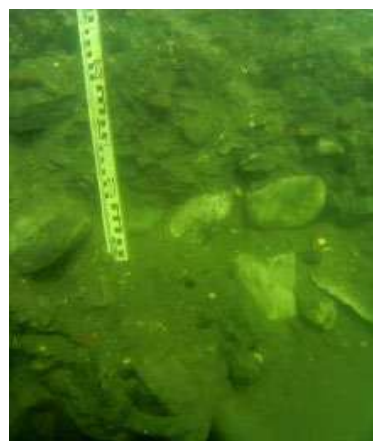


Рис. 3.30. Аккуратная кладка (мостовая) из крупных камней

Ровная верхняя поверхность позволяла удобно перемещаться по ней и перевозить грузы. Значит, сооружение представляло собой не волнолом, а именно причал, к которому приставали суда и по которому перемещались грузы.

Рассмотрим строение причала на примере шурфа В (рис. 3.31).

Слой C1. Крупные окатанные и угловатые валуны. Интервалы между ними забиты мелкими угловатыми обломками и песком (рис. 3.32).

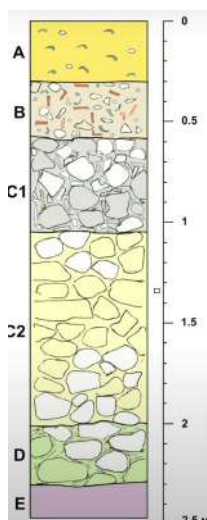


Рис. 3.31. Строение шурфа В



Рис. 3.32. Слой C1

Слой C2. Крупные окатанные и угловатые валуны. Интервалы между ними заполнены чистым песком без камней (рис. 3.33).

Слой D. Крупные угловатые и реже окатанные валуны. Интервалы между ними заполнены песком и перегнившими водорослями (рис. 3.34).



Рис. 3.33. Слой C2

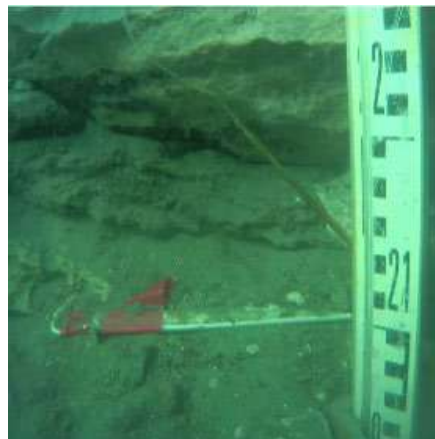


Рис. 3.34. Слой D

Таким образом, причал был укреплен и в верхней половине метра сложен жестким панцирем (слой C1), который не разрушался под действием волн. В основании причала археологи обнаружили между валунами фрагменты водорослей. Это можно

рассматривать как признак того, что в момент начала строительства причала была мелководная обстановка.

Укрепление бортов

В краевых частях причала материалом заполнения между валунами служит растительный детрит: мелкие веточки и щепки размером от первых мм до 5-10 см (рис. 3.35). Предполагается, что такая конструкция применялась для лучшей сопротивляемости волнам. Среди веток плоды и семена травянистых растений (рис. 3.36).



Рис. 3.35. Растительный детрит



Рис. 3.36. Семена травянистых растений, извлеченные из конструкции

Возраст строительства причала

Между камнями каркаса часто обнаруживаются обломки керамических изделий (рис. 3.37, 3.38). Возраст керамики позволяет ограничить возраст строительства сооружения снизу, то есть причал не древнее, чем керамика, которая содержится в нем. Керамика из тела причала не могла быть добавлена туда позднее, так как ее нельзя поместить позднее внутрь конструкции. Между камнями каркаса часто обнаруживаются обломки керамических изделий. Возраст керамики позволяет ограничить возраст строительства сооружения снизу, то есть причал не древнее, чем керамика, которая содержится в нем. Керамика из тела причала не могла быть добавлена туда позднее, так как ее нельзя поместить позднее внутрь конструкции.



Рис. 3.37. Обломки керамики между камнями каркаса



Рис. 3.38. Обломки керамики между камнями каркаса

Возраст причала (рис. 3.39) определен в промежутке между 5-3 веками до н.э. В самой верхней (прибрежной части) находят слои с богатыми залежами керамики возрастом 10-12 н.э. На данный момент археологи не установили причину этого явления. Существует предположение, что причал со временем подсыпали.

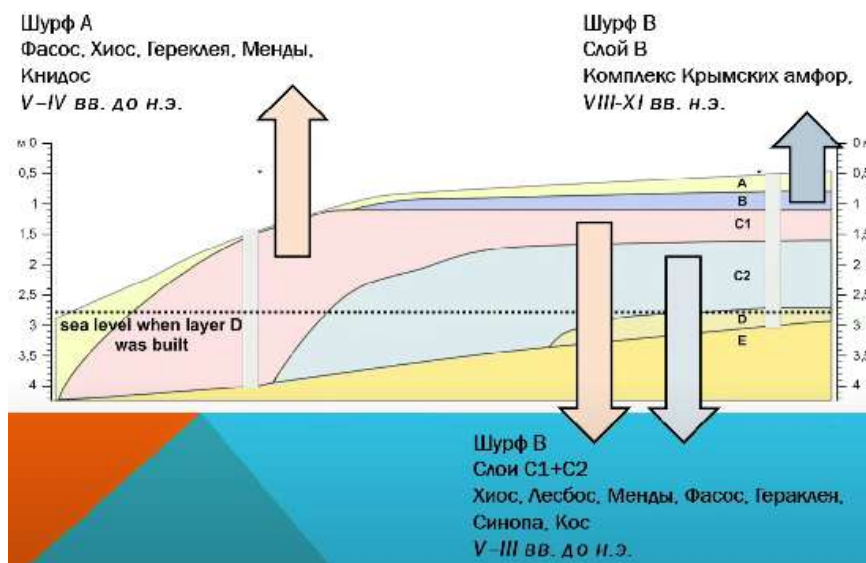


Рис. 3.39. Возраст причала

Источники каменного материала

На Таманском полуострове (рис. 3.40) нет выходов горных пород, пригодных для строительства гидротехнических сооружений. Весь каменный материал должен был поставляться откуда-то извне. Суммарный вес каменного материала в причале - не менее 40 000 тонн (рис. 3.41). Значительная часть (45-50%) представлена осадочными породами, которые могли поставляться с северного побережья Черного моря.



Рис. 3.40. Таманский полуостров на карте черноморского региона

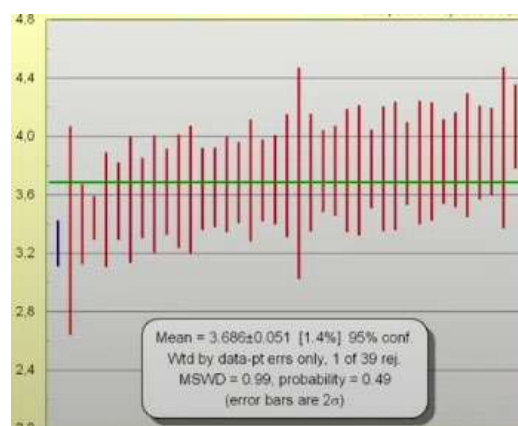


Рис. 3.41. Шкала определения возраста горных пород

Геоархеологи провели ряд исследований: из горных пород были выделены вулканические горные породы и специальный минерал – циркон. Далее был определен возраст этого минерала, что позволило понять возраст образования горных пород: 3.6 млн лет. Вулканизм такого возраста в окрестностях Черноморского региона был в нескольких местах (рис. 3.42), места вулканизма обозначены стрелками): окрестности Эльбруса (современный Кавказ), Центральная Турция, Эгейское море.

Геоархеологи предположили, что так как материал – окатанный, значит он был получен из водной среды. Таким образом, из всех участков подходят только те, которые расположены на побережье: акватория Эгейского моря.

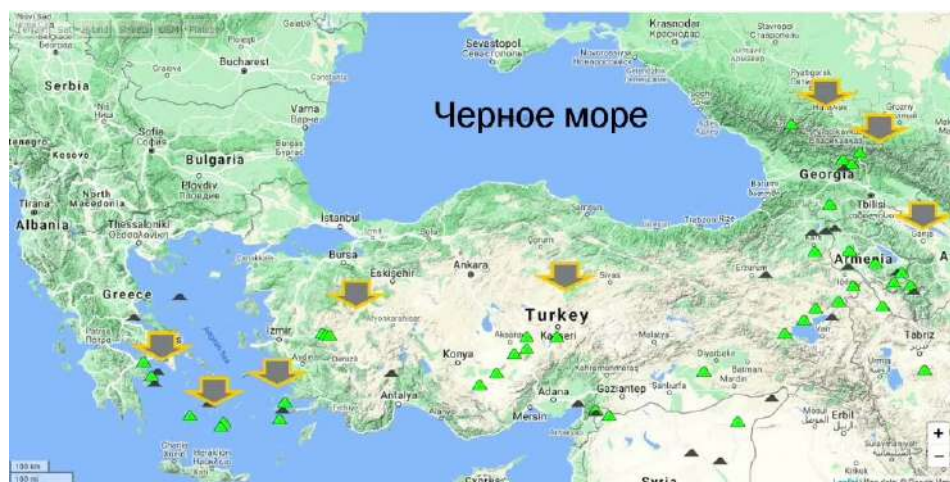


Рис. 3.42. Зоны развития вулканизма возрастом менее 5 млн лет

Далее геоархеологи провели анализ химического состава пород (рис. 3.43) и сопоставление с породами предполагаемых районов-источников (рис. 3.44). В ходе исследований было получено содержание практически 30 химических элементов, содержание изотопов рубидия/стронция/циркония – все элементы обладают свойством: они не перераспределяются в морской воде.

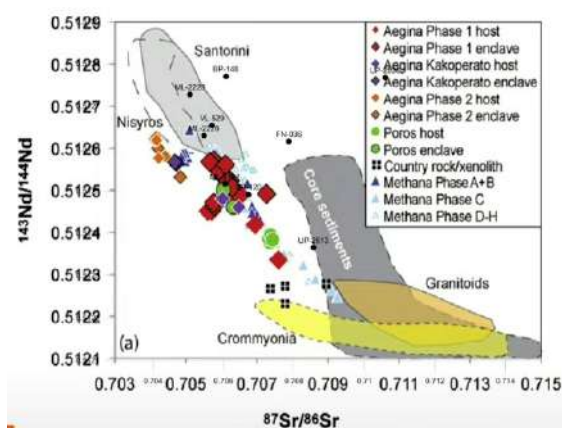


Рис. 3.43. Анализ химического состава пород

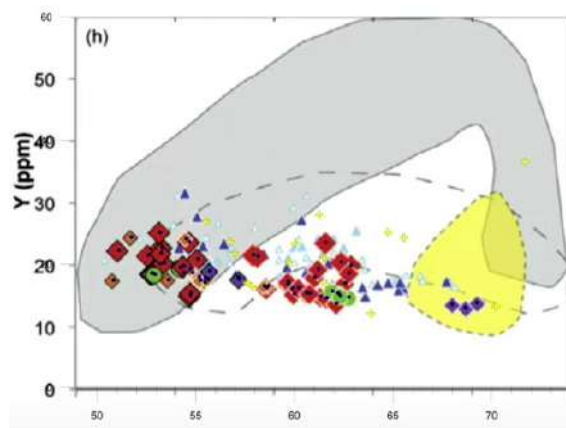


Рис. 3.44. Анализ химического состава пород

Геоархеологи сравнивали полученные данные по анализу химического состава пород с литературными и пришли к выводу, что вероятнее всего, что материал для причала был привезен из района Афин.

Определение возраста одноклеточных организмов

Форма, особенности строения раковины позволяют установить возраст и условия обитания этих организмов (рис. 3.45). Видимо, каменный материал привозили не из одного, а из нескольких источников, расположенных далеко друг от друга (рис. 3.46).

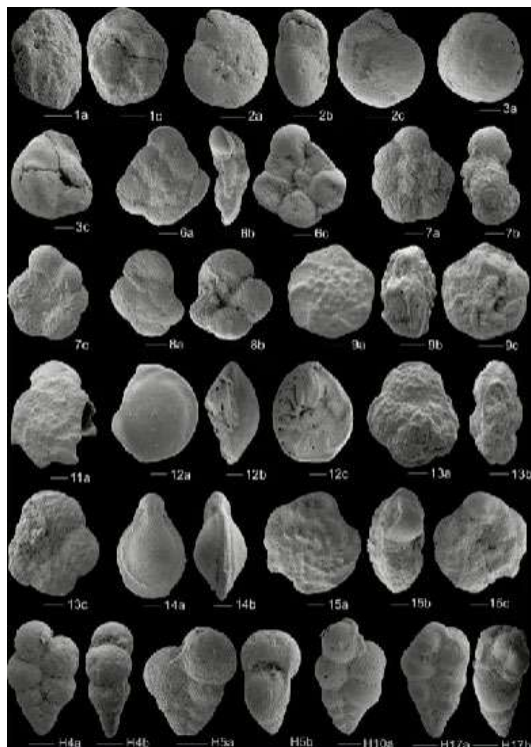


Рис. 3.45. Одноклеточные организмы (фораминиферы)

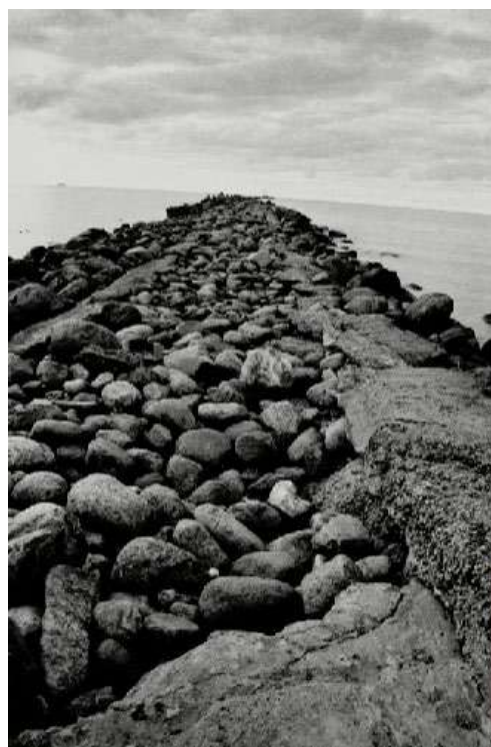


Рис. 3.46. Внешняя поверхность волнолома

Итоги

1. Обнаруженное сооружение является портовым причалом или малом (рис. 3.47).
2. Причал имел ровную дневную поверхность, приспособленную для перемещения по ней.
3. При строительстве применялись разные техники, использовался разный материал (песок, камни, керамика, галька) для забивки интервалов между валунами.
4. В краевых частях причала использовали мелкие ветки, чтобы создать более прочную конструкцию.
5. Причал был построен ориентировочно в V-IV в. до н.э.
6. Общий вес каменного материала составляет не менее 40 000 тонн и был доставлен из удаленных регионов.

7. Столь значимый объем каменного материала был поставлен в относительно сжатые сроки, что требовала хорошо налаженного транспорта и источников каменного материала.



Рис. 3.47. Реконструкция судов Фанагории

Лекция 4. Магматические и метаморфические горные породы

4.1. Группы горных пород

Горные породы – естественные минеральные агрегаты, формирующиеся в литосфере или на поверхности Земли в ходе различных геологических процессов.

Группы горных пород:

- осадочные породы (формируются на поверхности земли);
- магматические (изверженные) породы (формируются в результате застывания природных расплавов/магм/лав в различных условиях);
- метаморфические (образуются в результате преобразования осадочных и магматических пород в твердом состоянии под действием высоких температур и давления).

Петрография

Петрография (греч. *πέτρος* «камень» + *γράφω* «пишу») – наука, описывающая горные породы и составляющие их минералы. В традиционной российской системе геологических дисциплин в сферу петрографии входят магматические и метаморфические горные породы. Изучением осадочных пород занимается литология (седиментология).

В изучении горных пород, как и в современной геологии в целом, значительное внимание уделяется вопросам их происхождения. Смежной наукой, направленной на изучение процессов образования горных пород, является *петрология*.

Методы петрографических исследований:

- методы, выработанные родственными науками геологией, минералогией, физикой, химией;
- собственные, чисто петрографические методы.

Важнейшим петрографическим методом исследования является оптическое изучение горных пород при помощи поляризационного микроскопа (рис. 4.2), для чего из породы изготавливают тонкую пластинку – *шлиф* (рис. 4.1).

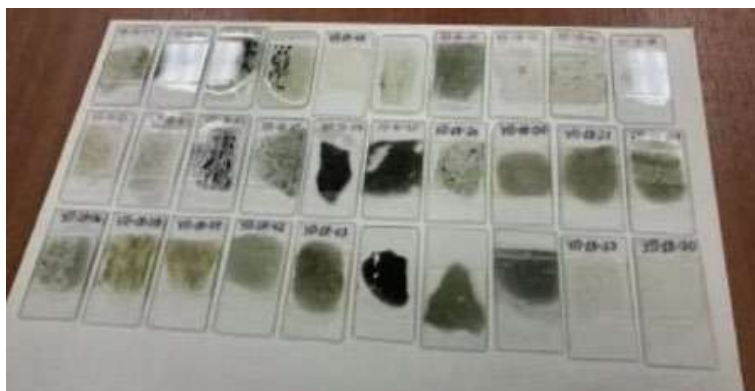


Рис. 4.1. Шлифы



Рис. 4.2. Поляризационный микроскоп

Современным поляризационным микроскопом является микроскоп *Leica* (рис. 4.3).



Рис. 4.3. Поляризационный микроскоп
Leica



Рис. 4.4. Базальт (сверху – образец,
снизу – шлиф)

Для чего изучают горные породы?

Задачи:

- Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых (различные месторождения приурочены к определенным типам горных пород (платина и хром к дунитам и перидотитам, колчеданные месторождения к базальтам, олово к гранитам и т.д.) (рис. 4.5, 4.6).



Рис. 4.5. Дунит с мелкими зернами
хромита



Рис. 4.6. Хромитовая руда

- Понимание геологической истории изучаемого района, его тектоники, геоморфологии и решение других задач общего геологического исследования.
- Технологический процесс (пригодные для цементного производства известняки не должны содержать заметного количества доломита и т. д.).
- Проблема захоронения радиоактивных отходов – одна из основных для атомной промышленности и всего человечества. Наиболее надежный метод – включение отходов в стеклообразные или минералоподобные матрицы.
- Для успешного ведения строительства и других инженерно-технических мероприятий необходимы знания о прочностных свойствах горных пород.

4.2. Состав горных пород

Основная масса горных пород состоит из минералов. В некоторых породах встречается также вулканическое стекло.

К породообразующим относят минералы, слагающие основной объем породы. Они определяют название породы и отражают условия ее образования. Кроме них, в породах присутствуют акцессорные (редкие) минералы.

Структура определяется состоянием вещества, слагающего породу (кристаллическое, аморфное или обломочное), формой и размерами кристаллов или обломков, их взаимоотношениями.

По структуре породы можно определить ее генетическую принадлежность (рис. 4.7, 4.8).



Рис. 4.7. Фрагмент плиты



Рис. 4.8. Базальт под микроскопом (в шлифе)

Текстура характеризует расположение в пространстве минеральных агрегатов или частиц горной породы (кристаллических зерен, обломков и др.). Выделяют плотную, пористую, однородную или массивную, полосчатую (рис. 4.9) или слоистую и ориентированную текстуру.



Рис. 4.9. Обсидиан с полосчатой текстурой, возникшей при продвижении вязкой застывающей лавы

4.3. Магматические породы

Большинство магматических пород образуются в результате кристаллизации флюидно-силикатных расплавов сложного состава – магм, которые формируются в верхней мантии или в пределах земной коры.

Магма (от греч. «тесто») – смесь расплава кристаллов или их сростков, а также летучей фазы. Субстанция способна к перемещению. Магматический расплав – это жидкая часть магмы. Кроме жидкой части в магме присутствуют кристаллы, ксенолиты (обломки вмещающих пород), пузырьки газа.

В ходе вулканических процессов магма извергается на поверхность земли. В таком виде магма называется *лавой* (рис. 4.10).



Рис. 4.10. Лава

Состав магматических пород

Традиционно для магматических пород проводят определение их химического и минерального составов.

Химический состав горных пород изучается как самостоятельный помощью классических методов химического анализа, так и с привлечением современных высокоточных методов.

Разделение магматических пород по глубине образования:

- плутонические (интрузивные) (рис. 4.12) – породы, кристаллизовавшиеся на глубине;
- вулканические (эффузивные) (рис. 4.13) – породы, связанные с охлаждением магмы, излившейся на поверхность (лавы).



Рис. 4.12. Интрузивная порода



Рис. 4.13. Вулканическая порода

Степень кристалличности

Для характеристики магматических пород по степени кристалличности устанавливают присутствие/отсутствие в них вулканического стекла.

Выделяют породы:

- полнокристаллические (вулканическое стекло отсутствует);
- неполнокристаллические (в породах содержатся кристаллы и вулканическое стекло);
- стекловатые (состоят из вулканического стекла с единичными микролитами или зародышами кристаллов – кристаллитами).

Вторая и третья группы относятся к эффузивным (вулканическим) образованиям. Для плутонических пород характерно отсутствие вулканического стекла.

Абсолютная величина кристаллов

Абсолютная величина кристаллов (зернистость) рассматривается для полнокристаллических пород.

Выделяют породы:

- микрозернистые (или микрокристаллические) – менее 0,1 мм;
- мелкозернистые – 0,1-1 мм;
- среднезернистые – 1-5 мм;
- крупнозернистые – 5-10 мм;
- гигантозернистые – более 10 мм.

Мелко- и микрозернистые породы представляют собой малоглубинные образования (в случае присутствия стекла их относят к вулканическим); средне-,

крупно- и гигантозернистые породы – продукты кристаллизации в глубинных условиях.

Относительная величина кристаллов

Относительная величина кристаллов (зернистость) в породах определяет их равномерно- или неравномерно-зернистые структуры.

В данном случае зерна не образуют непрерывного ряда возрастания/убывания размеров (рис. 4.14), выделяются более крупные и более мелкие кристаллы без промежуточных разностей. Такие структуры выделяются под названиями порфировидных (без стекла) и порфировых (со стеклом).

Плутонические породы имеют примерно одинаковые размеры кристаллов. Порфировые структуры характерны для вулканических пород.

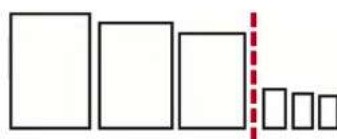


Рис. 4.14. Размер зерен для порфировой или порфировидной структур

Структура вулканических пород

Порфировая структура (вкрапленники в основной массе из микролитов и стекла).

На фотографии под микроскопом (рис. 4.15) видно, что порода состоит из крупных кристаллов-вкрапленников. Самые крупные кристаллы росли из магматического расплава в глубинном очаге (рис. 4.16). Далее расплав поднялся на более высокий уровень, неся в себе образованные ранее структуры и в этот момент к ним присоединились более мелкие образования.

Эволюция магматизма происходит импульсно в условиях сжатия.



Рис. 4.15. Фотография вулканической породы в микроскоп

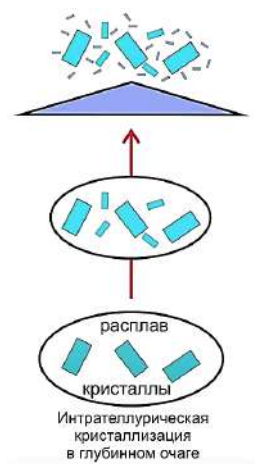


Рис. 4.16. Схема формирования кристалла

Афировая структура (вкрапленники отсутствуют – только основная масса) (рис. 4.17, 4.18). Структура свидетельствует о перегретости магмы при ее излиянии на поверхность и отсутствии длительного нахождения в глубинных магматических очагах.

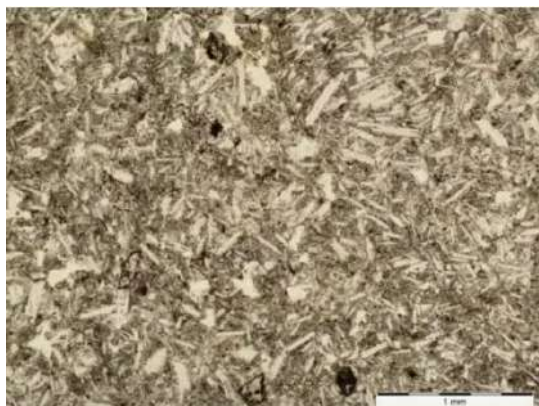


Рис. 4.17. Базальт с афировой структурой

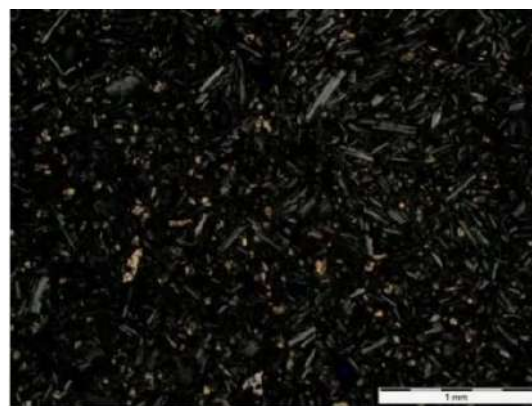


Рис. 4.18. Базальт с афировой структурой

Анализ структур помогает проследить динамику развития вулканизма.

Текстуры магматических пород

Геологи выделяют следующие текстуры магматических пород:

- массивная (минералы в породе распределены равномерно, отсутствуют скопления и преобладающая ориентировка зерен);
- полосчатая (в породе выделяются полосы или линзы, различающиеся минеральным составом и/или структурой);
- флюидальная (текстура течения, характеризует направление движения магматического расплава);
- пористая (результат отделения от расплава летучих компонентов, обычно характерна для верхних частей потоков вулканических пород);
- миндалекаменная (результат заполнения пор низкотемпературными минералами).

Минералогическая систематика

Минералогический подход надежно работает в том случае, если геологи работают с хорошо раскристаллизованными плутоническими породами: для определения соотношения между минералами и выбора главных породообразующих минералов используются простые треугольные диаграммы (рис. 4.19). В вершинах диаграмм всегда стоит главный породообразующий минерал, в данном случае это кварц, плагиоклаз и полевой шпат. С помощью такой диаграммы можно наиболее точно дать название породы. В центре диаграммы – главное поле (в данном случае, граниты) – самое крупное поле.

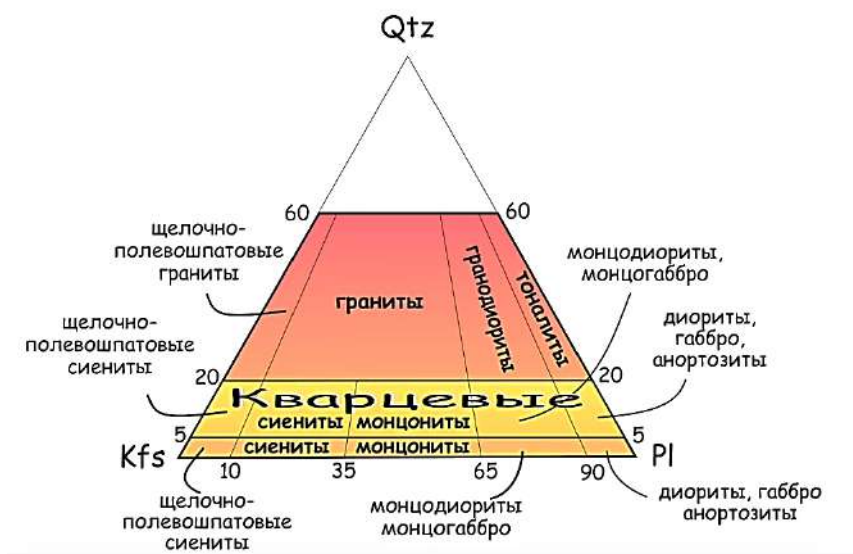


Рис. 4.19. Минералогическая систематика

Гранит

Гранит – кислая plutonic порода биотит-кварц-полевошпатового состава, имеющая средне-крупнозернистую структуру.

Граниты часто используются для облицовки зданий.

Главными минералами в граните (рис. 4.20) являются: кварц, полевой шпат и плагиоклаз. Кроме того, в граните встречается темноцветный минерал – биотит. Такой набор минералов характеризует принадлежность породы к гранитам.

Граниты широко представлены на Земле, встречаются в подвижных поясах. Породы образуют крупные многофазные массивы со сложной историей эволюции.



Рис. 4.20. Гранит в шлифе

Базальт

Базальт – основная вулканическая порода пироксен-плагиоклазового состава со стеклом, имеющая неполнокристаллическую, порфировую структуру.

Распространенность базальта близка к распространенности гранита. Базальты = породы, которые почти целиком слагают дно океана. Для них характерны трещинные излияния и формирование подушечных лав (рис. 4.21, 4.22). За счет того, что излияние происходит в водную среду, расплав быстро застывает, но успевает выдавливаться и образует характерные формы. Пространство между подушечными лавами заполняется осадочными породами. Кроме того, базальты встречаются и на континентах. К ним часто приурочены месторождения полезных ископаемых, в частности, колчеданные руды.

В состав базальта входят пироксен-плагиоклазовые минералы. Для базальта характерна порфировая структура.



Рис. 4.21. Подушечная лава базальта, Новая Зеландия



Рис. 4.22. Подушечная лава базальта в шлифе, Новая Зеландия

Габбро

Габбро – основная plutonic порода пироксен-плагиоклазового состава, имеющая крупнозернистую структуру (рис. 4.24). Габбро (рис. 4.23) является глубинным аналогом базальта.



Рис. 4.23. Габбро



Рис. 4.24. Габбро в шлифе

Лабрадорит (семейство габброидов), аналогично гранитам, используются для облицовки зданий и создания памятников. Эти породы не менее чем на 90% состоят из плагиоклаза. Из-за внутренних свойств кристаллов лабрадорит обладает свойством, которое называется *иризацией* – синий отблеск.

Размеры кристаллов плагиоклаза в габбро могут достигать десятков сантиметров – гигантозернистая структура породы.

Андезит

Андезит (рис. 4.25) – средняя вулканическая порода амфибол-пироксен-плагиоклазового состава со стеклом, имеющая неполнокристаллическую, порфировую структуру (рис. 4.26).

Чаще всего андезиты встречаются на островных дугах в условиях активно континентальных окраин. Название породы получили по названию гор – Анды, где обильно представлен андезитовый вулканизм.



Рис. 4.25. Андезит

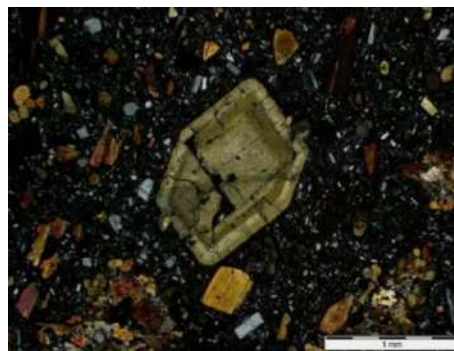


Рис. 4.26. Андезит в шлифе

Риолит

Риолит (рис. 4.27) – кислая вулканическая порода кварц-полевошпатового состава с большим количеством стекла, имеющая неполнокристаллическую, порфировую структуру (рис. 4.28). Полностью стекловатая разновидность кислых пород называется обсидианом.



Рис. 4.27. Риолит

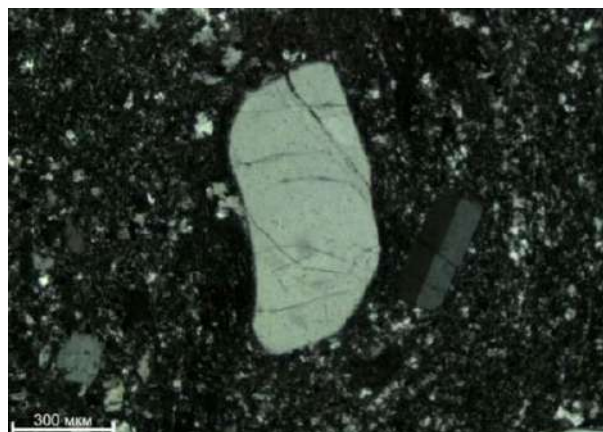


Рис. 4.28. Риолит в шлифе

Перидотит

Перидотит (рис. 4.29) – ультраосновная плутоническая порода пироксен-оливинового состава (рис. 4.30), имеющая средне- или крупнозернистую структуру. Большая часть породообразующих минералов обычно замещен серпентином и вторичными амфиболами.



Рис. 4.29. Перидотит

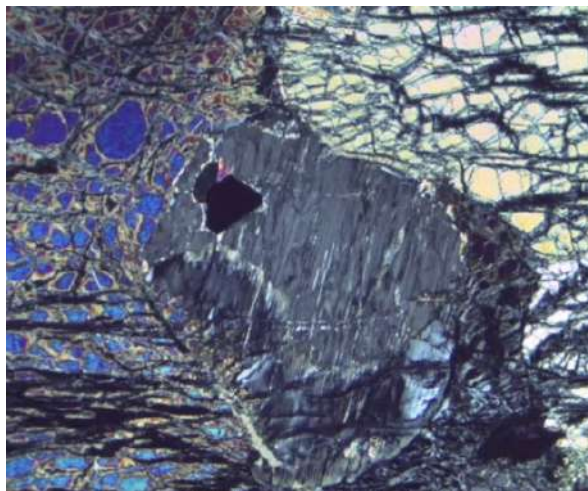


Рис. 4.30. Перидотит в шлифе

Туф

Туф (рис. 4.31) – пирокластическая порода. Туфы образуются в результате эксплозивных/взрывных извержений, при которых образуется большое количество обломков: от самых мелких до крупных. Мелкие обломки могут быть представлены пеплом, стеклом, кристаллами и отдельными фрагментами горных пород. Вулканическими бомбами (рис. 4.32) называют обломки, которые по своему размеру превышают 6 см.



Рис. 4.31. Туф андезитового состава с обломками минералов, стекла и пород



Рис. 4.32. Вулканическая бомба

4.4. Метаморфические породы

Метаморфические породы (рис. 4.33) формируются в результате преобразования осадочных, магматических и ранее метаморфизованных пород в твердом состоянии при воздействии высоких температур и/или давлений при участии летучих компонентов (флюидов).

При метаморфизме осадочные или магматические породы погружаются на глубину, где происходит их разогрев при участии летучих компонентов. Такой процесс получил название – *прогрессивный метаморфизм*. Существует и *регрессивный метаморфизм*.

При этих процессах происходит перекристаллизация пород, в результате чего происходит образование новых метаморфических структур и текстур.



Рис. 4.33. Метаморфическая порода

Структуры метаморфических пород

Структуры метаморфических пород называют *пластическими*. Их образование контролируется литостатическим (всесторонним) и стрессовым (направленным) давлением. На схеме (рис. 4.34) показан принципиальный механизм формирования структур: на границах зерен возникают участки локального напряжения. В этих зонах происходит растворение вещества, которое начинает перетекать в зоны, свободные от давления (тени давления) – процесс заполнения пустот. Структура, показанная на правой части схемы – типичная метаморфическая структура.

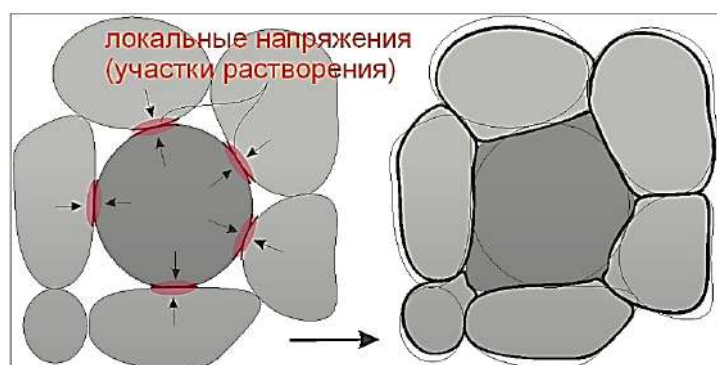


Рис. 4.34. Структуры метаморфических пород

В упрощенном варианте эти структуры выделяются по морфологии минеральных зерен:

- гранобластовая структура (рис. 4.35) – зерна минералов преимущественно изометричны (кварциты, мраморы и др.);
- нематобластовая структура (рис. 4.36) – призматические кристаллы (пироксены, роговая обманка и др.);
- лепидо-гранобластовая структура (рис. 4.37) – чешуйчатые минералы (слюды).



Рис. 4.35. Гранобластовая структура

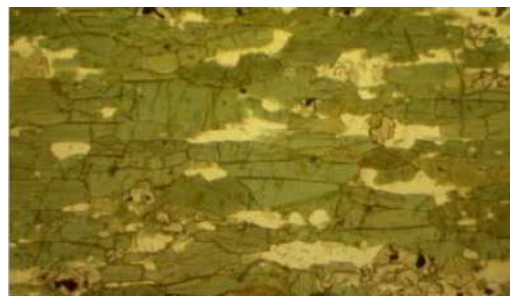


Рис. 4.36. Нематобластовая структура

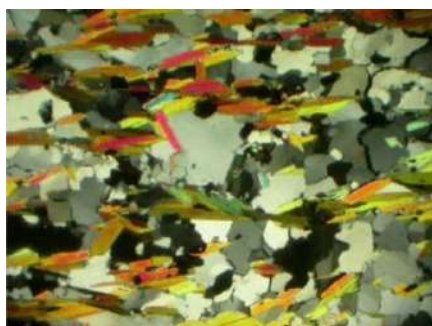


Рис. 4.37. Лепидо-гранобластовая структура

Кроме того, структуры выделяются и по относительному размеру минеральных зерен:

- гомеобластовая (рис. 4.38) – зерна имеют примерно равные размеры;
- гетеробластовая (порфиробластовая) (рис. 4.39) – крупные кристаллы в более мелкозернистой массе.

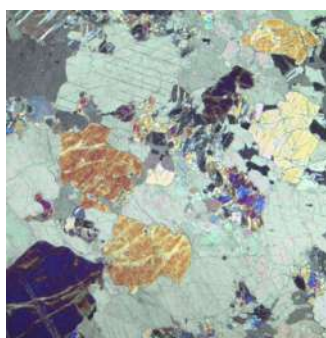
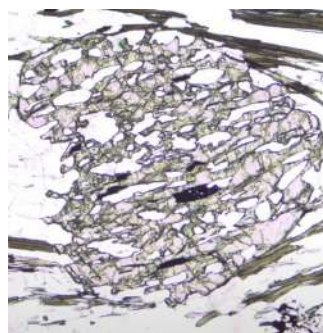


Рис. 4.38. Гомеобластовая структура



*Рис. 4.39. Гетеробластовая
(порфиробластовая) структура*

Текстуры метаморфических пород

Текстуры метаморфических пород:

- массивная (довольно редко в метаморфических породах, отражает низкое стрессовое давление или его отсутствие);
- полосчатая (может представлять собой реликтовую слоистость осадочной породы или возникнуть при метаморфизме) (рис. 4.41);
- ориентированная (результат действия стрессового давления) – сланцеватая (рис. 4.40), если ориентировки задаются темноцветными минералами, и гнейсовидная (если в одном направлении вытянуты полевые шпаты и кварц).

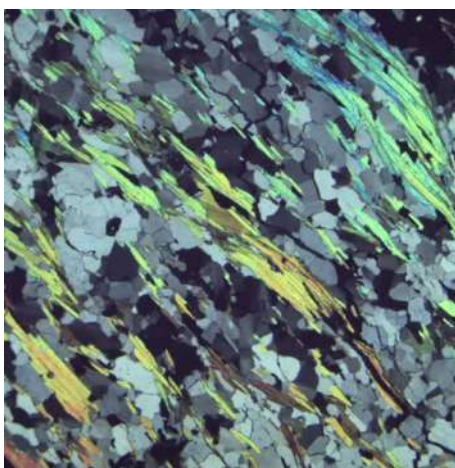


Рис. 4.40. Сланцевая текстура в слюдяном кварците

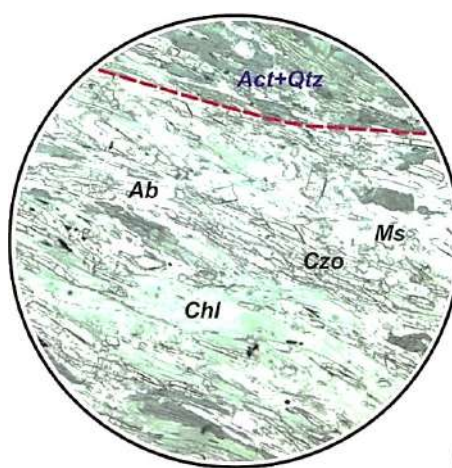


Рис. 4.41. Реликтовая слоистость (полосчатость) в зеленом сланце

Минералогическая систематика

Аналогично, как и для магматических пород, для метаморфических пород используется минералогическая систематика (рис. 4.42). Диаграмма достаточно простая: главные породообразующие расположены в вершинах (в данном случае, кварц, полевые шпаты и темноцветные минералы). В зависимости от распространённости тех или иных минералов в породе выделяются три главные группы:

- кварциты;
- сланцы (преобладают темноцветные минералы);
- гнейсы (преобладают полевые шпаты).

Схема не покрывает всего разнообразия метаморфических пород, поэтому существуют другие классификационные диаграммы.

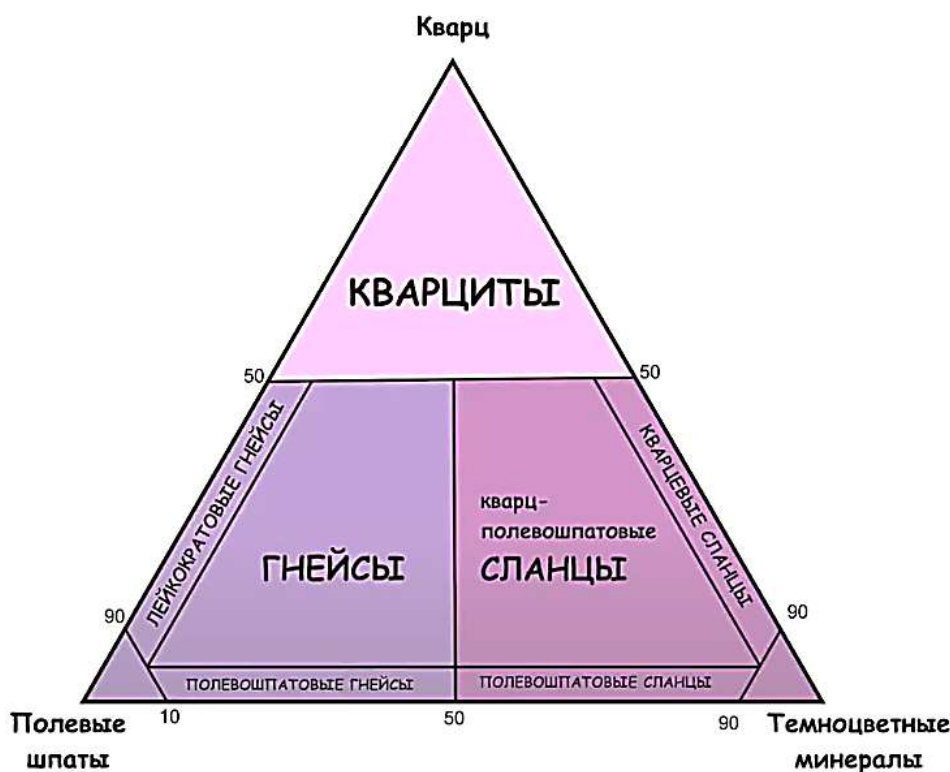


Рис. 4.42. Минералогическая систематика

Кварцит

В составе кварцита (рис. 4.43) содержится более 75% кварца (рис. 4.44), для него наиболее характерна гранобластовая структура. Порода может относиться к разным условиям метаморфизма.



Рис. 4.43. Кварцит

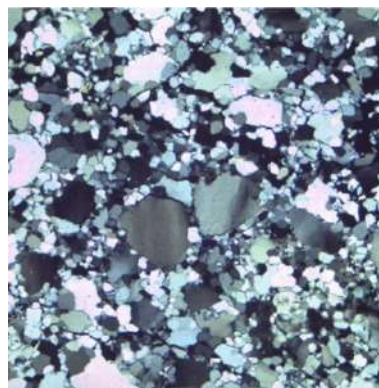


Рис. 4.44. Кварцит в шлифе

Сланец (зеленый)

Зеленый сланец (рис. 4.45) состоит из низкотемпературного амфибола, хлорита, эпидота, кварца и альбита, для него наиболее характерна нематобластовая структура (рис. 4.46). Порода относится к условиям низкотемпературного метаморфизма.



Рис. 4.45. Зеленый сланец



Рис. 4.46. Зеленый сланец в шлифе

Гнейс

Гнейс (рис. 4.47) состоит из полевых шпатов, кварца и темноцветных минералов (биотита, амфибола или пироксенов), для него наиболее характерна гранобластовая структура. Порода может относиться к средне- и высокотемпературным условиям метаморфизма.



Рис. 4.47. Гнейс

Мрамор

Мрамор (рис. 4.48) состоит из кальцита или доломита, для него характерна гранобластовая структура. Порода может содержать примесь других минералов (рис. 4.49), по которым можно определить условия ее образования.



Рис. 4.48. Мрамор

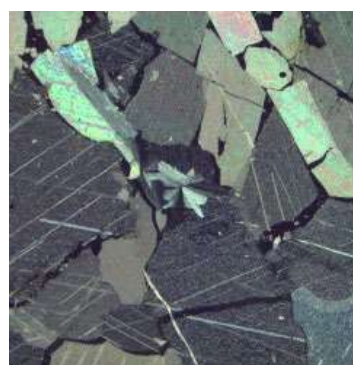


Рис. 4.49. Мрамор в шлифе

Задачи изучения метаморфических пород

Главными задачами в изучении метаморфических пород являются:

- установление условий (степени, ступени) метаморфизма – анализ минералов и минеральных ассоциаций. Выделяют высшую (выше 700°C, пироксены, гранат, кордиерит, sillimanит и др.), среднюю (500-700°C, амфиболы, биотит, гранат и др.) и низшую (менее 500°C, хлорит, мусковит и другие низкотемпературные водосодержащие минералы).
- определение исходной породы – поиск реликтовых структур и текстур, минералов-индикаторов исходной породы.

Лекция 5. Жизнь кристаллов

5.1. Кристаллография

Кристаллография и кристаллохимия – пограничные науки, которые возникли на пересечениях больших областей классического естествознания. Кристаллография связывает геологические, химические и физические дисциплины (рис. 5.1).



Рис. 5.1. Области кристаллохимии

Положение современной кристаллографии во многом напоминает роль математики, методы которой используются в многочисленных и разнообразных дисциплинах.

Практически все научные и технические достижения последнего времени непосредственно связаны с кристаллографией.

Сюда можно отнести компьютерную микроэлектронику, электронную микроскопию, открытие квазикристаллов, явление высокотемпературной сверхпроводимости и т.д.

Генеральная ассамблея ООН на своем заседании 12 июля 2012 на шестьдесят шестой сессии пунктом 14 повестки дня постановила провозгласить 2014 год Международным годом кристаллографии (рис. 5.2).

Полезные ссылки:

http://cryst.geol.msu.ru/about/cryst_2014.pdf

<http://iycr2014.org/>



Рис. 5.2. Фрагмент сайта, созданного по случаю Международного года кристаллографии

2014 год провозглашен Международным годом кристаллографии, потому что:

1) понимание человеком материальной природы окружающего мира основывается, в частности, на нашем знании кристаллографии.

2) изучение и прикладное использование кристаллографии играют исключительно важную роль в борьбе с такими вызовами, как болезни и экологические проблемы, позволяя получить данные о структуре белков и низкомолекулярных соединений, подходящих для разработки лекарственных препаратов.

3) важное значение научных достижений в области кристаллографии, подтвержденное тем, что Нобелевская премия 23 раза присуждалась за исследования в этой области, и то, что кристаллография по-прежнему представляет собой плодородную почву для новых и многообещающих фундаментальных исследований.

Задачи

Основные задачи кристаллографии и кристаллохимии в 21-ом веке:

- 1) Расшифровка кристаллических структур (в том числе новых минералов);
- 2) Синтез перспективных материалов;
- 3) Лабораторное исследование вещества в экстремальных P - T условиях;
- 4) Предсказание структур и свойств еще не синтезированных соединений.

Кристаллы

Кристаллы – самые прекрасные творения неживой природы. Еще с глубокой древности люди восхищались (рис. 5.3) удивительно правильной огранке природных кристаллов (рис. 5.4), порой кристаллам приписывали магическую силу, которая выше возможностей человеческого познания.



Рис. 5.3. Изображение взаимосвязи кристаллов и человека. *Letters from England, Natural History Museum*



Рис. 5.4. Кристалл

На рисунках 5.5 – 5.7 показана красота и многообразие природных кристаллов.



Рис. 5.5. Кристалл
оливина

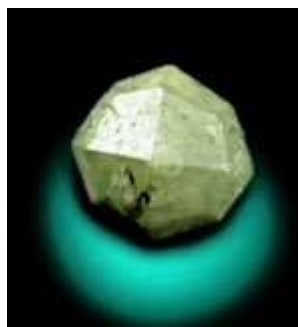


Рис. 5.6. Кристалл лейцита



Рис. 5.7.
Природные
кристаллы

Природные кристаллы часто растут в виде выпуклых многогранников. Часто получаются не идеальные многогранники.

Пьер Кюри (рис. 5.8) сформулировал универсальный закон симметрии (*диссимметрии*): в результате наложения нескольких явлений различной природы, каждое из которых обладает своей собственной симметрией, в одной и той же системе сохраняются лишь совпадающие элементы симметрии этих явлений.

Демонстрация принципа суперпозиции Кюри (рис. 5.9): в результате наложения двух фигур – квадрата с симметрией $L_4 4P$ и треугольника с симметрией $L_3 3P$ остается только общий элемент симметрии – P .



Рис. 5.8. Пьер Кюри (1859 – 1906)

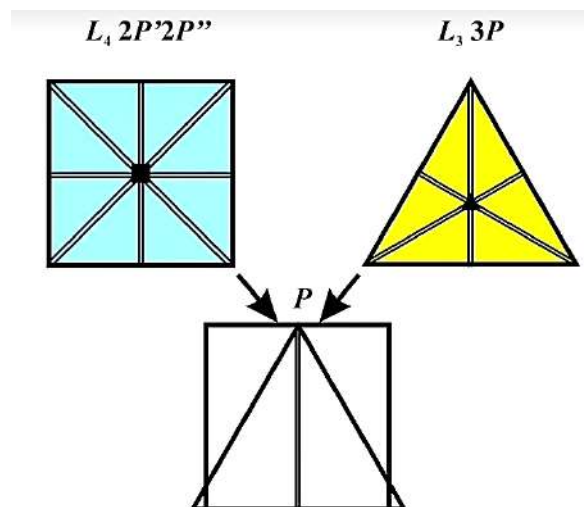


Рис. 5.9. Демонстрация принципа
суперпозиции Кюри

Иллюстрация закона Кюри (рис. 5.10): лист обладает одной плоскостью симметрии – P (а), цветок – радиально-лучистой симметрией (б). Все, что растет или активно движется по горизонтали либо косо к земной поверхности, характеризуется симметрией листка (P). Все, что растет и движется только по вертикали, имеет симметрию цветка $L_n nP$.

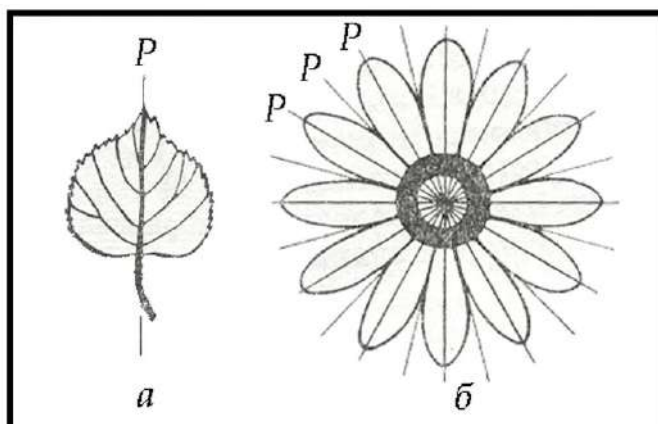


Рис. 5.10. Иллюстрация закона Кюри: лист обладает одной плоскостью симметрии – P (а), цветок – радиально-лучистой симметрией (б)

Выводы

Вывод 1

Герберт Уэллс и иллюстраторы его романа не знали принцип Кюри и кристаллографию, когда сочиняли и оформляли «Войну миров».



Рис. 5.11. Иллюстрация к книге «Война миров»

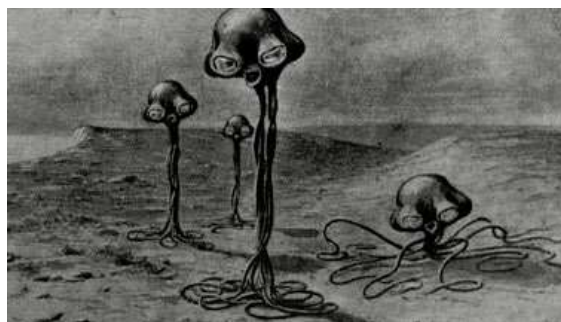


Рис. 5.12. Иллюстрация к книге «Война миров»

Вывод 2

Георгий Остер и его художник были слегка знакомы с принципом Кюри и кристаллографией, когда создавали Вредный Задачник.

Пример задачи из сборника:

Задача 47. Инопланетяне, посетившие школу №141, резко отличаются от жителей Земли. У каждого из них по 4 руки, 4 ноги и 2 совести. Насколько меньше всего перечисленного у ученика этой школы Степана Стульчикова, если известно, что руки ноги у него столько же, сколько у обычного человека, а совести нет совсем?

Вывод 3

На кристалл, растущий на планете Земля действует сила гравитации.

В природных условиях для выращивания идеальных кристаллов (рис. 5.13) все оказывается достаточно неприятно: симметрия неизбежно понижается, хотя бы под действием закона всемирного тяготения.

Кристалл растет исключительно медленно и за время его роста условия меняются неоднократно. Неудивительно, что существенное время на орбите международных космических станций космонавты проводят за выращиванием кристаллов в «тепличных условиях» (рис. 5.14).



Рис. 5.13. Рост кристаллов

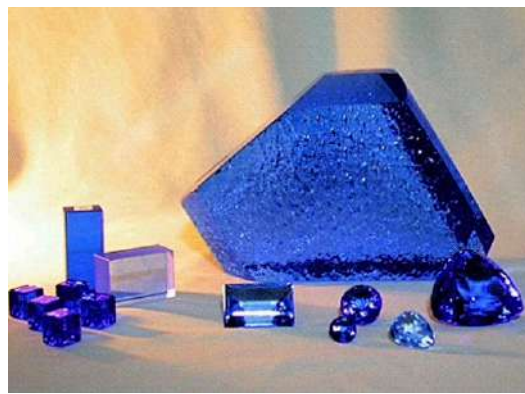


Рис. 5.14. Синтетические кристаллы

Выращивание синтетических кристаллов описывалось в романе братьев Стругацких «Трудно быть Богом»: «Одного этого золота достаточно было бы для того, чтобы сжечь вас на костре! - завопил он. – Это дьявольское золото! Человеческие руки не в силах изготовить металл такой чистоты!

Формы роста кристаллов в природе

Известный советский минералог и геохимик А. Е. Ферсман писал: «Кристалл неизменно несет на себе следы предыдущих моментов своего существования, и по его форме, по скульптуре его граней, мелочам и деталям его поверхности мы можем читать его прошлое».

Таким образом, огранка и форма реальных кристаллов, хотя и нарушает его внутреннюю идеальную красоту, но несет в себе информацию о целом ряде вопросов, на которые идеальная модель ответить не может.

Признаки, указывающие на историю развития кристалла, называются *типоморфными признаками (онтогенеза)*.

Грани разных простых форм захватывают примеси из маточного раствора в различных количествах. В результате кристалл оказывается дефектным, как бы разбитым на секторы – пирамиды роста (рис. 5.15), основанием которых служат грани кристалла, а вершинами – точка, совпадающая с началом кристаллизации. Неравномерное распределение примесей по пирамидам роста приводит к секториальному строению.

Признаки, указывающие на историю развития кристалла, называются *типоморфными признаками*.

Если условия роста меняются периодически, то кристалл приобретает зональное строение (рис. 5.16), в основном являющееся следствием неравномерного распределения в разных слоях роста точечных дефектов. Зоны роста могут отличаться окраской, прозрачностью, наличием включений.

Процесс кристаллизации сопровождается равновесием жидкой и твердой фазы (рис. 5.17). В идеальных условиях очень медленного охлаждения химический состав жидкой фазы будет эволюционировать по зеленой линии, а химический состав твердой фазы будет эволюционировать по синей линии. Таким образом, будет существовать равновесие, и кристалл будет расти однородным. Однако, процессы в твердой фазе идут медленнее. По зональности можно судить о скорости кристаллизации природных образцов.

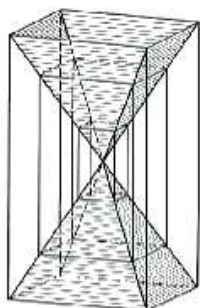


Рис. 5.15. Пирамиды роста граней в кристалле

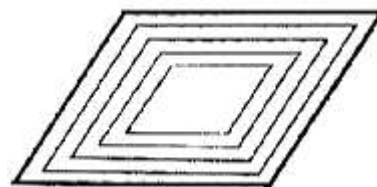


Рис. 5.16. Схема зонального строения в кристалле

Главнейший фактор, определяющий огранку – внутреннее строение кристалла, так как внешняя форма кристалла является отражением его внутреннего строения. Наблюдения этой взаимосвязи привели в начале 20-ого века к *правилу Кюри-Вульфа* (рис. 5.18): наиболее развитыми на поверхности кристалла являются грани с наименьшими скоростями роста.

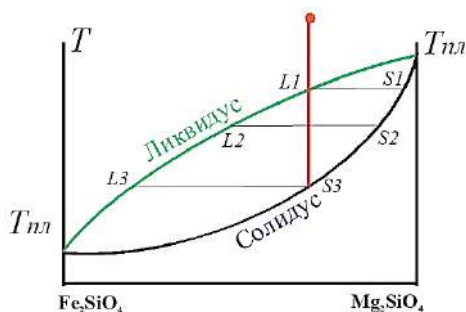


Рис. 5.17. Солидус и ликвидус

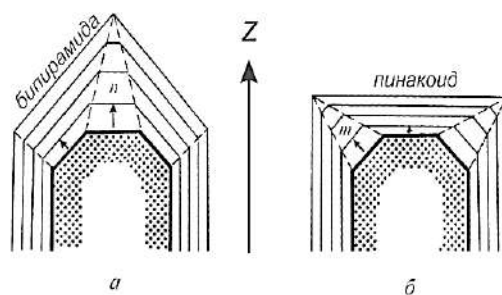


Рис. 5.18. Иллюстрация к правилу Кюри-Вульфа

Формы роста определяются многочисленными факторами и показаны схематически на рисунке 5.19.

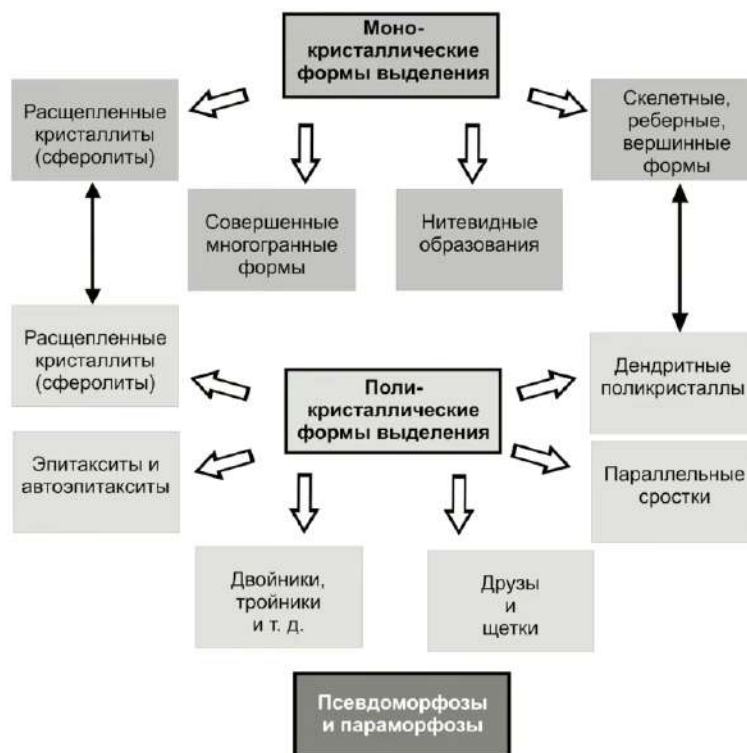


Рис. 5.19. Формы роста

Так, скелетные и дендритные кристаллы (рис. 5.20) развиваются в условиях исключительно быстрого роста и наличия избытка питающего вещества, из которого «строится» кристалл. Главной причиной образования таких форм является то, что к выступающим частям кристалла - вершинкам и ребрам - поток питающего вещества более интенсивен, чем к граням, которые в результате отстают в росте. Поэтому кристалл быстро наращивает свою массу ценой искажения своей идеальной формы.



Рис. 5.20. Скелетные и дендритные кристаллы

Атмосфера Урана предполагает другие термодинамические условия, поэтому скелет снежинки будет не 6-угольным, как на Земле, а 4-угольным (рис. 5.21).



Рис. 5.21. Разница скелетов снежинок из-за разницы атмосфер планет

Граница между терминами «скелетные» и «дендритные» формы достаточно условна, однако, чаще скелетными формами принято называть монокристаллы, а дендритными формами поликристаллические образования (рис. 5.22).

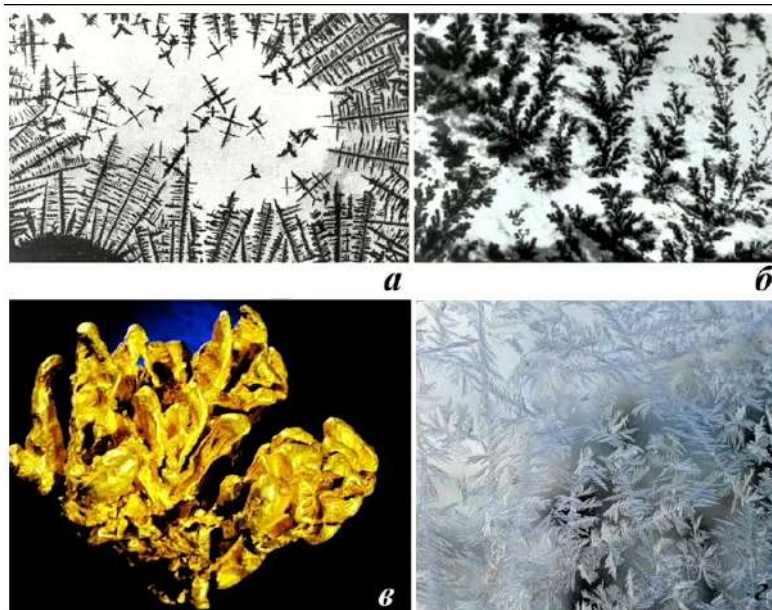


Рис. 5.22. Дендритные формы роста: а – хлористого аммония, б – оксидов марганца, в – самородного золота (фото из коллекции музея им. Ферсмана), г – льда

Своеобразными формами минеральных выделений являются радиально-лучистые агрегаты – сферолиты. Их образование связывают с расщеплением монокристаллов в процессе роста (рис. 5.23а – 5.23в), либо с ростом уже отдельных монокристаллических волокон, выходящих радиально из одного центра кристаллизации, каждое из которых – ограниченный самостоятельный индивид.

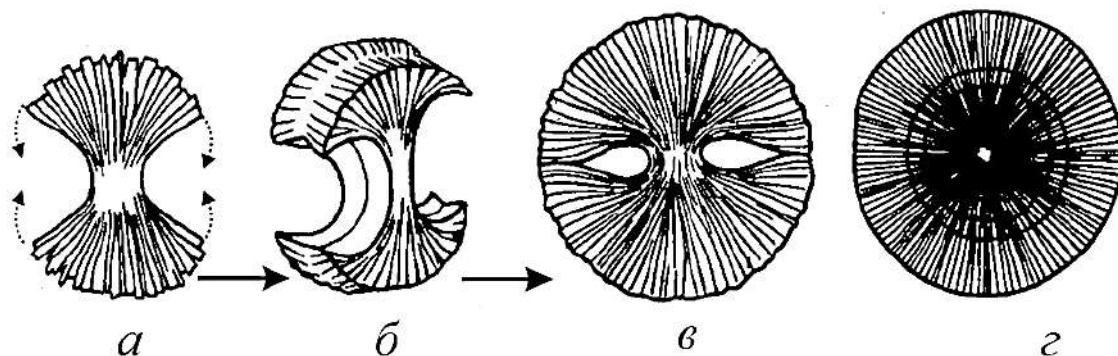


Рис. 5.23. Схема, иллюстрирующая образование монокристаллического сферолита (а-в) и поликристаллический сферолит (г)

К незакономерным сросткам можно отнести друзы (рис. 5.24, 5.25) (несколько индивидов, растущих в разных направлениях из одного центра и щетки (группы кристаллов, наросших одним концом на общее основание (рис. 5.26)). Очевидно, что между этими терминами граница достаточно условная (равно как и между друзой и сферолитом).



Рис. 5.24. Сростки пирита



Рис. 5.25. Аметист (друза)

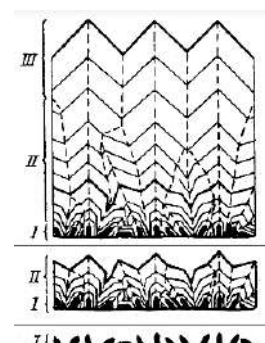


Рис. 5.26. Схема роста кристаллов

Если ориентация кристаллов в агрегате становится одинаковой, то щетка переходит в параллельный сросток, который правильнее отнести уже к закономерным срастаниям. К последним также относятся эпитаксические и автоэпитаксические срастания кристаллов, а также двойники.

Автоэпитаксия — это закономерно ориентированное нарастание кристаллов одного и того же минерала. Известным примером может служить скипетровидный кристалл кварца, где на кристалле первого поколения образуется новый индивид другой формы, и часто и другой окраски, что связано с изменением условий кристаллизации.

Двойники — еще одни интересные образования кристаллов (рис. 5.27). В кристаллохимии существует множество законов двойникования.

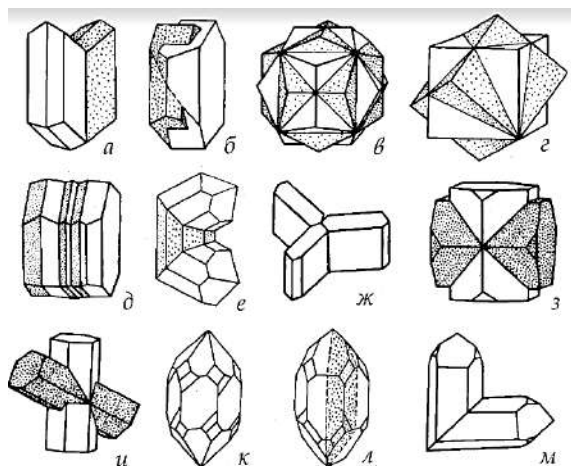


Рис. 5.27. Наиболее распространенные двойники некоторых кристаллов

Примеры двойников-срастания и двойников-прорастания показаны на рисунках 5.28. 5.29.



Рис. 5.28. Двойники срастания. Гипс,
«ласточкин хвост»



Рис. 5.29. Двойники прорастания.
Ставролит

В отдельную группу форм роста можно выделить *псевдоморфозы* (рис.5.30), которые образуются в результате замещения одного минерала другим с сохранением внешних форм исходных кристаллов (объектов) или при последующем заполнение пустот, образовавшихся при растворении минерала.



Рис. 5.30. Псевдоморфозы кристалла

Химический состав кристаллов

Сейчас установлено более 5000 минералов природных химических соединений и гораздо меньшее количество различных структурных типов несмотря на применение в

последние десятилетия мощной лабораторной техники, которая позволяет находить и определять химический состав частиц, имеющих микронные размеры. Благодаря этим методам в настоящее время ежегодно открывают лишь около 50-60 новых минералов, преимущественно очень редких и представленных единичными находками.

Число известных минеральных видов невелико:

- 1) специфика термодинамической и химической обстановки на поверхности Земли;
- 2) групповое поведение ряда элементов кристаллохимических соседей;
- 3) маскировка и изоморфное рассеяние редких элементов накладываются на общую распространенность атомов в Земной коре;
- 4) в сочетании с принципом ЖМКО это дает ошеломляющий эффект существенной ограниченности числа минеральных видов по сравнению с многообразием соединений технологической химии.

Имитация природных процессов в лаборатории

К началу 21-ого века разработаны многочисленные методы получения кристаллов.

Основными методами получения совершенных кристаллов большого размера считаются технологии выращивания из расплава, из растворов, из газовой фазы.

С 2017 года Геологический факультет курирует Всероссийский конкурс по выращиванию кристаллов среди школьников (рис. 5.31, 5.32):

https://vk.com/crystal_msu

<http://geol.msu.ru/ru/abiturientu/konkurs-po-vyrashchivaniyu-kristallov>



*Рис. 5.31. Афиша
Всероссийского конкурса
«Кристалльное дерево
знаний»*



*Рис. 5.32. Фотографии со всероссийского конкурса
«Кристалльное дерево знаний»*

В конкурсе могут участвовать все желающие, особенно организаторы будут рады видеть участников 5-14 лет. Возраст участников – без ограничений. Конкурс идет постоянно.

Для того, чтобы попасть на конкурс необходимо прислать свою работу с описанием выращенных образцов.

Методы выращивания кристаллов

На рисунке 5.33 показана кристаллизационная камера, в которой выращиваются кристаллы в идеальных условиях. На рисунке 5.34 показан идеальный кристалл, выращенный искусственно из водных растворов с помощью кристаллизатора.

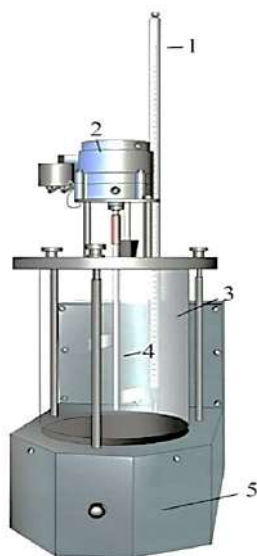


Рис. 5.33. Схема кристаллизационной камеры для выращивания кристаллов из растворов: 1 – контактный термометр, 2 – вращающее устройство; 3 – кристаллизатор; 4 – мешалка; 5 – нагреватель; 6 – гигантские технически важные кристаллы КДР (KH_2PO_4) выращенные из раствора



Рис. 5.34. Искусственно-выращенный кристалл

Для выращивания под давлением и при высокой температуре используют автоклавы (рис. 5.35) – толстостенные стальные цилиндры с герметическим запором, выдерживать одновременно высокие температуры и давления в течение длительного времени.

Контроль термодинамических условий позволяет выращивать кристаллы значительно более качественные (рис. 5.36), чем кристаллы, выросшие в природе. В природе кристаллы растут долго, поэтому ученым необходимо каким-то образом ускорить процесс их роста. По принципу Кюри-Вульфа (кристалл ограняется наиболее

медленно растущими гранями) необходимо сделать затравочную пластинку параллельно наиболее быстро растущими плоскостями.

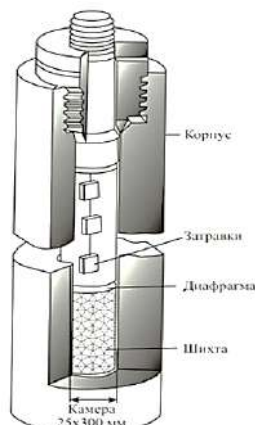


Рис. 5.35. Автоклава



Рис. 5.36. Искусственно-выращенные кристаллы

Существуют и другие методы выращивания: например, выращивание из расплава – метод зонной плавки – метод Пфанна (метод лодочки).

Сквозь нагреватель (рис. 5.37) прогоняется расплав несколько раз и, таким образом, убираются лишние примеси. После проведения этого процесса получают сверх чистые образцы.

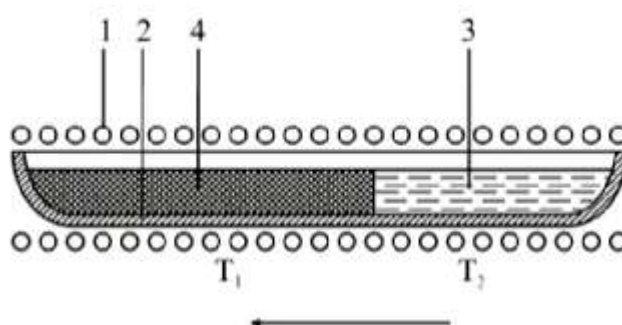


Рис. 5.37. Схема горизонтальной направленной кристаллизации в «лодочке»: 1 – нагреватель, 2 – контейнер-лодочка, 3 – расплав, 4 – растущий кристалл; $T_1 < T_2$

5.2. Геологический факультет. Кафедра геохимии

Геология – Гео – «Земля» и Логос – «изучаю» – наука о Земле.

Геология сейчас включает в себя более 40 отдельных/научных направлений, связанных с изучением Земли.

Вступительные испытания

Перечень вступительных испытаний в 2022 г.:

- Математика (ЕГЭ);
- Физика (ЕГЭ) либо Химия (ЕГЭ), либо География (ЕГЭ);

- Русский язык (ЕГЭ);
- дополнительный письменный экзамен по математике

Отделение геохимии

Учебный план на геологическом факультете разный уже с 1-ого семестра (рис. 5.38).

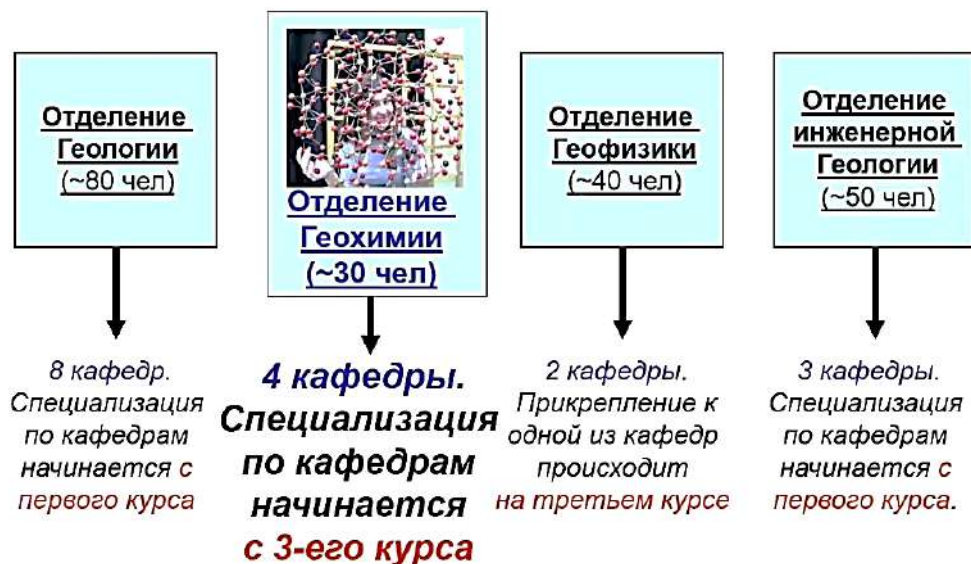


Рис. 5.38. Схема отделений

Отделение геохимии разделяется на:

- кафедра геохимии;
- кафедра петрологии;
- кафедра минералогии;
- кафедра кристаллохимии и кристаллографии.

По этой специальности факультет готовит специалистов по изучению вещества Земли от атомарных до планетарных масштабов.

Выпускник-геохимик получает глубокую общегеологическую и физико-химическую подготовку, владеет методами инструментального анализа природных объектов, методами экспериментального и компьютерного моделирования природных и техногенных процессов, поисков полезных ископаемых. Спектр возможного распределения: Научно-исследовательские центры РАН и Российских и зарубежных университетов, производственные организации геологической и природоохранной сферы, коммерческие структуры.

Распределение по кафедрам и конкретная специализация – после 2-го курса.

Кафедра геохимии

Территория нашей страны уже исхожена вдоль и поперек. Сейчас перед геологами стоит задача выявлять месторождения, скрытые в глубине, а не лежащие на

поверхности. Такие месторождения не увидит самый зоркий глаз, но их можно искать, используя современные геохимические методы поиска месторождений.

Кроме того, проводится экологический мониторинг (рис. 5.39) и прогноз воздействия техногенных и горнорудных процессов на окружающую среду (рис. 5.40).



Рис. 5.39. Экологический мониторинг

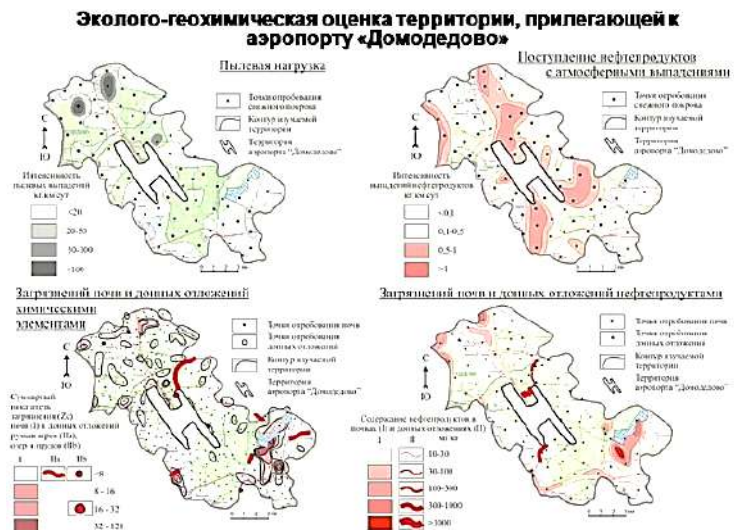


Рис. 5.40. Эколого-геохимическая оценка территории, прилегающей к аэропорту «Домодедово»

В геохимии есть отдел, связанный с изучением абсолютного возраста геологических объектов и процессов – *геохронология*. Методы основаны на использовании различных ядерных реакций (рис. 5.41, 5.42). Эта наука смежная с работой палеонтологов, которые могут определять возраст по осадочным породам с остатками древних животных и растений.

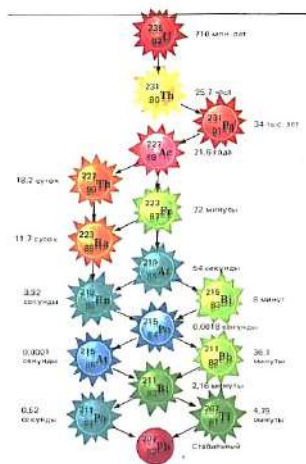


Рис. 5.41. Периоды полураспада

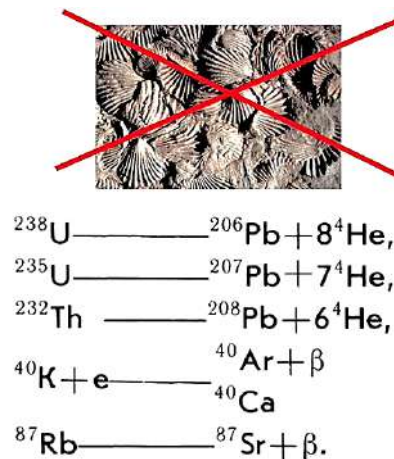


Рис. 5.42. Реакции распада

Кафедра петрологии

Петрология – комплексная наука магматических, метаморфических и метасоматических горных породах, как ассоциации минералов, их составе, происхождении, физико-химических условиях образования и эволюции в земной коре, мантии Земли и космическом веществе.

Кафедра минералогии

Минералы – индикаторы геологических процессов. КППШ – геоспидометры (по соотношению Al и Si в различных позициях структуры можно определить скорость остывания магмы миллионы лет назад). Примеры:

- Санидин – полиморфная модификация состава $K[AlSi_3O_8]$ распределение Si и Al полностью неупорядоченно;
- Ортоклаз модификация $K[AlSi_3O_8]$ с промежуточным распределением Si и Al .
- Микроклин модификация $K[AlSi_3O_8]$ распределение Si и Al полностью упорядочено.

Минералогия – геммологическое направление.

Диагностика, экспертиза и оценка драгоценных и других камней, ювелирных изделий. Развития химических методов определения и диагностики. Примеры применения оптической спектроскопии:

- определение страны происхождения изумрудов;
- диагностика синтетических и природных александритов;
- распознавание природной и синтетической шпинели
- диагностика природных и синтетических гидротермальных изумрудов

О будущем выпускников

Кафедра готовит специалистов в области:

- кристаллохимии;
- рентгеновских и спектроскопических методов исследования вещества;
- роста кристаллов;
- теоретического структурного моделирования.

Студенты получают:

- глубокую физико-химическую и геологическую подготовку,
- слушают ряд оригинальных современных курсов.

Выпускник кафедры умеет:

- 1) Расшифровывать кристаллические структуры;
- 2) Синтезировать перспективные материалы;
- 3) Исследовать вещество в экстремальных Р-Т условиях;
- 4) Предсказывать свойства еще не синтезированных соединений.

Лекция 6. Что такое палеонтология и зачем она нужна

6.1. Палеонтология

Палеонтология – наука об организмах, существовавших в прошлые геологические эпохи и сохранившихся в виде ископаемых остатков, а также следов их жизнедеятельности.

Самое важное в палеонтологии, чтобы жившие ранее организмы попали в геологическую летопись, т.е. сохранились в горных породах. Наилучший вариант – если ископаемый организм имеет твердый скелет. На рисунке 6.1 показан моллюск *Nautilus*, имеющий твердую раковину (рис. 6.2).



Рис. 6.1. Моллюск *Nautilus*



Рис. 6.2. Модель раковины моллюска

Впоследствии твердые раковины могут сохраняться внутри твердых горных пород.

Ископаемые остатки в Москве

Наблюдать раковины можно в самых различных местах. Например, в Москве легче всего встретиться с ископаемыми организмами в московском метро (рис. 6.3., 6.4).



Рис. 6.3. Остатки *Nautilus*.
Станция метро Арбатская, Москва



Рис. 6.4. Остатки *Nautilus*. Станция метро
Парк Победы, Москва

В стенах московского метро можно встретить ископаемых животных: губки, моллюски, белемниты, аммониты, раковины двустворчатых моллюсков или брахиопод.

Все интересные находки собраны на одном сайте: «Палеонтология московского метро» www.paleometro.ru и www.ammonit.ru. Создателем сайтов является А. А. Мироненко.

www.ammonit.ru – сайт для любителей палеонтологии.

Ископаемые организмы можно найти в самых разных местах Москвы. Лучше всего изучить постройки, которые полностью или частично построены из блоков белоснежного известняка каменноугольного периода. Этот известняк добывали в Подмосковье в различных карьерах и использовали для строительства города. Его добыча продолжается и в настоящий момент, однако известняк используют не в виде блоков, а в виде размолотой пудры, из которой потом делают цемент.

Новодевичий монастырь (рис. 6.5) частично построен из блоков древнего известняка – блоки слагают подножие стены, в то время как основная часть сложена кирпичами. Цоколь стены внизу построен из известняка, который в настоящее время уже достаточно рыхлый и из которого можно с легкостью вытащить мелкие частицы, похожие на зерна риса – это маленькие раковины древних одноклеточных организмов, которые называются *фораминиферами*.

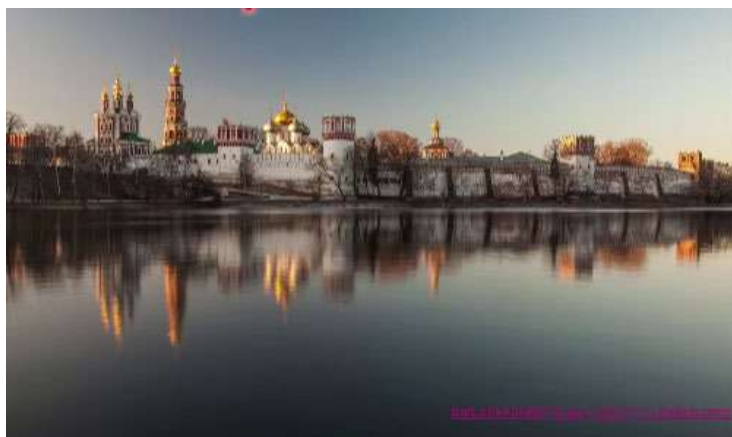


Рис. 6.5. Новодевичий монастырь, Москва

Задачи палеонтологии

Одной из задач палеонтологии является *реконструкция* внешнего вида, биологических особенностей, способов питания, взаимоотношений и т.д. ископаемых организмов.

В качестве примера рассмотрим объекты, расположенные в палеонтологическом музее в Коньково (Юго-запад Москвы). В музее находятся скелеты крупных животных, живших в конце пермского периода в Архангельской области:

- скелет крупного саблезубого хищника *Inostrancevia* (рис. 6.6);
- скелеты крупных растительноядных ящеров – *парезавров* (рис. 6.7);

Иностранцевия и парезавры – это ящеры. Парезавры – ящеры из группы, на вершине эволюции которой находятся черепахи, а иностранцевия – другая группа древних ящеров, на вершине эволюции которых находятся млекопитающие.



Рис. 6.6. Скелет саблезубого хищника *Inostrancevia*



Рис. 6.7. Скелет парезавра

Иностранцевия и парезавры жили бок о бок, в одних и тех же местах. При этом исходя из внешнего вида ящеров (рис. 6.8), которые удалось воссоздать, палеозавры – растительноядные существа и предпочитали плавать. Аналогично современным бегемотам парезавры имели толстую кожу, в этой коже у них росли толстые костяные пластинки. Иностранцевии имели большие клыки, длина которых определяется шкурой жертвы. Иностранцевия была покрыта шерсткой, имела длинные усы.



Рис. 6.8. Внешний вид иностранцевия (слева) и парезавра (справа)



Рис. 6.9. Реконструкция внешнего вида и взаимодействия иностранцевии и парезавра

Другой задачей палеонтологии является *определение геологического возраста пластов*, в которых найдены ископаемые остатки. Эта специальность называется *биостратиграфией*.

Слои (рис. 6.10) внешне не содержат информации о возрасте, однако наличие в них скелетов древних организмов (рис. 6.11) помогает решить этот вопрос.

Специфика обучения палеонтологов заключается в том, что специалистам необходимо отличать различные виды ископаемых остатков для точной датировки возраста пород.



Рис. 6.10. Слои горных пород



Рис. 6.11. Скелеты древних
организмов

Пример работы палеонтологов

На Северной окраине Саратова существует карьер (рис. 6.14) ТЭЦ-5. Слово ТЭЦ расшифровывается как тепло-электро централь. Вокруг Саратова есть несколько ТЭЦ. В этом небольшом карьере есть небольшая стенка глин (около 11 м), в которых находится большое количество ископаемых организмов. Геологический разрез ТЭЦ-5 изображен на рисунке 6.12. В разрезе было найдено большое количество крупных раковин аммонитов (рис. 6.13).

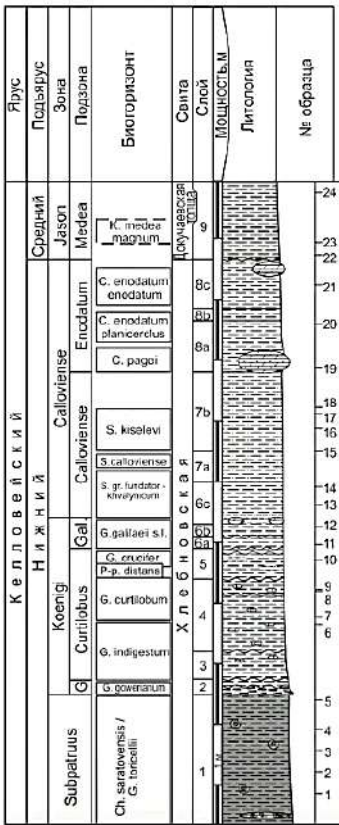


Рис. 6.12. Разрез ТЭЦ-5, Саратовская обл.



Рис. 6.13. Раковины аммонитов

У головоногих моллюсков была быстрая эволюция в прошлом: по смене одного вида за другим удалось различить узкие по времени интервалы, которые называются *датировками разреза по аммонитам*.

В 24 образцах микропалеонтологии обнаружены раковины микроскопических (в диаметре до 1 мм) одноклеточных фораминифер (рис. 6.15). Оказалось, что фораминиферы, встреченные во всем разрезе, эволюционировали не так быстро, как аммониты, поэтому тот же интервал разреза по фораминиферам удалось достоверно разбить на два разных, хорошо различимых стратиграфических интервала.



Рис. 6.14. Карьер на северной окраине Саратова

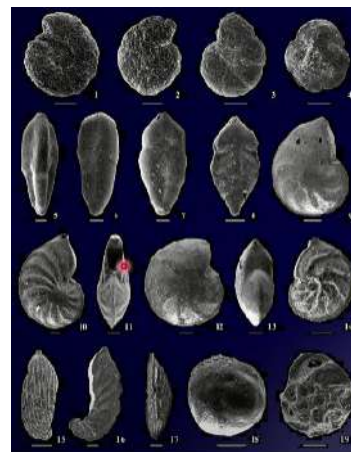


Рис. 6.15. Раковины одноклеточных фораминифер

В тех же образцах были найдены и микроскопические раковины многоклеточных остракод (рис. 6.16), которые позволили различить в геологическом разрезе два интервала.

Граница между интервалами по фораминиферам и по остракодам находятся на разных уровнях разреза.

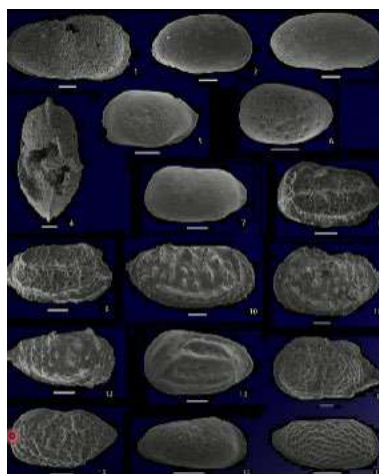


Рис. 6.16. Раковины многоклеточных остракод

Таким образом, аммониты позволяют различить детальное время в разрезе. Фораминиферы и остракоды показывают изменения древних условий, т.е. эволюцию ископаемой среды на разных уровнях разреза.

6.2. Направления палеонтологии

Направлениями палеонтологии являются:

- *палеоэкология* (в каких условиях жили те ископаемые животные, которые мы нашли в разных слоях разреза);
- *палеогеография* (как выглядело и менялось со временем то место, где жили найденные нами животные).

Примеры

Вокруг Москвы существует много карьеров, где добывают белый известняк. Например, карьер Домодедово (рис. 6.17) работает до сих пор. В нижней части карьера можно найти ископаемые остатки микроскопических фузулинид. Сверху на каменноугольных известняках располагается слой темно-серой грязной глины юрского периода, в которой можно найти остатки фораминифер, остракод и др. ископаемых. Третий слой карьера – глины и пески четвертичного периода.

Изучая эти три слоя разновозрастных осадков в карьере, можно извлечь из каменноугольного известняка раковины брахиопод, которые предпочитали обитать на глинистых мягких грунтах. Кроме того, из известняка можно извлечь колонии ископаемого коралла или следы ползания червей внутри осадка (рис. 6.18). Привычки обитания организмов дают информацию об обстановке в каменноугольное время.



Рис. 6.17. Карьер Домодедово на окраине Москвы



Рис. 6.18. Следы ползания червей внутри осадка

Палеоэкологическая реконструкция

Реконструкция обстановки в карьере Домодедово в каменноугольное время показана на рисунке 6.19. На дне находилось много мягкого вязкого илистого грунта, в котором встречались скальные выходы или камни. К ним прирастали морские лилии, колониальные и одиночные кораллы. В толще осадков ползали невидимые на реконструкции черви, в правом нижнем углу показаны брахиоподы. Это называется *палеоэкологической реконструкцией*.



Рис. 6.19. Московское каменноугольное море (354 - 292 млн, лет назад)
(палеоэкологическая реконструкция)

Палеогеографическая реконструкция

Палеогеографическая реконструкция для раннего карбона показана на рисунке 6.20. В каменноугольном периоде Москва (место отмечено красной звездочкой) находилась в северных субтропиках и была покрыта очень теплым и очень мелким морем.

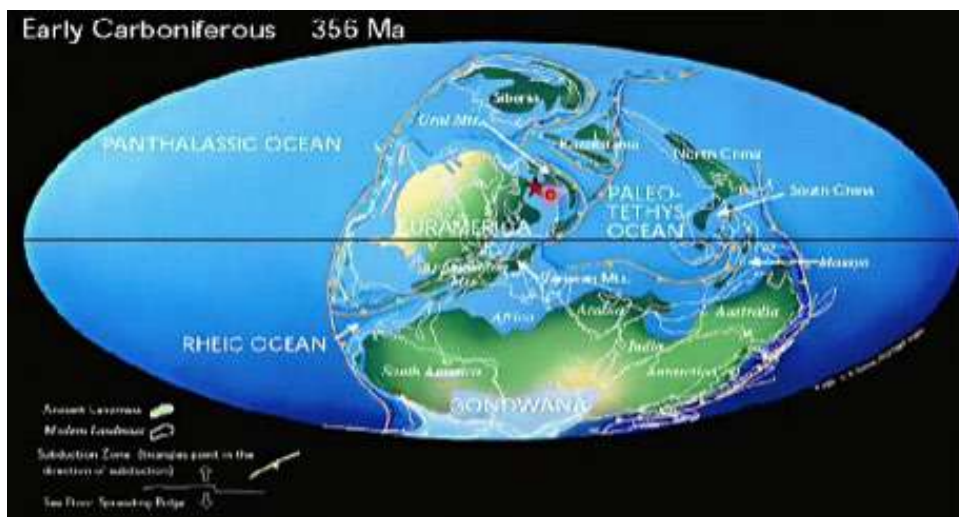


Рис. 6.20. Палеогеографическая реконструкция для раннего карбона

В ранней юре (рис. 6.21) Подмосковье оставалось приподнятой сушей. А в средней юре (в батское время) суша стала опускаться, появилась сеть речных долин и крупных озер. В этот момент на территории существовало множество сухопутных животных. В средней юре по берегам подмосковных озер ходили динозавры.

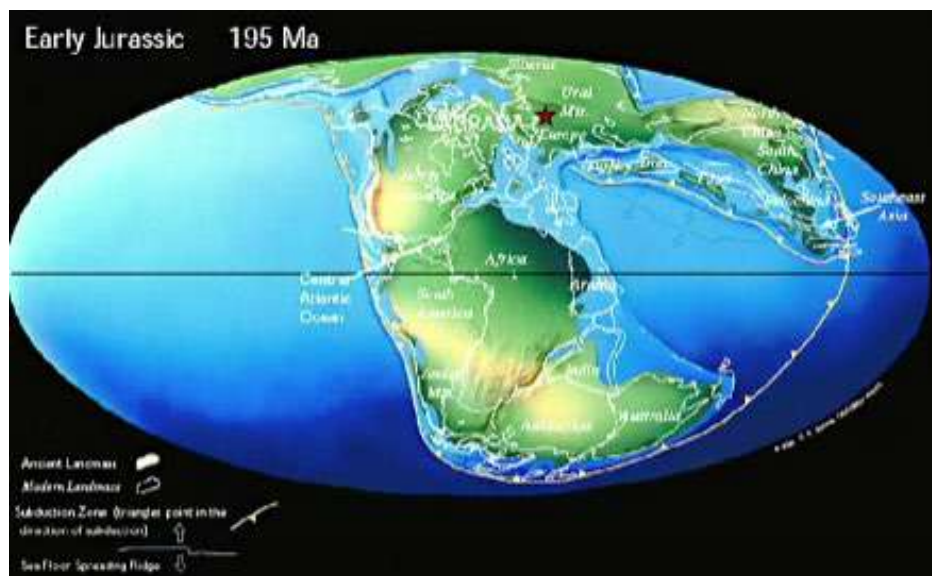


Рис. 6.20. Палеогеографическая реконструкция для ранней юры

О наземных обитателях этого периода стало известно благодаря находке в карьере Пески остатков рыб (акул, двоякодышащих рыб и химер), амфибий, рептилий (водных черепах, ящериц, динозавров, крокодилов) и древних млекопитающих.

Все они (кроме динозавров и млекопитающих) были обитателями большого пресного озера, куда стекались мелкие реки. Динозавры оказались родственниками велоцирапторов (рис. 6.21). Найдены и остатки растений, росших на берегах озера.



Рис. 6.21. Динозавр, родственник велоцирапторов

Когда батская эпоха сменилась келловейской эпохой в Подмосковье пришло море, которое светилось по ночам (рис. 6.22). Это известно благодаря находкам динофлагеллят.

В келловейских отложениях находят остатки скелетов типичных обитателей – аммонитов (рис. 6.23), белемнитов, крупных морских ящеров (ихтиозавров (рис. 6.24) и плезиозавров).



Рис. 6.22. Динофлагелляты на берегу моря



Рис. 6.23. Раковина аммонита



Рис. 6.24. Ихтиозавры

В четвертичном периоде Подмоскowie испытывало ледниковый период. В этот момент на территории современной Москвы обитали мамонты (рис. 6.25, 6.26).



Рис. 6.25. Древние мамонты



Рис. 6.26. Кость мамонта

6.3. Роль палеонтологии в датировании горных пород

Знание геологического строения региона и его палеогеографии позволяет прогнозировать поиски полезных ископаемых.

Рассмотрим на примере Западной Сибири (рис. 6.28) ситуацию, когда на территории отсутствуют карьеры. В западной Сибири множество болот. Одновременно с этим огромная территория занята важной формацией – *Баженовской толщей*, которая

содержит нефть. Вопрос состоит в том, как геологи понимают, в каком месте необходимо пробурить скважину для добычи. Для этого было пробурено множество скважин и взят керн, в котором были обнаружены микроскопические скелеты остракод и фораминифер, с помощью которых были изучены горные породы. В результате была получена модель Баженовской свиты (рис. 6.27), которая изображена тонкой темно-синей линией. Баженовская толща залегает на разных глубинах в пределах своего распространения.

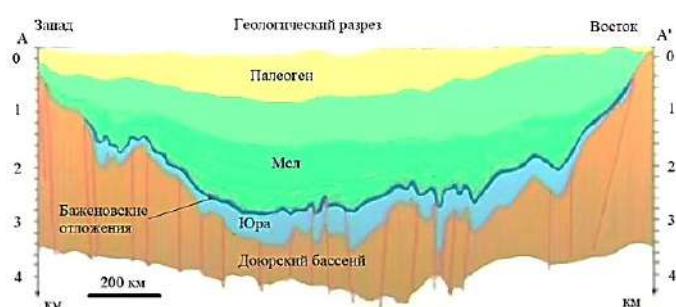


Рис. 6.27. Геологическое строение Западной Сибири



Рис. 6.28. Карта Западной Сибири

Реконструкция эволюции

Еще одно направление палеонтологии – реконструкция эволюции. Принято различать *макроэволюцию* и *микроэволюцию*.

Микроэволюция занимается эволюцией нескольких видов внутри одного рода (рис. 6.29).

Макроэволюция занимается реконструкцией развития крупной группы/класса/отряда различных организмов (рис. 6.30)

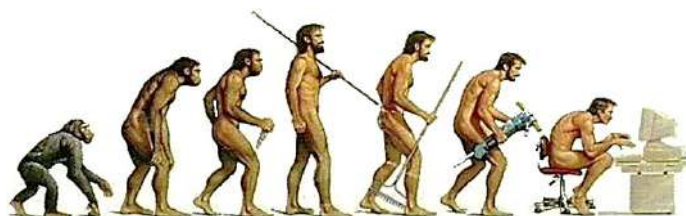


Рис. 6.29. Эволюция человека (микроэволюция)



Рис. 6.30. Пример макроэволюции

Лекция 7. Геологические карты: зачем они нужны и как их составляют

Задач у геологии великое множество:

- поиски полезных ископаемых;
- изучение вещества и ископаемых;
- изучение глубинного строения Земли;
- составление геологических карт;
- изучение современных процессов;
- инженерно-геологические изыскания.

Одной из базовых задач в геологии является составление геологических карт – *геологическое картирование*.

7.1. Геологическая карта

Геологическая карта (рис. 7.1) – схема, содержащая большое количество информации. Геологические карты бывают разных масштабов: региональные (охватывают территорию отдельных стран или континентов), крупномасштабные (составляются для небольших территорий). При построении карты выбор масштаба зависит от целей геолога.

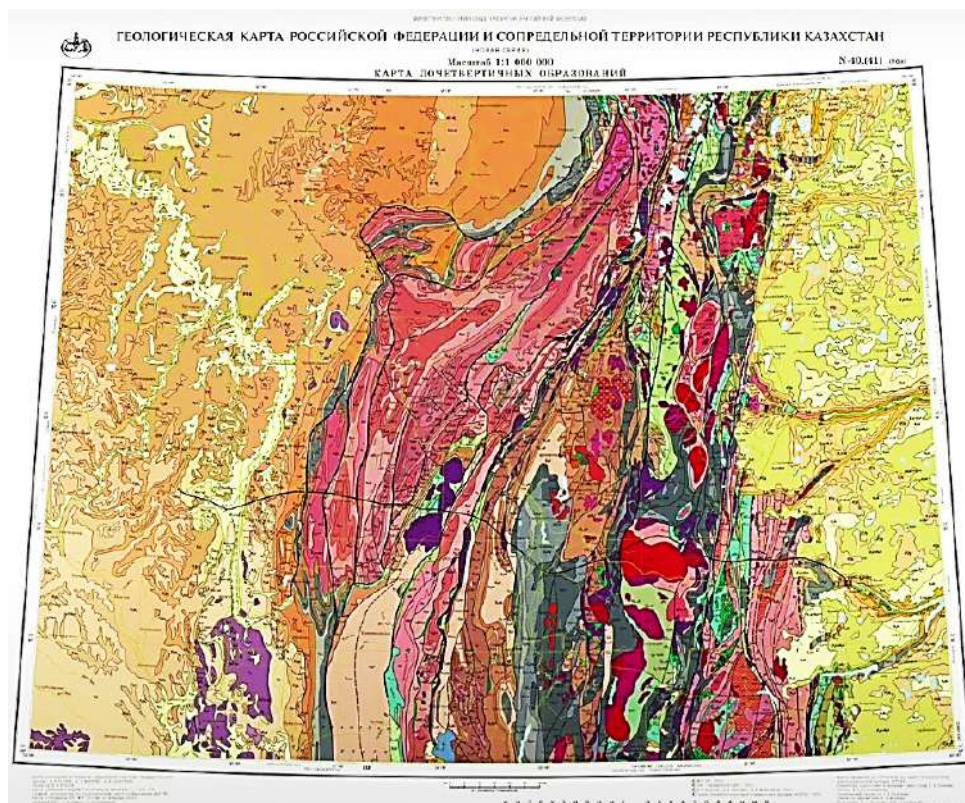


Рис. 7.1. Геологическая карта Российской Федерации и сопредельной территории республики Казахстан

Рассмотрим топографическую карту (рис. 7.2), отображающую рельеф и содержащую несколько типов основной информации: высоты (линии рельефа и отдельные отметки высот), гидросеть, дороги (шоссе и железные дороги), населенные пункты и др. У топографических карт задача отразить данные о поверхности.

Данные, которые содержит геологическая карта (рис. 7.3):

- возраст геологических объектов;
- состав;
- происхождение;
- взаимоотношения с окружающими объектами;
- положение в пространстве;
- полезные ископаемые.

Геологическая карта отражает не только модель рельефа, но как (под какими углами) горные породы уходят на глубину и как они ориентированы в пространстве.



Рис. 7.2. Топографическая карта



Рис. 7.3. Геологическая карта

7.2. Историческая справка

Первые карты появились давно. Одной из первых схематических карт считают схему, нарисованную на туринском папирусе (рис. 7.4), которая датируется ок. 1150 гг. д.н.э. На схеме изображен фрагмент золотого месторождения. Под цифрой 2 обозначена гора золота, ниже обозначены трубы, по которым вывозили золото.

Полноценные геологические карты появились в начале 19 века. Стратиграфическая шкала (рис. 7.5), датированная 1815 годом, сделана в привычных для современного геолога цветах. В каждой точке планеты одни и те же периоды покрашены в одни и те же цвета, за исключением Северной Америки, где шкала немного отличается. Цветом показывается возраст пород на геологических картах (рис. 7.6). Таким образом, существует универсальная общепринятая модель истории развития жизни на Земле.

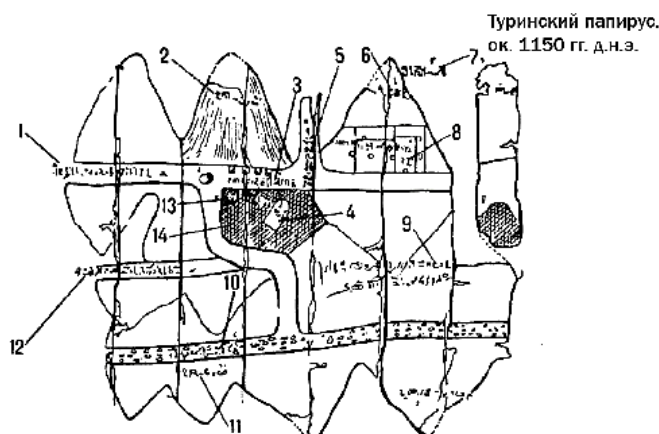


Рис. 7.4. Дорога, которая ведет к морю' (1), 'Гора золота' (2). Дома поселения золотоискателей' (3), 'Гора, в которой промывается золото, она обозначена эти красным цветом' (9).

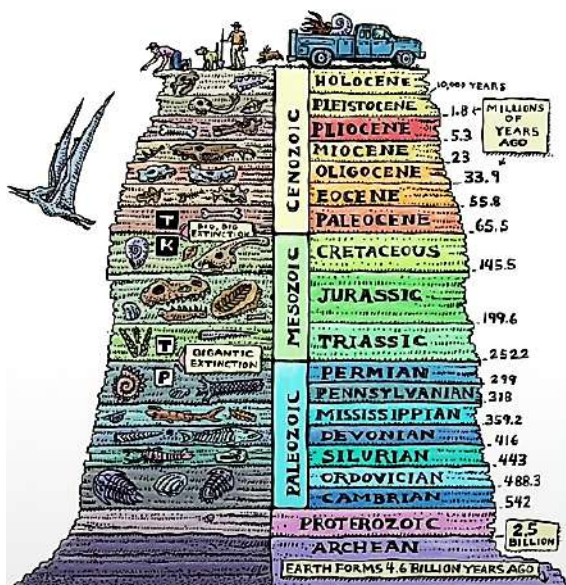


Рис. 7.5. Стратиграфическая шкала, 1815 г.



Рис. 7.6. Карта Англии и Уэльса Ульяма Смита, 1815 г.

В 17 веке никто не задумывался об смене фауны на планете. Очевидно, что каждый отдельный организм смертен, но казалось, что виды не сменяются – об этом не было никаких свидетельств. Возможно, отдельные громадные кости/зубы расценивались как признаки существования гигантских созданий, однако люди могли считать, что они жили до сотворения человека: «Животные не вымирают. Разве что великаны. Единожды сотворенные, они живут на Земле вечно. Может быть меняются, но очень незначительно».

Представить существование животных, столь сильно отличающихся от современных, бывает сложно. Например, такое животное, как показано на рисунке 7.7.

В начале 18 века итальянский горный инженер, естествоиспытатель Джованни Ардуино (1714-1795 гг.) (рис. 7.8) предложил разделить историю развития Земли на этапы:

- Первичный – допотопный.
- Вторичный – потопный.
- Третичный – послепотопный.
- Четвертичный – современный.



Рис. 7.7. Животное, существовавшее около 600 млн лет назад



Рис. 7.8. Джованни Ардуино (1714-1795 гг.)

Причина деления на этапы заключалась в том, что горные породы – разные, т.е. необходимы периодизация.

В конце 18 века французский естествоиспытатель, натуралист Жорж Леопольд Кювье (1769-1832) (рис. 7.9) развил и уточнил исследование Д. Ардуино. На этот момент приходится расцвет палеонтологии: изучение живых и ископаемых организмов стало модно – большое количество исследователей аккуратно описывали современные виды, фрагменты ископаемых организмов, которые они находили, классифицировали и далее обсуждали, обменивались коллекциями и сравнивали между собой.



Рис. 7.9. Жорж Леопольд Кювье (1769-1832)



Рис. 7.10. Древние птеродактили

Жорж Леопольд Кювье считается основателем сравнительной анатомии и палеонтологии и является членом Французского географического общества. Он ввёл разделение царства животных на четыре типа.

Изучение современных организмов и остатков от современных организмов позволяло постепенно понимать, как, глядя на скелет организма (рис. 7.10), предположить его вид.

Жорж Кювье обнаружил, что в последовательностях горных пород видна смена фауны (рис. 7.11): в пределах каждого слоя развита своя фауна.

Теория катастрофизма. В ходе исследования была предложена следующая модель: история развития Земли как череда катастрофических явлений (Всемирных потопов?). Некоторые натуралисты выделяли около 20 таких этапов.

Чарльз Лайель (рис. 7.13) обнаружил, что фаунистические комплексы не сменяются резко (рис. 7.12). На самом деле, смена комплексов происходит постепенно: вверх по разрезу можно наблюдать, что преобладающие в основании разреза раковины, постепенно исчезают и доминирующее место занимают другие организмы. Этот факт положил конец теории катастрофизма.

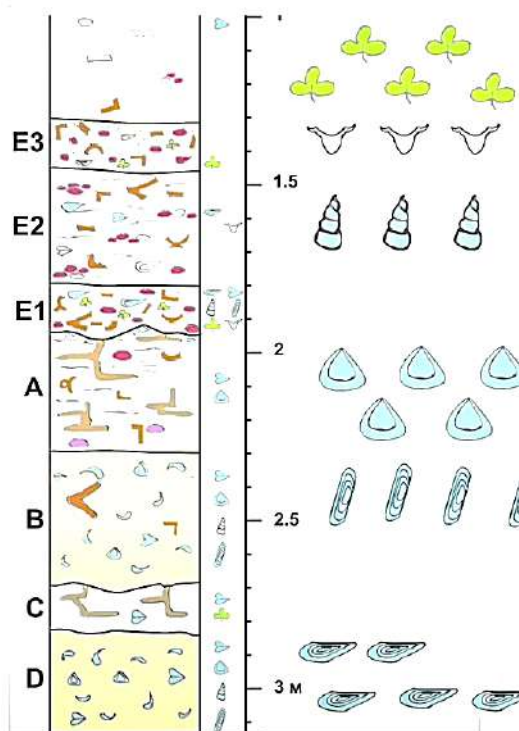


Рис. 7.11. Схематичный разрез, показывающий смену фаунистических комплексов

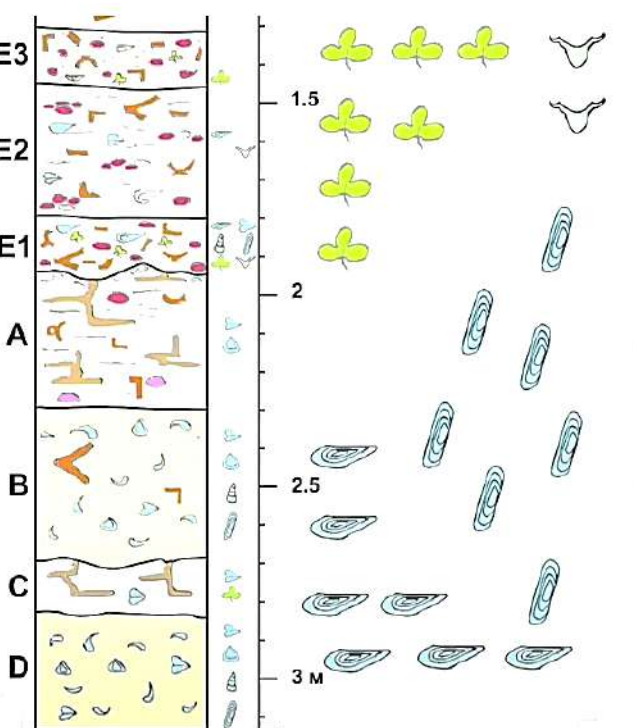


Рис. 7.12. Схематичный разрез, показывающий не резкую смену фаунистических комплексов

Анализ комплексов позволил Чарльзу Лайелю составить единую последовательность (рис. 7.14). Это означает, что если в разных частях мира будут найдены фрагменты раковин одного вида, то их можно определять в один возраст.

Фактически, таким образом ученые научились определять относительный возраст горных пород.

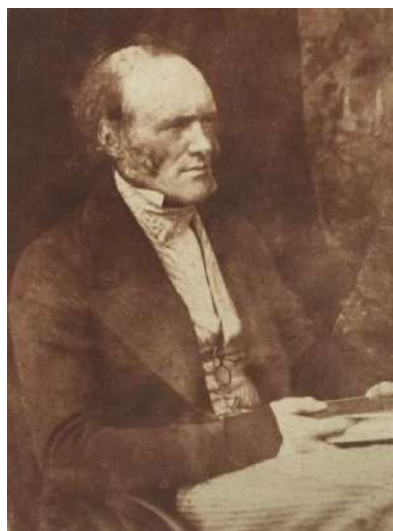


Рис. 7.13. Чарльз Лайлель

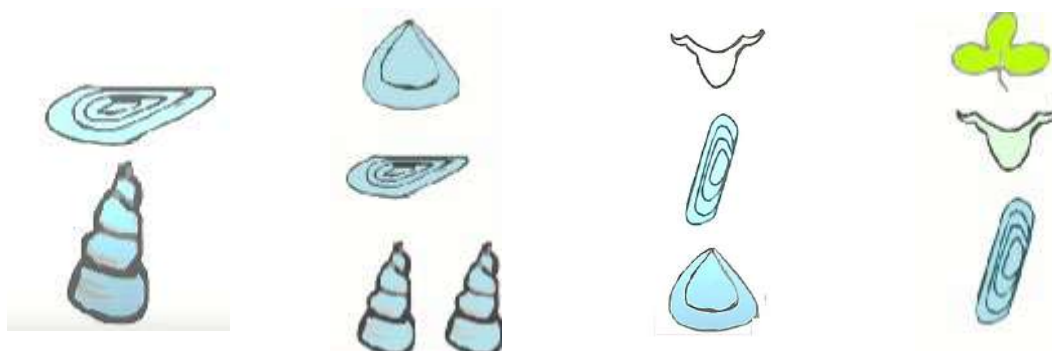


Рис. 17.14. Общая шкала последовательности комплексов

Чарльз Лайлель предположил, что все геологические процессы, которые мы наблюдаем сегодня, происходили и в прошлом, с теми же скоростями, действовали по тем же законам и с той же мощностью.

В настоящий момент все геологические построения базируются на этом принципе.

Создание геологических карт

В 1845 году была создана геологическая карта (рис. 7.15) двумя английскими геологами А. Седжвиком и Р. Мурчисоном. Они объездили всю Европу и изучали геологию. В том числе, они побывали в европейской части Российской империи и открыли отложения пермской системы. Большинство название периодов (силурийский, девонский, пермский, триасовый) были предложены и выделены ими. Таким образом, появлялась систематизированная упорядоченная геология, как механизм понимания территории.

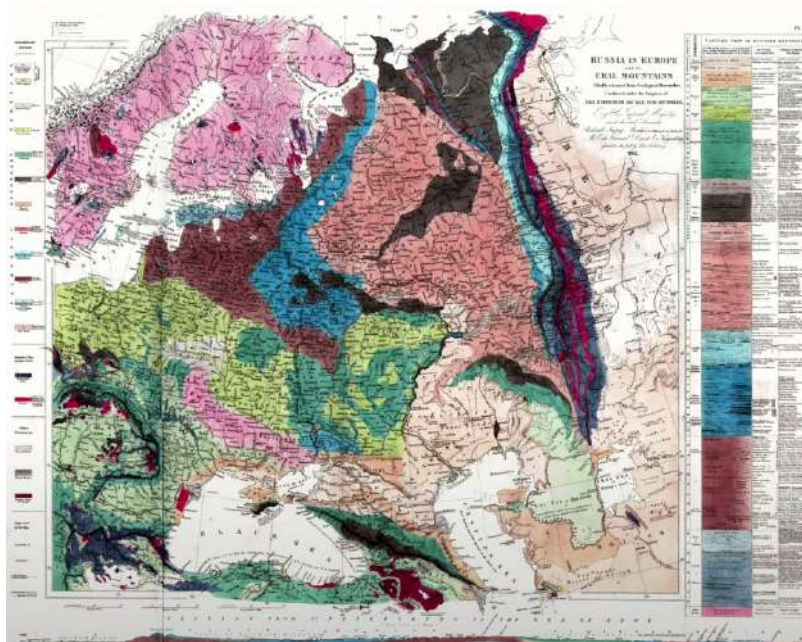


Рис. 7.15. Геологическая карта Европейской части России и Урала, 1845 г.

В самом начале геологи не использовали единую цветовую шкалу, поэтому геологические карты выглядели по-разному. Карта (рис. 7.16) составлена для той же территории, что и карта (рис. 7.15), однако они в принципиально разных цветовых шкалах. Это привело к тому, что к концу 19 века появляется унифицированная цветовая шкала (рис. 7.17) – международная геохронологическая/стратиграфическая шкала.

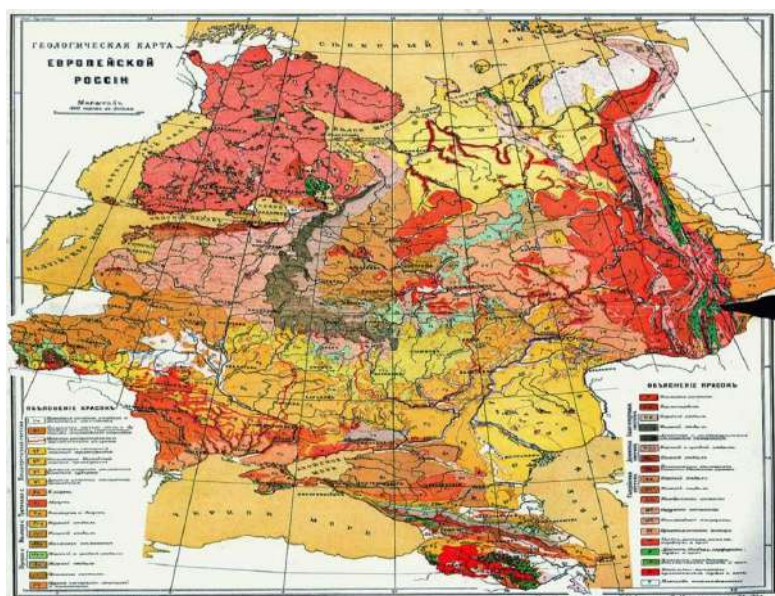


Рис. 7.16. Геологическая карта из словаря Брокгауза и Ефрона, 1890-1907 гг.

С помощью ископаемых организмов может определяться только относительный возраст, а цифры на хроностратиграфической шкале обозначают абсолютный возраст.

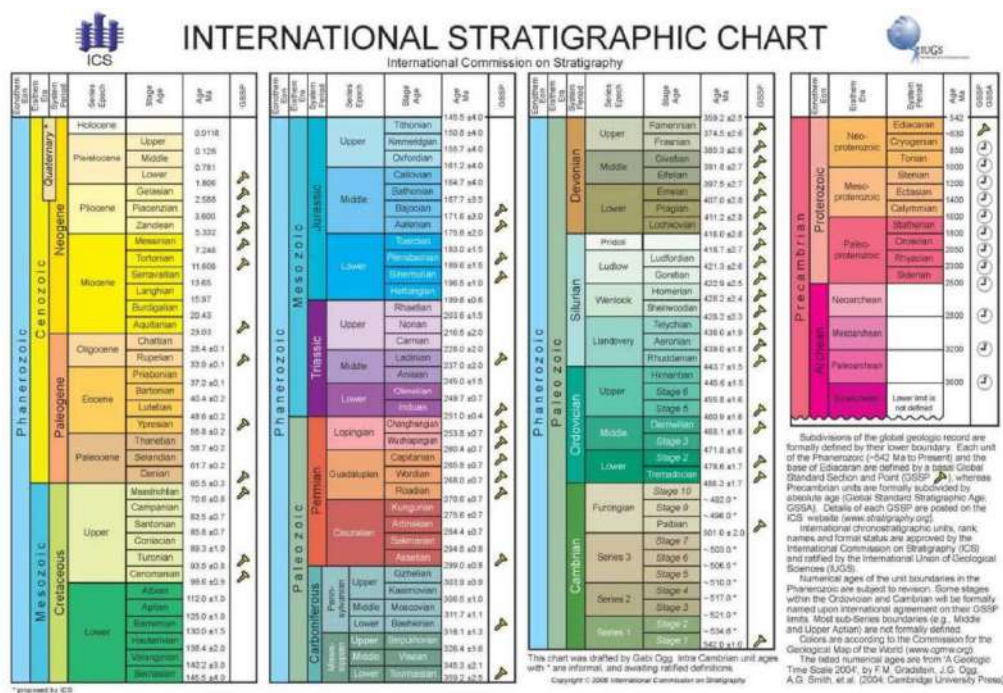


Рис. 7.17. Международная хроностратиграфическая шкала

Абсолютный возраст пород

С середины 20 века появляются геохимические методы, которые позволяют рассчитывать абсолютный возраст горных пород с точностью до 10-0.1 млн. лет. В породах присутствуют устойчивые минералы, такие как, например, циркон (рис. 7.18), которые не разрушаются процессами. Они содержат в себе уран и свинец/торий, по концентрации которых можно определить, как давно зерно образовалось.

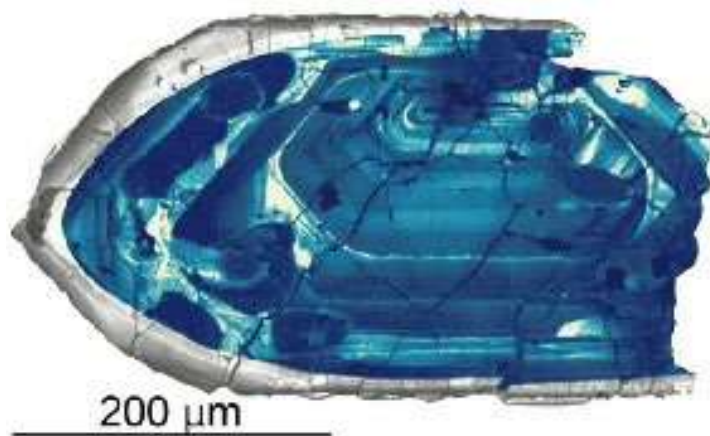


Рис. 7.18. Кристалл циркона

7.3. Создание геологической карты

Этап 1. Подготовительные работы

Создание геологической карты начинается с подготовительных работ: изучение дистанционных методов работ (аэро- и космических снимков) (рис. 7.19). Это необходимо, чтобы эффективно построить последовательность работ.



Рис. 7.19. Аэрофотоснимок. Южная Африка

Кроме того, при подготовке проходит изучение геофизических материалов (рис. 7.20, 7.21). Эти данные отражают состав горных пород: более тяжелые и плотные породы будут создавать аномалии гравитационного поля, а породы с более выраженными магнитными свойствами будут создавать аномалии магнитного поля. Таким образом, можно будет выделить зоны одинакового или же выделяющегося строения.

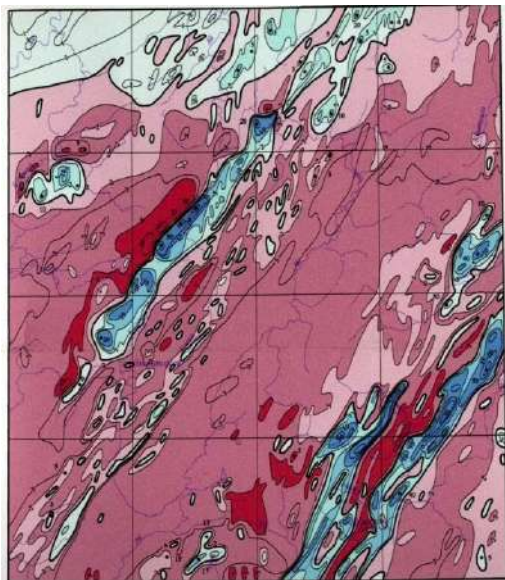


Рис. 7.20. Карта аномального магнитного поля на лист N-40-XII (Златоуст)

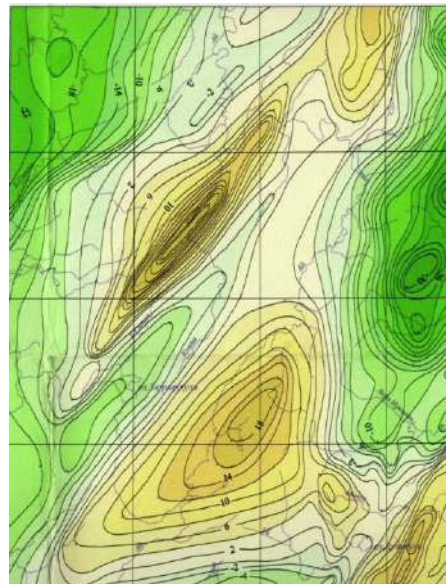


Рис. 7.21. Карта аномального гравитационного поля на лист N-40-XII (Златоуст)

На первом этапе проводится и изучение материалов предшественников. Копии результатов геологических работ (рис. 7.22) обязательно отправляются в геологический фонд. В фонде обобщены данные всех геологов.

Этап 2. Полевые работы

После этого проводятся полевые работы (рис. 7.23).

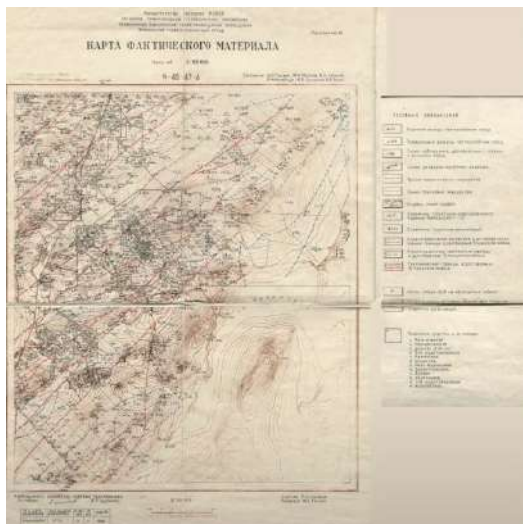


Рис. 7.22. Копия геологической карты



Рис. 7.23. Геолог на Южном Урале, хр. Нурали

Геологи используют буровые станки для того, чтобы узнать какие породы находятся на глубинах в 100-200-300 м. Горные породы, извлеченные на поверхность в результате бурения (керн), тщательно изучаются и описываются (рис. 7.24).

Современные методы позволяют провести экспресс-анализ состава пород (рис. 7.25). Для этого существуют удобные небольшие анализаторы.

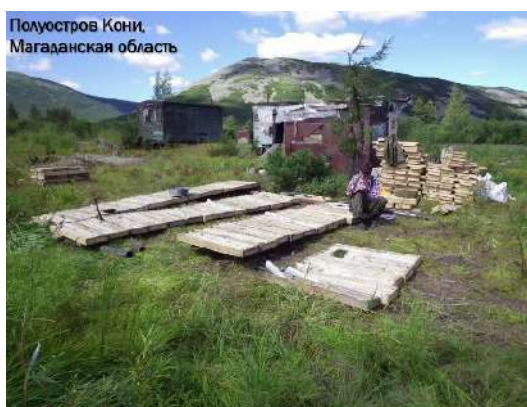


Рис. 7.24. Полуостров Кони, Магаданская область



Рис. 7.25. Полуостров Кони, Магаданская область

Часто геологи сталкиваются с некоторыми сложностями, такими как присутствие большого количества комаров/мошек, и нередко даже сталкиваются с медведями.

Геологи работают не только в полях, лесах, горах, но и на месторождениях (рис. 7.26).



Рис. 7.26. Бакальское железорудное месторождение, Южный Урал

Этап 3. Обработка материала

Изучение минерального состава пород проводится с помощью тонких срезов (шлифов) (рис. 7.27, 7.28).

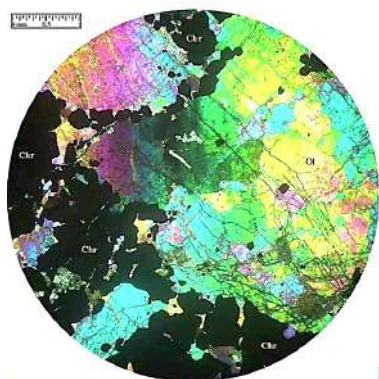


Рис. 7.27. Шлиф породы



Рис. 7.28. Шлиф породы

Из горных пород извлекается фауна и изучается под электронным микроскопом (рис. 7.29, 7.30).

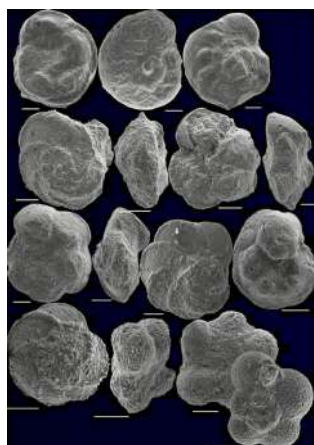


Рис. 7.29. Фораминиферы меловых отложений Крыма

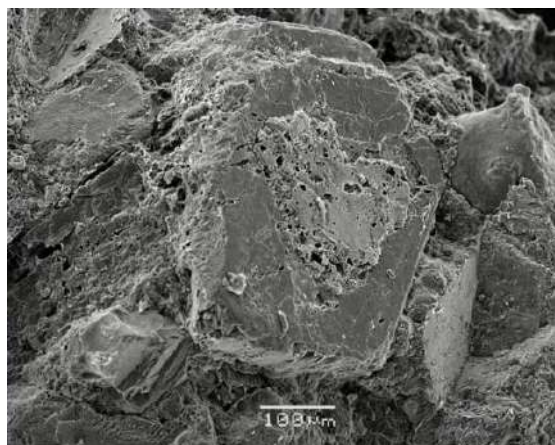


Рис. 7.30. Кристалл полевого шпата из глин, Крым

Далее геологи объединяют и собирают информацию и все полученные данные.

Пример построения изображения

Этап 1

Результаты дистанционных исследований:

1. Анализ космических снимков.
2. Геофизических полей.

По этим данным получены первые границы (рис. 7.31).

Этап 2

На первичные границы накладываются результаты полевых работ (рис. 7.32): белые точки – что-то нашли, красные точки – не дошли, серый фон – пришли, но ничего не увидели.

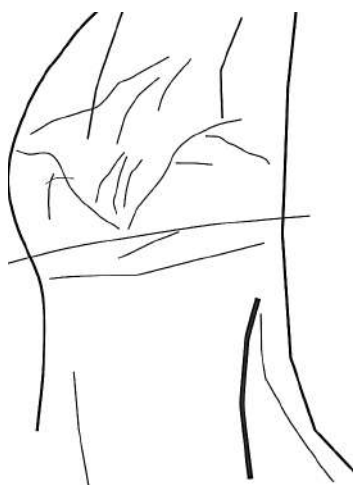


Рис. 7.31. Этап 1

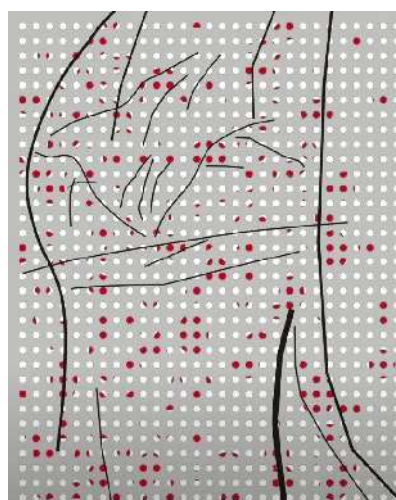


Рис. 7.32. Этап 2

Этап 3

Геологи обработали данные, которые собрали при полевых работах, и наложили на результат этапа 2 (рис. 7.33, левый). Данные содержат информацию о составе горных пород, их возрасте.

Этап 4

Карта составляется по результатам исследований и цветами показывается возраст и состав горных пород (рис. 7.33, средний).

К сожалению, геологи не могут узнать о реальном строении всего разреза.

Модель, которая строилась на протяжении 4 этапов окончательно выглядит как на центральном рисунке 7.33. А реально картинка выглядит так, как показано на правом рисунке 7.33. Это отражает суть построения геологических карт, так как множество деталей потеряно. Именно поэтому любая геологическая карта – это схематическая модель.

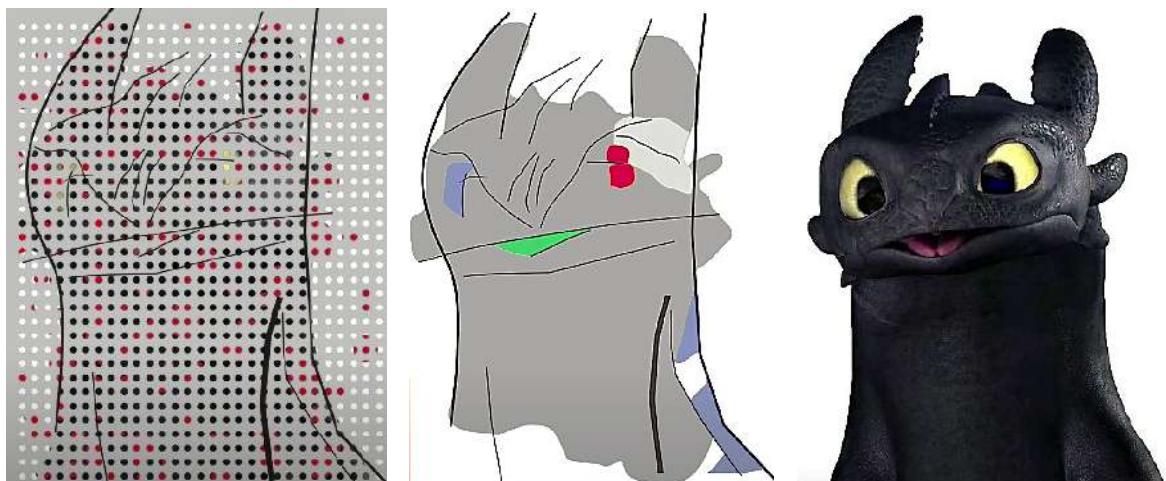


Рис. 7.33. Этапы 3-5

Реальная геологическая карта – гораздо более сложная (рис. 7.34). Геологическая карта – это трехмерный объект (рис. 7.35), поэтому к любой геологической карте создаются геологические разрезы.

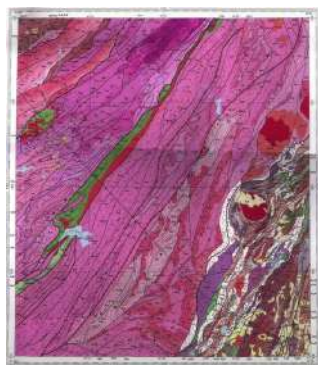


Рис. 7.34.

Геологическая карта
дочетвертичных
образований

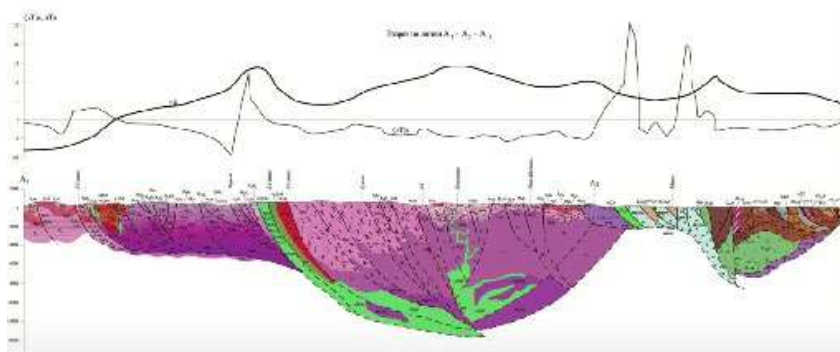


Рис. 7.35. Объемная модель территории

Назначение карт

Основная задача геологического картирования – это поиск полезных ископаемых. Кроме того, без картирования не обойдется ни одно строение дома.

Лекция 8. Инженерная геология. Часть 1. Грунтоведение

Инженерная геология – исследование инженерно-геологических условий верхних горизонтов земной коры.

Научные направления инженерной геологии:

- Грунтоведение – исследование состава, строения, состояния и свойств грунтов.
- Инженерная геодинамика – исследование морфологии, механизма, причин, закономерностей формирования и развития геологических процессов.
- Региональная инженерная геология – исследование инженерно-геологических условий различных структурных зон земной коры, закономерностей их пространственного распределения, формирования и изменения.

Земля – активная живая планета, на которой происходят различные геологические процессы. В результате этих процессов на Земле появляются горные породы. Чаще всего это можно наблюдать в областях активного вулканизма (рис. 8.1-8.4), например, на Камчатке, в Индонезии, Японии или Исландии – это места, где происходит стык литосферных плит. В таких зонах мантийное вещество выходит на поверхность.



Рис. 8.1. Вулкан Келимуту (Индонезия)



Рис. 8.2. Горелый вулкан (Камчатка)



Рис. 8.3. Асахидакэ (Япония)



Рис. 8.4. Вулканическая область Крафла (Исландия)

При этом вулканы с геологической точки зрения могут становиться активными неожиданно для человека. Например, вулкан Толбачик на Камчатке.

8.1. Магматические горные породы

Магматические горные породы образуются на поверхности или в толще земной коры в результате охлаждения и затвердевания магмы (силикатного расплава) (рис. 8.5).

При извержении вулкана Толбачик происходило как излияние лавовых потоков на поверхности (эффузивный тип), так и эксплозивное извержение, которое проявлялось как лавовые озера (рис. 8.6), из которых вылетали кусочки лавы, застывали и превращались в пористый шлак (рис. 8.6).



Рис. 8.5. Лава



Рис. 8.6. Лавовое озеро (слева), пористый шлак (справа), вулкан Толбачик, Камчатка

Породы, которые образуются при извержениях могут обладать одинаковым составом.

Для изучения строения и состава горных пород используются шлифы (тонкие срезы). Шлифы изучаются с помощью оптического электронного микроскопа. В составе пород (на примере рис. 8.7) присутствуют плагиоклазы – белые вытянутые

минералы, пироксены – коричневые оттенки на фотографии, основная масса образца представлена вулканическим стеклом (в микроскопе виден в черном плотном цвете).

Породы, рассмотренные в примере (рис. 8.7), по составу одинаковые, но по строению разные. В левом ряду фотографий порода – пористая, пузырчатая, в правом ряду порода – плотная.

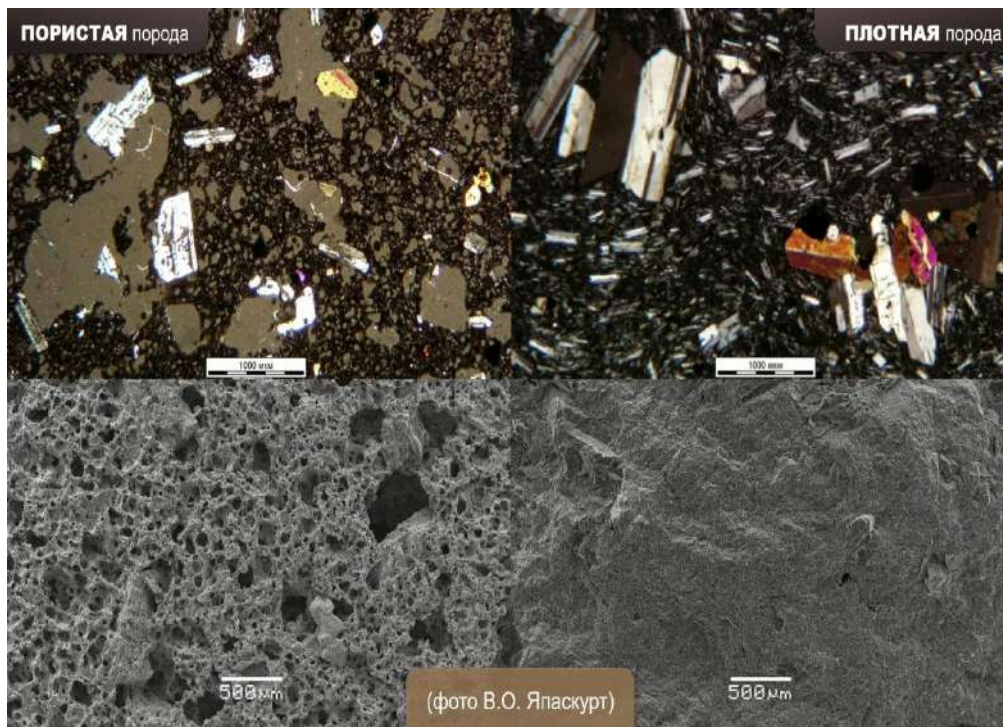


Рис. 8.7. Шлифы горных пород

Физические и физико-механические свойства пород

Инженерные геологи для магматических пород исследуют следующие свойства:

- ρ – плотность;
- ρ_s – плотность твердого компонента;
- n – пористость;
- n_o – открытая пористость;
- V_p – скорость прохождения продольных волн;
- V_s – скорость прохождения поперечных волн;
- μ – коэффициент Пуассона;
- E – модуль упругости;
- R_c – прочность на одноосное сжатие.

Плотность ρ – средний состав грунта/породы (твердое вещество, жидкое вещество и газовая составляющая).

Плотность твердого компонента ρ_s – средняя плотность минералов, которые входят горную породу.

Пористость бывает закрытая и открытая (сообщающиеся поры). Свойства открытой пористости особенно важны для нефтеносных грунтов.

Продольная волна – упругая волна, которая представляет собой деформации сжатия и растяжения. Продольные волны распространяются во всех веществах: в твердых, жидких и газообразных, так как все вещества сопротивляются объемному сжатию.

Поперечная волна – упругая волна, связанная с деформацией сдвига; распространяется только в твердых телах, так как в жидкостях и газах нет сдвига: нет упорядоченной структуры. Молекулы все время двигаются.

Скорости продольных и поперечных волн – важная характеристика для пород, которая помогает геофизикам оценивать данные и с помощью них определяется внутреннее строение Земли.

Коэффициент Пуассона μ – отношение поперечной и продольной деформации.

Модуль упругости E – коэффициент пропорциональности между напряжениями и деформациями (изменение линейных размеров тела).

Прочность на одноосное сжатие R_c – физико-механическое свойство – способность породы сопротивляться разрушению, т.е. это та нагрузка, которую может выдержать образец.

Физические и физико-механические свойства тесно связаны между собой. В законе грунтоведения используют: состав, строение, состояние, свойства. На диаграмме (рис. 8.8) показана зависимость прочности на одноосное сжатие от пористости пород: чем меньше пористость, тем выше прочность.

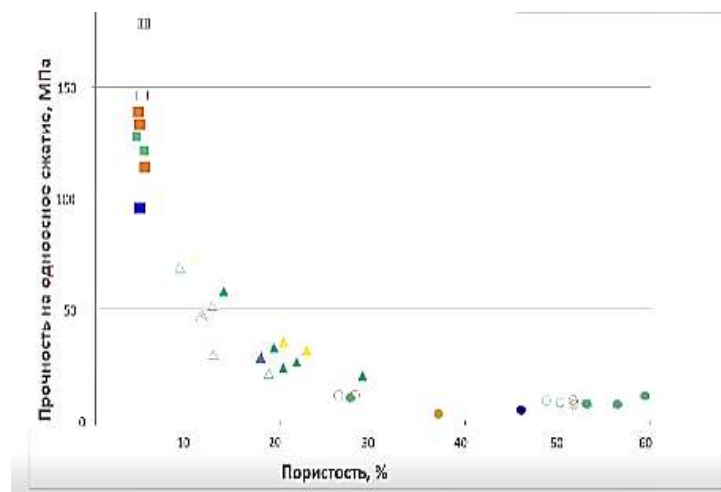


Рис. 8.8. Зависимость прочности на одноосное сжатие пород от их пористости

Воздействие внешних процессов

На поверхности Земли магматические породы начинают изменяться под воздействием внешних процессов, например, под воздействием воды. Особенно быстро

они начинают изменяться на территории, где существуют геотермальные районы (рис. 8.9, 8.10, 8.11).



Рис. 8.9. Термальные поля



Рис. 8.10. Паужетско-Кошелевский геотермальный район



Рис. 8.11. Паужетско-Кошелевский геотермальный район

Источники отличаются разным составом, температурами, что приводит к изменению исходных свойств пород. Прочные, плотные андезиты и базальты под

воздействием высоких температур, давления и разных по составу растворов превращаются в гидротермальные глины.

Глины и андезиты – совершенно разные по своим характеристикам грунты. Для них характерны разные процессы, которые определяют их свойства.

Эксперименты

Процессы можно исследовать в полевых условиях или в лаборатории. Температуры, при которых проводятся исследования могут достигать 200, 300 и 450°C, давление может достигать 16, 86 и 1000 бар (рис. 8.12).

Рентгеновская микротомография

В настоящее время геологи активно используют рентгеновскую томографию:

Сканирование исходного образца + сканирование измененного образца → выделение одинаковых объемов образца для максимальной точности, фрагментация изображений → морфологический анализ и численное моделирование (рис. 8.13).

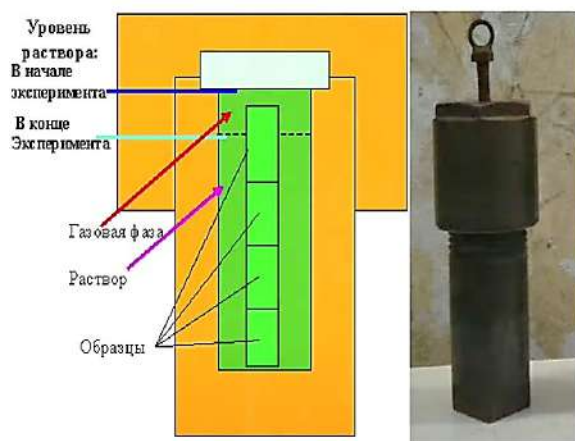


Рис. 8.12. Исследование образца в лаборатории



Рис. 8.13. Сканер SkyScan 1172

Рентгеновская микротомография – создание большого количества снимков в поперечном сечении образца (рис. 8.14). Снимки складываются и получается объемная модель.

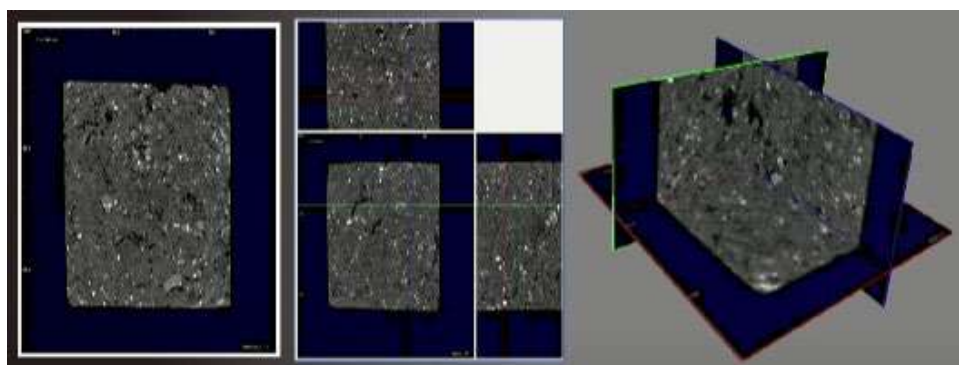
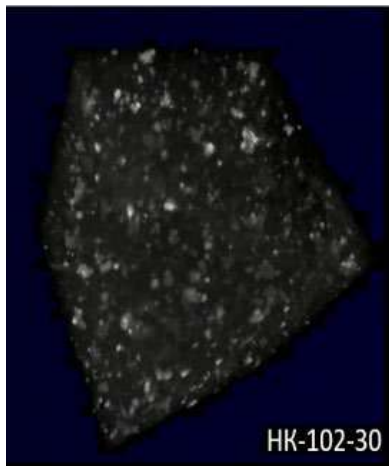


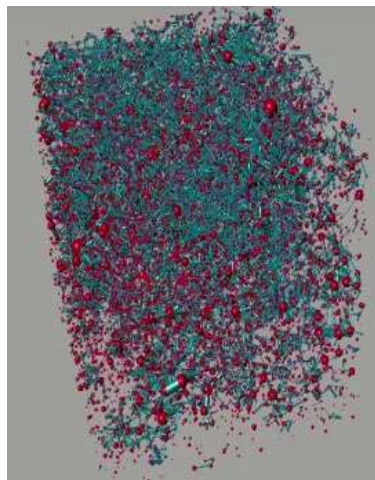
Рис. 8.14. Снимки образца в поперечном сечении (слева), 3D модель (справа)

Морфологический анализ и численное моделирование

Рентгеновская микротомография помогает подробно исследовать поровое пространство. Образец, представленный на фотографии (рис. 8.15, 8.16), обладает высокой открытой пористостью. Поры выделены красным цветом и соединены каналами (голубым цветом).

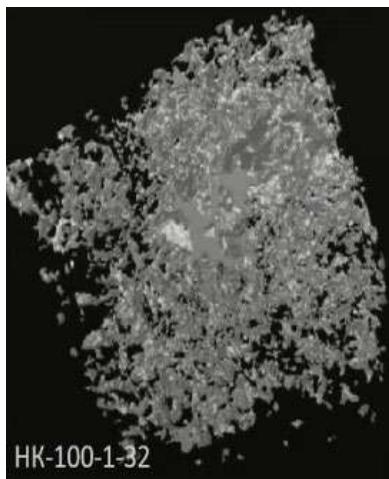


*Рис. 8.15. Визуализация
расположения тяжелых минералов
и порового пространства образцов*

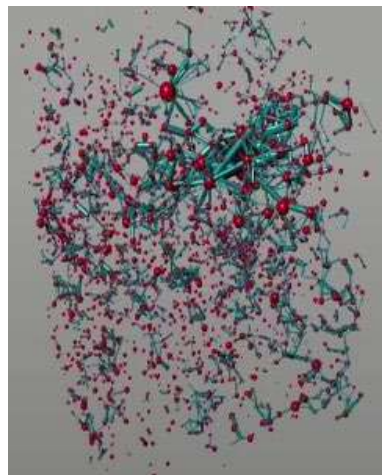


*Рис. 8.16. Сеточная модель пустого
пространства*

Образец, представленный на фотографии (рис. 8.17, 8.18), обладает меньше пористостью.



*Рис. 8.17. Визуализация
расположения тяжелых минералов
и порового пространства образцов*



*Рис. 8.18. Сеточная модель пустого
пространства*

Ниже представлен морфологический анализ для образца 1 (рис. 8.19, 8.20).

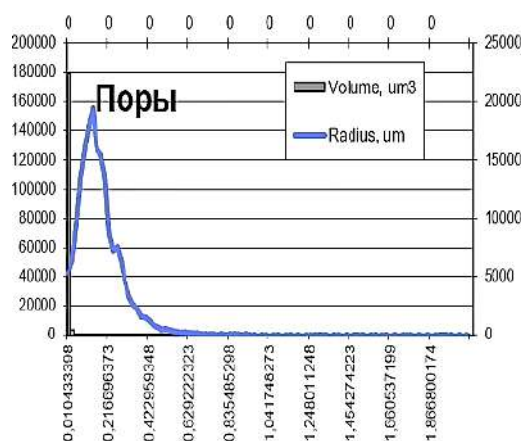


Рис. 8.19. Морфологический анализ (поры)

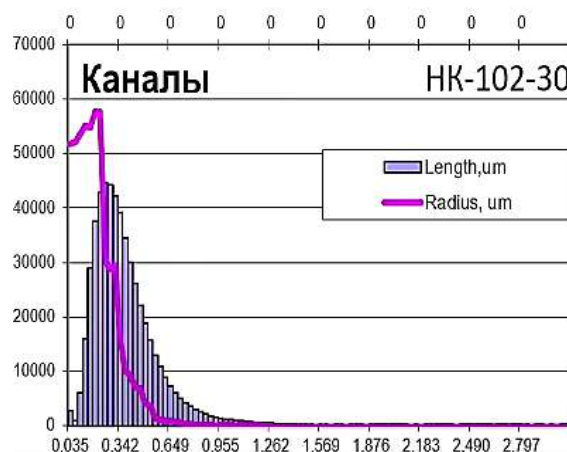


Рис. 8.20. Морфологический анализ (каналы)

С помощью рентгеновской томографии можно отдельно проследить, например, распределение рудных минералов или распределение порового пространства. Кроме того, для более подробного исследования используется электронный микроскоп, благодаря которому можно изучить каждый отдельный минерал (рис. 8.21).

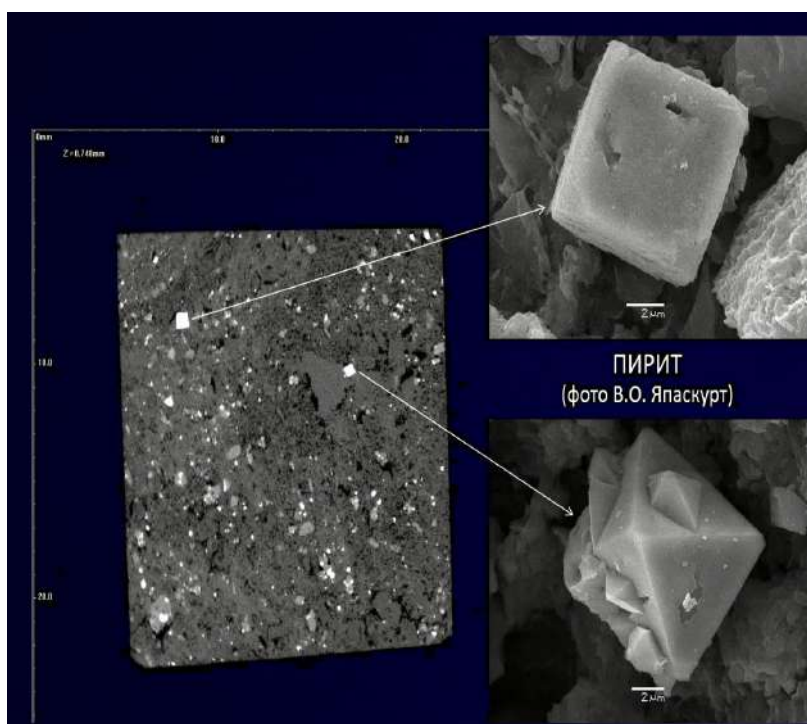


Рис. 8.21. Срез, полученный с помощью рентгеновской томографии

8.2. Осадочные горные породы

Осадочные горные породы образуются на поверхности земной коры (рис. 8.22) в результате: переотложения продуктов выветривания и разрушения различных горных

пород, химического и механического выпадения осадка из воды, жизнедеятельности организмов или всех этих процессов одновременно.



Рис. 8.22. Крым, Бахчисарайский район. Известняк и нуммулит

Классификация элементов

Дисперсный грунт – группа, включающая связный грунт (глинистый) и не связный (песчаный, гравийный) грунт.

Классификация элементов, составляющих дисперсный грунт, по размерам:

- Валуны (глыбы) – более 200 мм;
- Галька (щебень) – от 10 до 200 мм;
- Гравий (дресва) – от 2 до 10 мм;
- Песчаные – от 0,05 до 2 мм;
- Пылеватые – от 0,002 до 0,05 мм;
- Глинистые – менее 0,002 мм.

Физические и физико-механические свойства пород

Для дисперсных пород изучают следующие физические и физико-механические свойства пород:

- ρ – плотность;
- ρ_s – плотность твердого компонента;
- n – пористость;
- W_p – влажность нижнего предела пластичности;
- W_L – влажность верхнего предела пластичности;
- I_p – число пластичности;
- E – модуль деформации;
- ϕ – угол внутреннего трения;
- C – сцепление.

Плотность – средняя плотность составляющих породу структурных элементов (твердая и газовая фаза).

Пористость (пустотность) – свободное пространство, которое есть внутри породы. Пространство может быть заполнено воздухом или водой.

Влажность нижнего предела пластичности W_p – количество влаги, при которой грунт переходит из твердого состояния в пластичное.

Влажность верхнего предела пластичности W_L – количество влаги, при которой грунт начинает обладать свойством текучести.

Число пластичности I_p – разница верхнего и нижнего предела пластичности.

Модуль деформации E – деформационное свойство – предел нагрузки, которую грунт может выдержать.

Угол внутреннего трения φ – характеристика, показывающая угол естественного откоса.

Сцепление C – силы, удерживающие частицы вместе. В песчаных грунтах сцепление близко к 0.

8.3. Задачи грунтоведения

Инженерная геология изучает состав, строение и свойства грунтов. Эта информация необходима для строительства инженерных сооружений (рис. 8.23). Кроме того, магматические породы часто используют для облицовки зданий.



Рис. 8.23. Инженерные сооружения

Лекция 9. Инженерная геология. Часть 2. Инженерная геодинамика

Вспомним, что инженерная геология занимается исследованием инженерно-геологических условий верхних горизонтов земной коры.

Научные направления инженерной геологии:

- Грунтоведение – исследование состава, строения, состояния и свойств грунтов.
- Инженерная геодинамика – исследование морфологии, механизма, причин, закономерностей формирования и развития геологических процессов.
- Региональная инженерная геология – исследование инженерно-геологических условий различных структурных зон земной коры, закономерностей их пространственного распределения, формирования и изменения.

9.1. Эндогенные процессы

Эндогенные геологические процессы связаны с внутренними силами Земли.

Землетрясения

Землетрясение – это разгрузка напряжений, которая возникает на границе литосферных плит. При землетрясениях возникают упругие волны, распространение которых фиксируется сейсмоприемниками. Кроме того, возникают вторичные волны, связанные с деформациями сдвига.

Землетрясения происходят в определенных областях (рис. 9.1). Благодаря картированию этих областей появились границы литосферных плит. Красным цветом выделены землетрясения, которые оконтуривают более плотные и прочные участки земной коры.

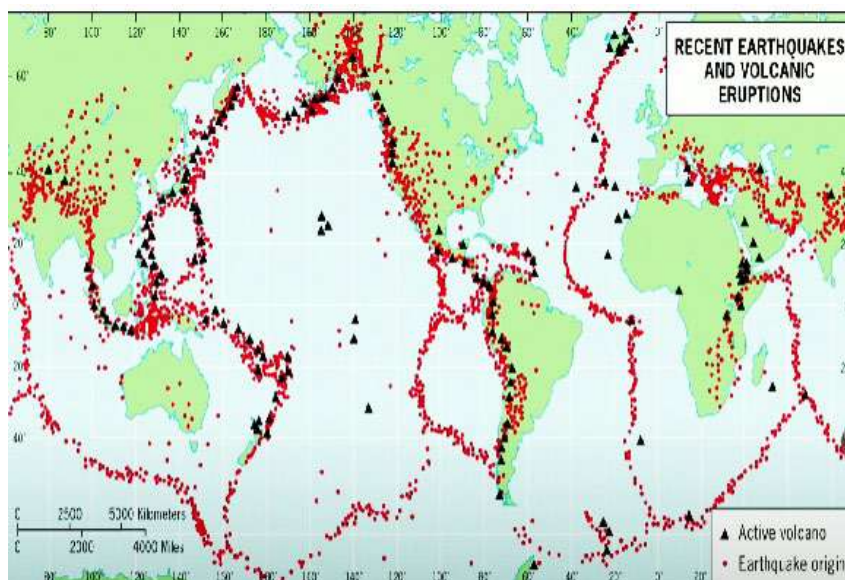


Рис. 9.1. Современные землетрясения и вулканические извержения

К ступам литосферных плит чаще всего приурочены вулканы, активность которых связана с поступлением магматического вещества на поверхность Земли. Магма, поступающая на поверхность Земли через вулканы, превращается в лаву.

Любой человек может на специальных сайтах посмотреть, в каких местах планеты сейчас происходят землетрясения (рис. 9.2).

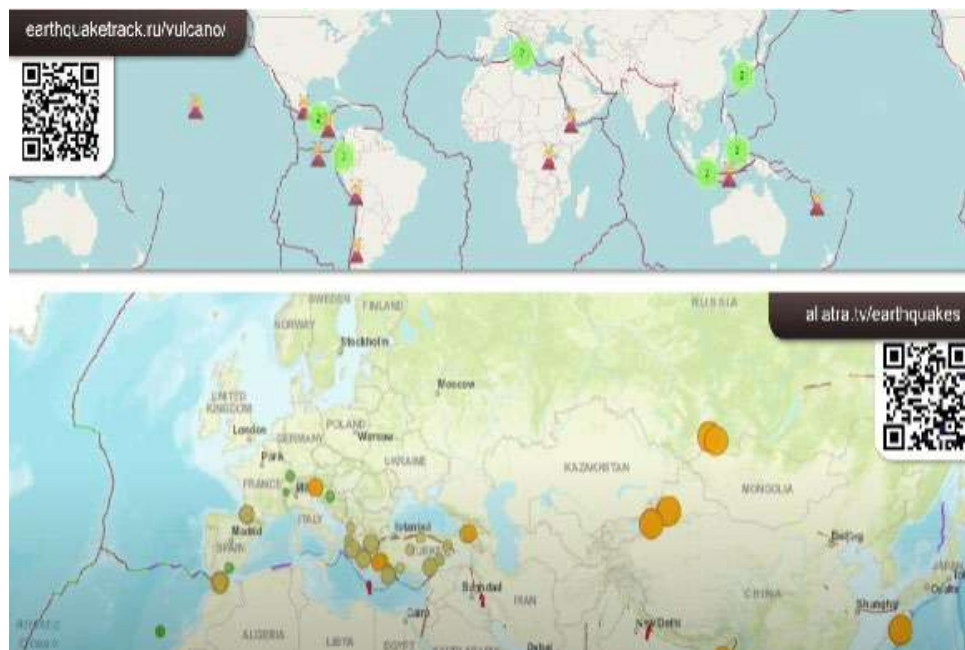


Рис. 9.2. Карты землетрясений

Землетрясение – внезапное освобождение потенциальной энергии земных недр в виде упругих продольных и поперечных волн, которые распространяются во всех направлениях.

За последние 180 произошло множество землетрясений (рис. 9.3), так как они совершаются практически каждую секунду. В день может произойти порядка 700 землетрясений. Большинство этих землетрясений имеют небольшую магнитуду, поэтому данные явления могут почувствовать только сейсмоприемники или отдельные животные, которые наиболее чувствительны к землетрясениям и изменениям природных условий.

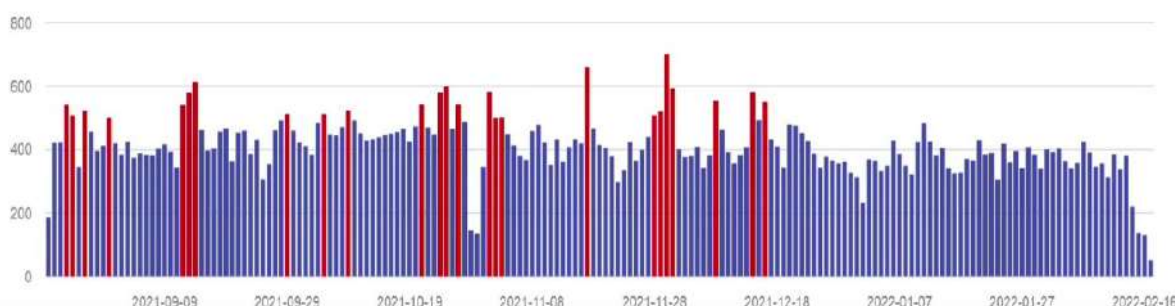


Рис. 9.3. Динамика землетрясений за последние 180 дней

Землетрясения с магнитудой 6+ могут привести к возникновению цунами (рис. 9.4). Цунами – это огромные волны, в океане их высота может достигать 10-20 м, а когда они подходят к берегу, то волна увеличивается.

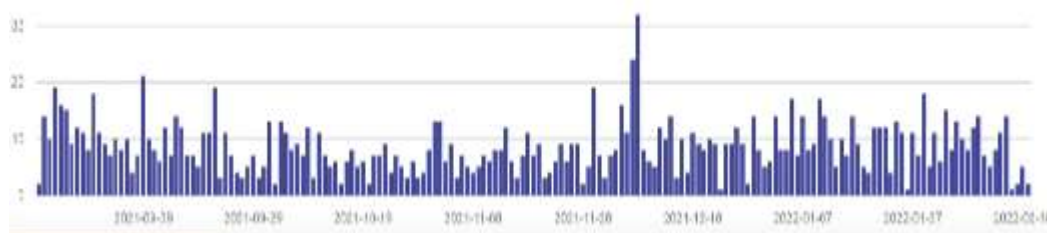


Рис. 9.4. Динамика землетрясений с магнитудой 6+ за последние 180 дней

Виды землетрясений:

- тектонические (около 95 % от всех землетрясений),
- вулканические (до 5 %),
- обвальные (менее 1 %),
- антропогенные (менее 0,1 %).

За период около 10 лет по статистике наибольшее количество жертв связано с землетрясениями с высокой магнитудой (табл. 9.1).

Таблица 9.1. Статистика землетрясений

Страна, дата	Описание	Жертвы	Ущерб
Япония, 11.03.2011	Магнитуда 9,0-9,1. Очаг на глубине 32 км ниже уровня моря. Цунами	15 848 человек погибли, 4 970 пропали без вести	250 млрд. долл. Уничтожено 128 582 и частично разрушено 243 914 зданий
Непал, 25.04.2015	Магнитуда 7,9. Очаг на глубине 10-15 км. Афтершоки магнитудой 4-6,6. Сход лавин.	8400 человек погибли, 17500 были ранены	500 тыс. зданий полностью разрушены, 269 тыс. – частично, Мат. ущерб 10 миллиардов \$
Индонезия, 28.09.2018	Магнитуда 7,5, очаг на глубине 10 км. Цунами высота волн 3- метров	Погибло 1558 человек, 113 пропали без вести	Разрушено более 55 тыс. зданий. На ликвидацию последствий 20 млн. \$

Гаити, 14.08.2021	Магнитуда 7,2, очаг на глубине 10 км	2 207 человек погибло, 12 268 ранено	Материальный ущерб 1 012 000 000 долларов
----------------------	---	--	---

На рисунке 9.5 показаны последствия землетрясения и цунами в Японии: поверхность с обломками – водная.

Землетрясения и цунами могут спровоцировать техногенную катастрофу.



Рис. 9.5. Последствия землетрясения и цунами в Японии

В комплекс антисейсмических мер входят:

- заглубление фундамента,
- создание железобетонных поясов,
- облегчение кровли и межэтажных перекрытий,
- отказ от выступающих тяжеловесных деталей – карнизов, балконов, лепных украшений.

Вулканизм

Вулканизм – совокупность процессов и явлений, связанных с перемещением магматических масс из глубинных частей земной коры на поверхность.

Глобальной причиной вулканизма на Земле является конвекция мантийного вещества:

- 1) Эффузия.
- 2) Эксплозия.
- 3) Экструзия.

Эффузивные извержения лавовых потоков могут протекать долго. Эксплозивные извержения опасны тем, что столб пепла достигнет высоты 40 км, тогда может образоваться экранирование земной поверхности, в результате чего от солнечной энергии изменится климат.

Все вулканы различны и находятся в активных областях (рис. 9.6). При вулканизме образуются кратерные озера, которые обладают кислой средой



Рис. 9.6. Вулканы в Индонезии и Японии

Магматические горные породы образуются на поверхности или в толще земной коры в результате охлаждения и затвердевания магмы (силикатного расплава).

За период около 10 лет по статистике количество жертв от извержения вулканов значительно меньше, чем количество жертв от землетрясений (табл. 9.2).

Таблица 9.2. Статистика вулканизма

Страна, дата	Описание	Жертвы	Ущерб
Исландия, 21.05.2011	Вулкан Гримсвотн. Выброс пепла на высоту 20 км	Отсутствуют	Отмена более 700 авиарейсов
Япония, 27.09.2014	Вулкан Онтакэ. Эруптивная пепловая колонна высотой десять километров	Погибли 55 человек, 7 пропали без вести	Международные рейсы перенаправлены
Япония, 23.01.2018	Извержение вулкана Кусацу-Ширан и сход лавины	Погиб 1 человек, 18 пострадали	Международные рейсы перенаправлены
Гватемала, 04.06.2018	Извержение вулкана Фуэго. Эруптивная пепловая колонна высотой десять километров	Погибли 69 человек, 46 пострадали, эвакуировали 3,26 тысяч	Закрыли Международный аэропорт столицы
Новая Зеландия, 09.12.2019	Извержение стратовулкана Whakaari / White Island. Эруптивная колонна достигла высоты 3,5 км	Погибло и пропало без вести 16 человек, 30 госпитализировали	Код авиационной безопасности изменен на оранжевый

На рисунках 9.7 и 9.8 показаны последствия извержения вулканов.



Рис. 9.7. Вулкан Онтакэ (Япония)



*Рис. 9.8. Вулкан Камкабельный (Камчатка)
(Л.Варавская)*

В настоящее время существуют разные варианты защит возможных сооружений от извержения вулканов, но это тяжело. Лава имеет высокие температуры, поэтому огородить территорию забором недостаточно (рис. 9.9, 9.10). Наиболее популярный вариант защиты сооружений от лавового потока – это изменение рельефа.



*Рис. 9.9. Извержение вулкана Килауэа
(Гавайи)*



*Рис. 9.10. Извержение вулкана Кумбре-
Вьеха (остров Ла Пальма)*

9.2. Экзогенные процессы

Гравитационные (склоновые) процессы

Основная причина проявления гравитационных процессов – разрушение горных пород и сила тяжести, которая приводит эти массы в движение.

Оползневый процессом называют движение масс горных пород вниз по склону в виде скольжения по хорошо выраженной поверхности или зоне.

Оползни происходят часто, особенно в тех странах, для которых характерен сезон дождей.

За последние 10 лет произошло множество оползней, в таблице 9.3 выделяются оползни, которые привели к жертвам.

Таблица 9.3. Статистика гравитационных процессов

Страна, дата	Описание	Жертвы	Ущерб
Тибет, 29.03.2013	В уезде Мэджокунггар. Длина 3 км, объем 2 млн, м ³	66 человек погибли, 17 пропали	Не подсчитан
США, 22.03.2014	Штат Вашингтон. Длина несколько километров	28 человек погибли, 30 пропали	30 домов разрушено
Колумбия, 18.05.2015	Оползень в результате ливневых дождей	61 человек погиб, 37 пострадали	30 домов разрушено
Китай, 29.07.2019	Оползень сошел в уезде Жуйчэн городского округа Люганьшуй	Погибло 38 человек, 13 числятся пропавшими без вести	20 построек полностью погребены
Китай, 26.09.2021	В провинции Сычуань, уезд Тяньцюань, из-за проливных дождей сошел оползень	Погибло 2 человек, 12 числятся пропавшими без вести	

На рисунке 9.11 показана фотография, на которой запечатлена спасательная операция. Оползень был спровоцирован потерей прочности грунтов в результате увлажнения.

Для защиты склонов от оползней строятся подпорные стенки (рис. 9.12).



Рис. 9.11. Оползень, Бразилия



Рис. 9.12. Подпорная стена с облицовочным камнем

Сель

Сель – грязевой поток, формирующийся в руслах горных рек временный поток, характеризующийся резким подъёмом уровня и высоким содержанием продуктов разрушения горных пород.

В таблице 9.4 показаны последствия селевых процессов за период 2017-2019 гг.

Таблица 9.4. Статистика селевых процессов 2017-2019 гг.

Год	Дата	Местоположение	Разрушительные последствия	Жертвы
2019	6 сентября	Краснодарский край, г. Сочи	Перекрыто две автотрассы	-
	17 августа	Республика Северная Осетия	Перекрыта Транскавказская автомагистраль	-
	16 августа	Республика Алтай	Заблокирована дорога для грузовых автомобилей	-
	24 июня	Краснодарский край, г. Сочи, пос. Красная Поляна	Повреждена автодорога, автомобили, затоплены здания	-
2018	25 июля	Забайкальский край, г. Чита	Поврежден участок трассы Чита-Хабаровск	-
	29 июня	Республика Северная Осетия	Перекрыта Транскавказская автомагистраль	-
	16 июня	Карачаево-Черкесская Республика	Перекрыта дорога Черкесск-Домбай	-
2017	1 сентября	Кабардино-Балкарская Республика	Повреждена федеральная трасса. Заблокировано более 500 туристов	3
	18 августа	Крым, г. Судак, г. Феодосия, пгт. Коктебель	Пострадали 42 Га виноградников (15 Га смыло), домовладения, автотранспорт, коммуникации	-

Пример последствий после селевых потоков в Индии показан на рисунке 9.13.

Мерой защиты от селевых потоков является создание селебарьеров (рис. 9.14).



Рис. 9.13. Сель, Индия (AP)



Рис. 9.14. Селебарьер

Обвал

Обвал – отрыв (отделение) и падение больших масс горных пород на крутых и обрывистых склонах гор, речных долин и морских побережий.

В таблице 9.5 показаны последствия обвальных процессов за период 2014-2016 гг.

Таблица 9.5. Статистика обвальных процессов

Страна, дата	Описание	Жертвы	Ущерб
Франция, 8 и 24.02.2014	Во французских Альпах в результате обвала произошло крушение поезда. На юге Франции произошел обвал. Отколовшаяся глыба (9,8 м в высоту и почти 5 м в ширину) на пути к подножию врезалась в альпийское шале	2 человека. Девять получили травмы.	-
Никарагуа, 28.08.2014	На горе Эль-Гамаль произошел обвал. В шахте оказались заблокированными 29 горняков	7 человек	-
Таиланд, 06.10.2014	В провинции Пхетбури произошел обвал. Глыба упала на буддистский храм, прокатилась по его территории и разрушила для жилых построек	1 человек получил травму	-
Бразилия, 02.01.2016	На склоне Боа Виста произошел обвал	Пострадало 15 человек, 5 из них потребовалась мед. помощь	Полностью разрушено 4 жилых дома

На фотографии (рис. 9.15) представлен обвал, который произошел во Вьетнаме – размер глыбы около 7 м.

На диаграмме (рис 9.16) указана протяженность участков линейных сооружений на территории РФ, подвергшихся экзогенно-геологическим процессам.

Условные обозначения к рисунку 9.16 (ряды):

1 – газопроводы;

2 – водоводы;

3 – железные дороги;

4 – шоссейные дороги;

5 – дороги без покрытия;

6 – ЛЭП,

7 – каналы (Информационный бюллетень..., 2020)



Рис. 9.15. Обвал, Вьетнам

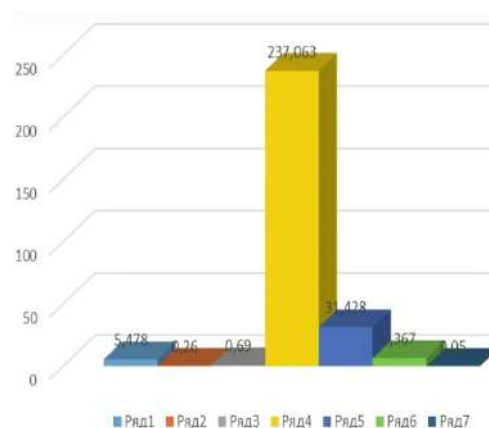


Рис. 9.16. Протяженность (км) участков линейных сооружений на территории РФ, подвергшихся воздействию ЭГП в 2019 г.

Склоновые гравитационные процессы чаще всего происходят в горах. Защита от камнепадов и обвалов может быть сетчатого типа (рис. 9.17, 9.18) – сетка, закрывающая склон.



Рис. 9.17. Защита от камнепадов сетчатого типа



Рис. 9.18. Защита от камнепадов сетчатого типа

Статистика

Рассмотрим катастрофические геологические события за последние 10 лет (рис. 9.19): наибольшее количество таких событий связано с землетрясениями, которые происходят постоянно. Кроме того, землетрясения затрагивают наибольшую территорию. Другим активным процессом с точки зрения эндогенных процессов являются извержения. Однако извержения, которые приводят к жертвам происходят не так часто. Из гравитационных процессов самими опасными и часто повторяющимися являются оползни. Наименьшая катастрофичность у обвалов.

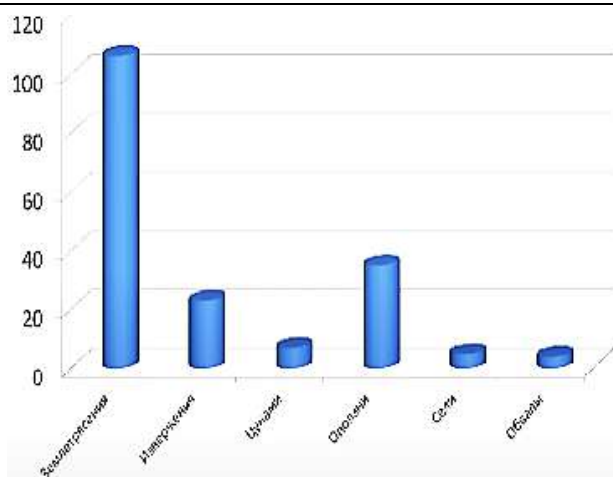


Рис. 9.19. Катастрофические геологические события за последние 10 лет

Лекция 10. Планета Земля и ее удивительный магнетизм

10.1. Магнитное поле Земли

Магнитное поле Земли не видимо для человека. Но визуализировать его можно в первую очередь с помощью *компаса*. В настоящее время разработаны более совершенные и точные приборы для изучения магнитного поля – *магнитометры*.

Магнитное поле используют для навигации. Компас был придуман еще в Древнем Китае. Конструкция его менялась и совершенствовалась.

Магнитное поле Земли для навигации используют:

- человек (компас);
- птицы;
- рыбы;
- киты;
- дельфины;
- бабочки.

У многих из перечисленных животных (рис. 10.1) в мозге существуют специальные рецепторы, которые позволяют им чувствовать магнитное поле Земли (ощущать его направление). Это позволяет ориентироваться им при движении. Даже бактерии (рис. 10.2) умеют ориентироваться по магнитному полю Земли. Внутри бактерии располагаются маленькие магнитные минералы (магнетит), которые выстраиваются в «иголочку», что помогает бактерии чувствовать магнитное поле Земли.

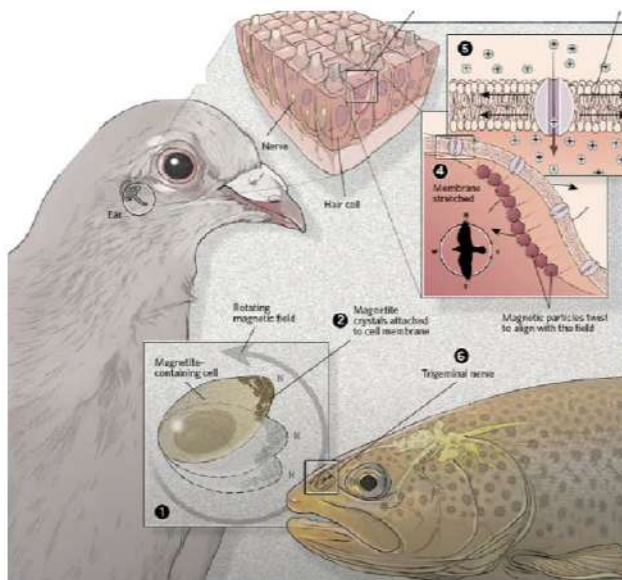


Рис. 10.1. Строение мозга животных

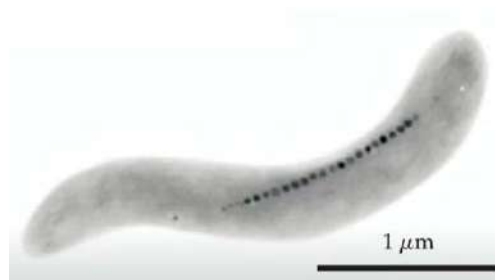


Рис. 10.2. Бактерия
Magnetospirillum magnetotacticum

Магнитосфера

Магнитное поле защищает Землю и её обитателей от космического и солнечного излучения. Вокруг Земли находится магнитосфера (рис. 10.3) – пространство вокруг Земного шара, которое заполняет магнитное поле Земли и отклоняет заряженные частицы, которые летят из космоса (солнечный ветер). С одной стороны магнитосфера Земли «прожимается» под давлением солнечного ветра, а с другой стороны магнитосфера вытянута (магнитный хвост).

Частицы солнечного ветра все же могут проникать в атмосферу Земли через «полярные каспы» (воронки). При взаимодействии частиц солнечного ветра с атмосферой Земли возникает интересное красивое явление – *полярное сияние*.

Полярное сияние обычно зеленого цвета. Это связано с тем, взаимодействие заряженных частиц с кислородом, который входит в состав атмосферы Земли, вызывает люминесцентное свечение.

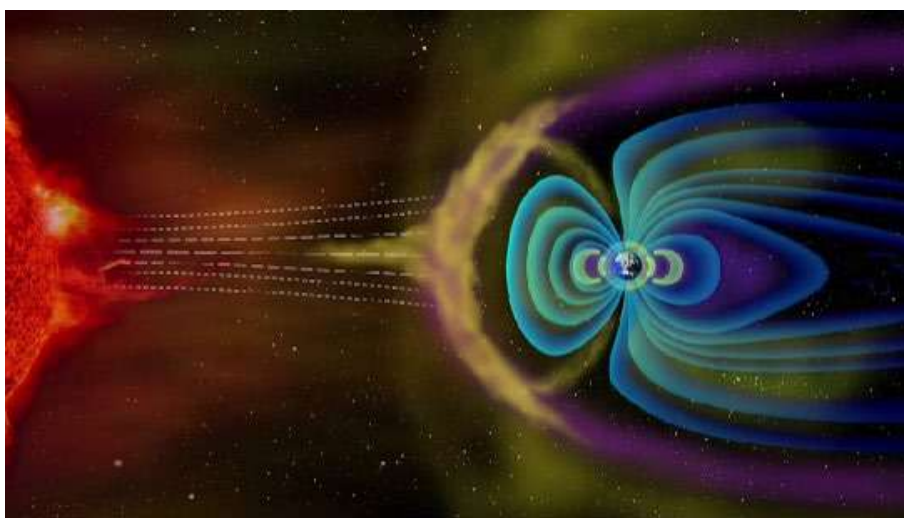


Рис. 10.3. Магнитосфера Земли

Если магнитного поля у Земли бы не было, тогда:

- не было бы атмосферы (скорее всего ее бы сдул солнечный ветер);
- на Земле был бы высокий радиационный фон.

Магнитная стрелка

Магнитная стрелка выравняется вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Их направление в каждом конкретном месте Земли различно.

Историческая справка:

1831 г. – Джон и Джеймс Росс: открыл Северный магнитный полюс.

1839-1843 гг. – Британская антарктическая экспедиция, Джеймс Росс: определён Южный магнитный полюс.

1904 г. – Руаль Амундсен: второе посещение Северного магнитного полюса.

1909 г. – Эрнест Шеклтон: открыт Южный магнитный полюс.

Повторные экспедиции к северному и южному полюсам Земли показали, что магнитные полюса Земли перемещаются. На рисунке 10.4 показана траектория перемещения северного магнитного полюса. Скорость смещения северного магнитного полюса увеличивается.

В общем случае северный географический полюс и северный магнитный полюс не совпадают.

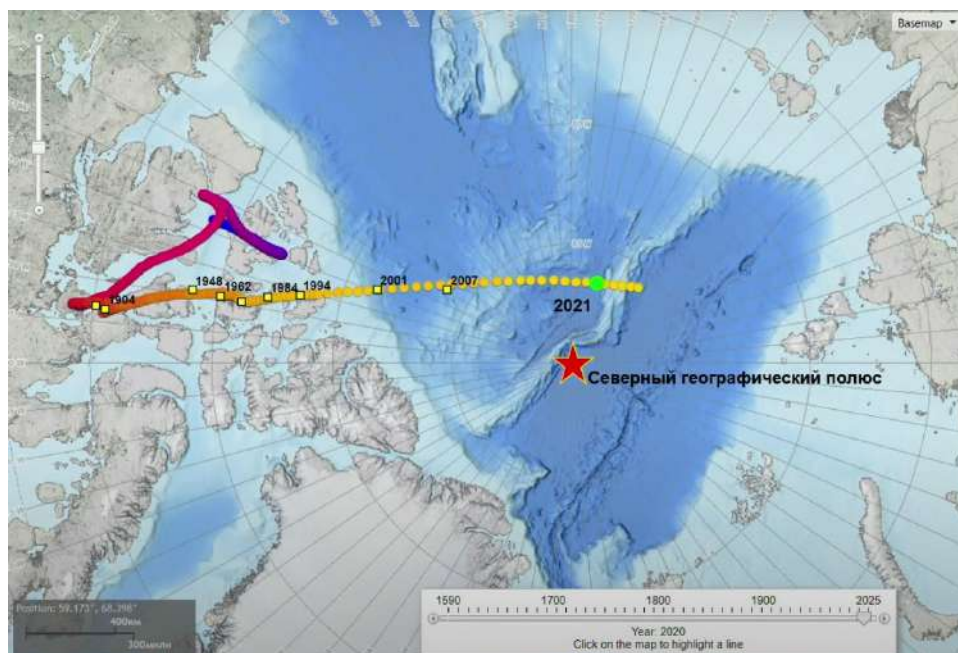


Рис. 10.4. Смещение северного магнитного полюса

На рисунке 10.5 показана траектория смещения южного магнитного полюса. Южный и северный магнитные полюса перемещаются вне зависимости друг от друга.



Рис. 10.5. Смещение южного магнитного полюса

Стрелка магнитного компаса выравнивается параллельно силовым линиям магнитного поля Земли в данной точке. На рисунке 10.6 виртуальными стрелками показаны направления силовых линий магнитного поля на поверхности Земли.

На топографических картах указывают величину местного магнитного склонения (рис. 10.7) – угол, который необходимо прибавить или отнять от показания магнитного компаса, чтобы двигаться строго на географический север.

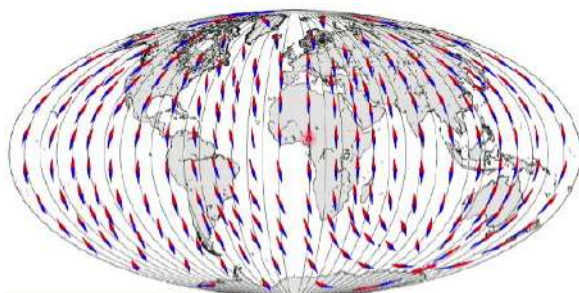


Рис. 10.6. Направления стрелок магнитного компаса



Рис. 10.7. Местное магнитное склонение на топографической карте

Магнитное поле Земли

В 16 веке Уильям Гилберт создал магнитную модель Земли и прикладывал к нему магнитную стрелку. Исходя из результатов эксперимента предположил, что Земля – однородно намагниченный шар.

С развитием геологии ученые выяснили, что земные недра разогреты до очень высоких температур, при которых существование намагниченности невозможно.

На рисунке 10.9 показано, что магнитный брусок создает поле, похожее по конфигурации на магнитное поле Земли.

В физике силовые магнитные линии выходят из северного полюса и входят в южный. В геологии используется обратная терминология, чтобы не путаться в названиях полюсов. Поэтому в геологии используются термины «условные полюсы».

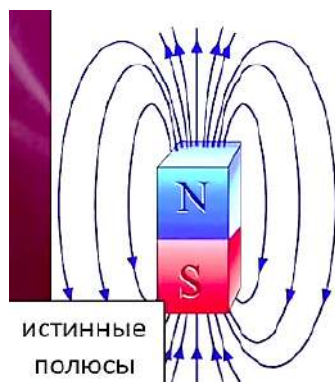


Рис. 10.8. Силовые линии магнита

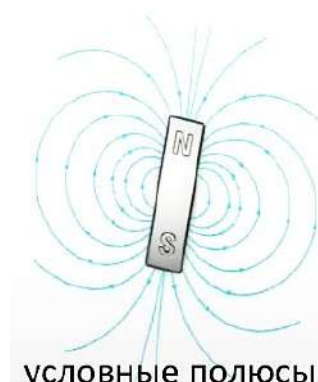


Рис. 10.9. Магнитный брусок

Строение Земли

Земля (в грубой классификации) разделяется на следующие оболочки: литосфера, мантия, внешнее и внутреннее ядро (рис. 10.10). Литосфера и мантия являются каменными оболочками – твердыми. Внешнее ядро – жидкое, внутреннее ядро – твердое. Внешнее и внутреннее ядра Земли состоят из железа с примесью никеля.

Магнитное поле Земли генерируется во внешнем ядре (рис. 10.11).

Внешнее жидкое ядро имеет большой объем: внешняя граница (с мантией) находится на глубине 2900 км, а граница с внутренним ядром находится на глубине 5150 км.

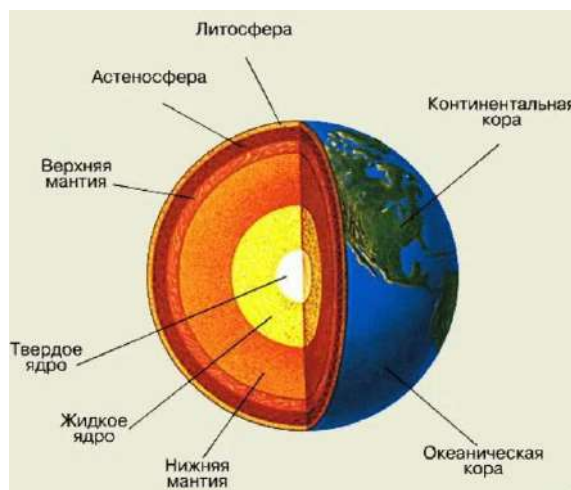


Рис. 10.10. Строение Земли

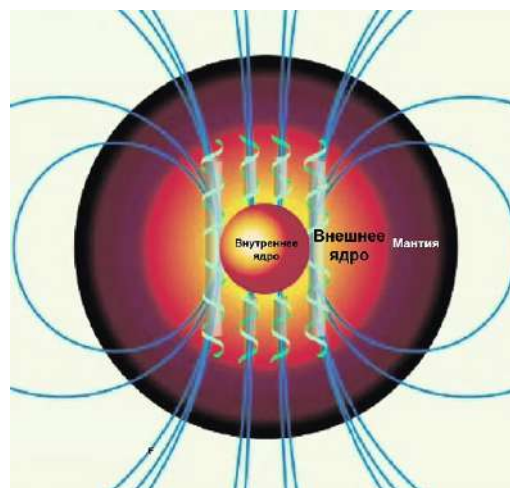


Рис. 10.11. Внешнее жидкое ядро

Земля быстро вращается вокруг своей оси, поэтому во внешнем ядре создаются условия:

Внешнее ядро является проводником тепла от внутреннего ядра Земли к внешним оболочкам Земли. Отвод тепла происходит за счет конвекции жидкого внешнего ядра.

Таким образом, наличие магнитного поля Земли обуславливается наличием объемного жидкого внешнего железного ядра и быстрым вращением Земли.

Модель вычислена на мощных суперкомпьютерах.

Физическое моделирование

На Земле есть уникальные установки (рис. 10.12, 10.13), которые позволяют физически моделировать магнитное поле Земли. Модель хорошо повторяет конфигурацию реального магнитного поля.

10.2. Палеомагнитология

Особенности магнитного поля Земли

Быстрое смещение магнитных полюсов (рис. 10.14) является главной особенностью магнитного поля Земли.

Первый компас был изобретен около 3000 лет назад, а наша планета существует ~4 млрд 600 млн лет. Поэтому ученым интересно выяснить, как изменялось магнитное поле на протяжении всего существования нашей планеты.

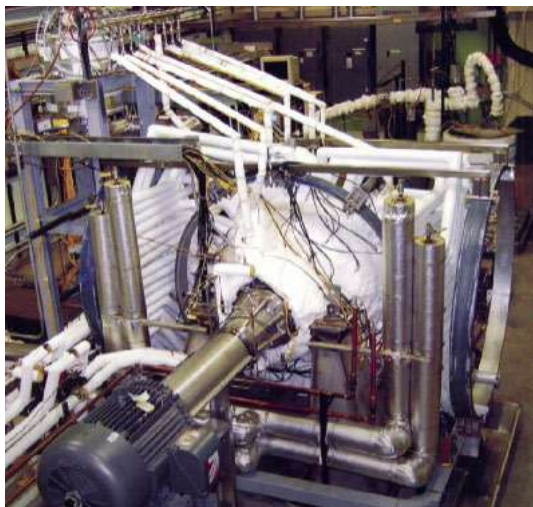


Рис. 10.12. Установка для моделирования геодинамо



Рис. 10.13. Модель Земли в разрезе



Рис. 10.14. Смещение северного полюса

Оказалось, что магнитное поле Земли меняет полярность, т.е. северный и южный магнитные полюса меняются местами. Такое явление называется *инверсией магнитного поля*.

Мы наблюдаем магнитное поле Земли:

- 1) детально – последние 100 лет;
- 2) фрагментарно – последние 400-1000х лет.

Оказывается, горные породы способны намагничиваться и хранить магнитную запись миллиарды лет. Это явление называется – *палеомагнетизм*.

В каждой горной породе в том или ином количестве присутствуют магнитные минералы (рис. 10.15). Непрозрачные черные минералы в шлифе – это оксид железа (магнетит). Маленькие частицы магнетита могут содержать информацию о магнитном поле Земли в момент образования. Геологи сравнивают этот инструмент для изучения информации о магнитном поле Земли с дискетами (рис. 10.16), как с носителями информации.

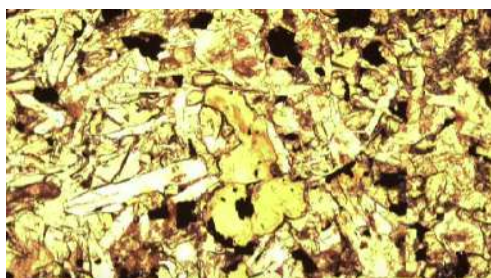


Рис. 10.15. Шлиф горной породы
(магнитные минералы)



Рис. 10.16. Дискеты

Полосовые магнитные аномалии

Изучая дно океанов, геологи обнаружили существование полосовых магнитных аномалий (рис. 10.17). Оказалось, что дно океанов все время расширяется за счет того, что в срединно-океанических хребтах происходит извержение лавы, что раздвигает литосферные плиты.

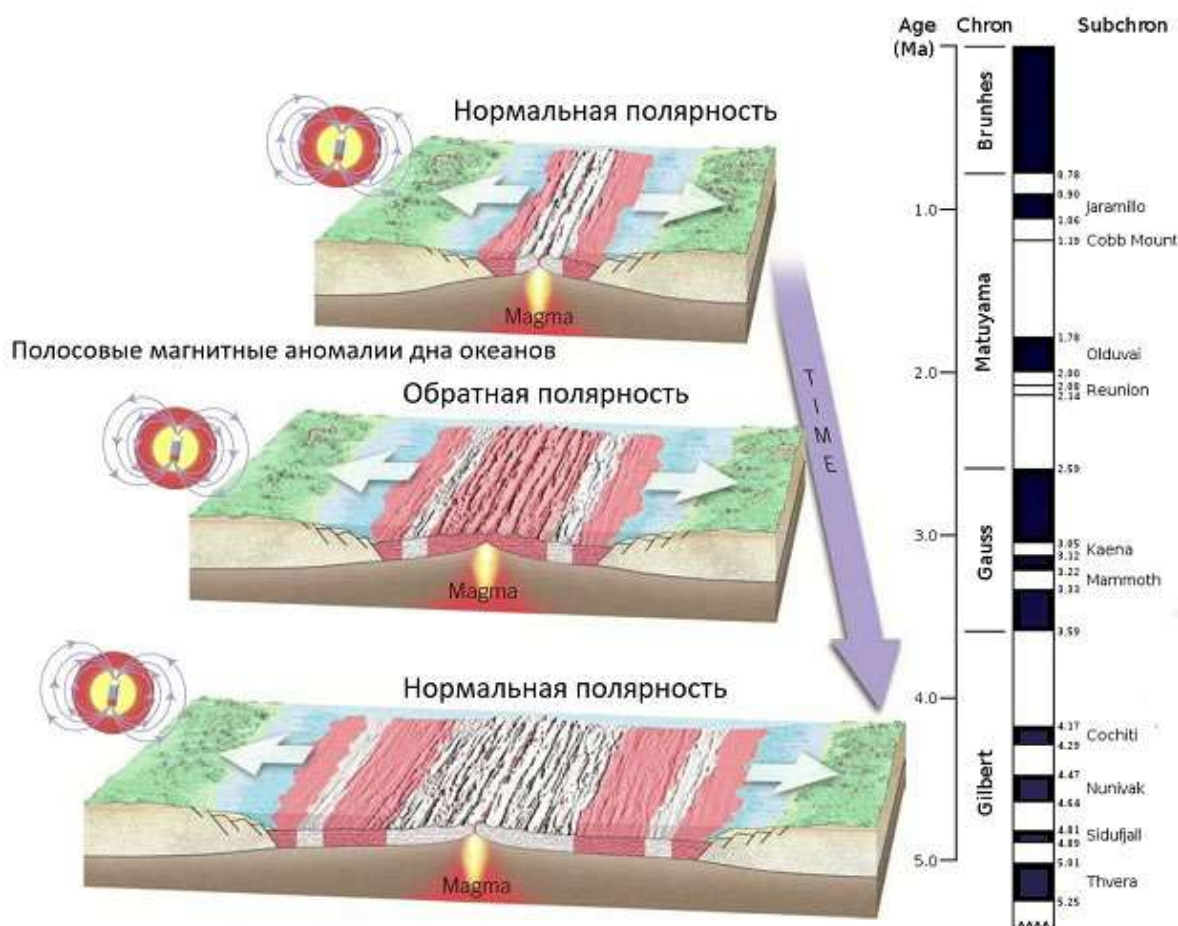


Рис. 10.17. Полосовые магнитные аномалии и шкала магнитной полярности

В магматических породах присутствует магнетит. При остывании ниже точки Кюри магнетит фиксирует направление магнитного поля Земли. Поскольку океаны

имеют древний возраст (возраст коры древних океанов около 160 млн лет), то отбирая образцы с океанов, геологи могут считывать информацию о древнем магнитном поле Земли. Справа на рисунке 10.17 показана шкала магнитной полярности для последних 5 млн лет. Переходы от черного поля к белому – это инверсии магнитного поля. Из шкалы видно, что у инверсий нет периодичности и они не регулярны.

На шкале магнитной полярности для мезозоя и кайнозоя (последних 250 млн лет) (рис. 10.18) видно, что в истории Земли были интервалы времени, когда инверсии происходили относительно часто. Средняя частота инверсий за последние 10 млн лет – это 4 инверсии на 1 млн лет.

Интересно, 120 млн – 80 млн лет назад магнитное поле Земли не меняло свою полярность на протяжении многих десятков млн лет.

Таким образом, механизм генерации магнитного поля Земли – сложный.

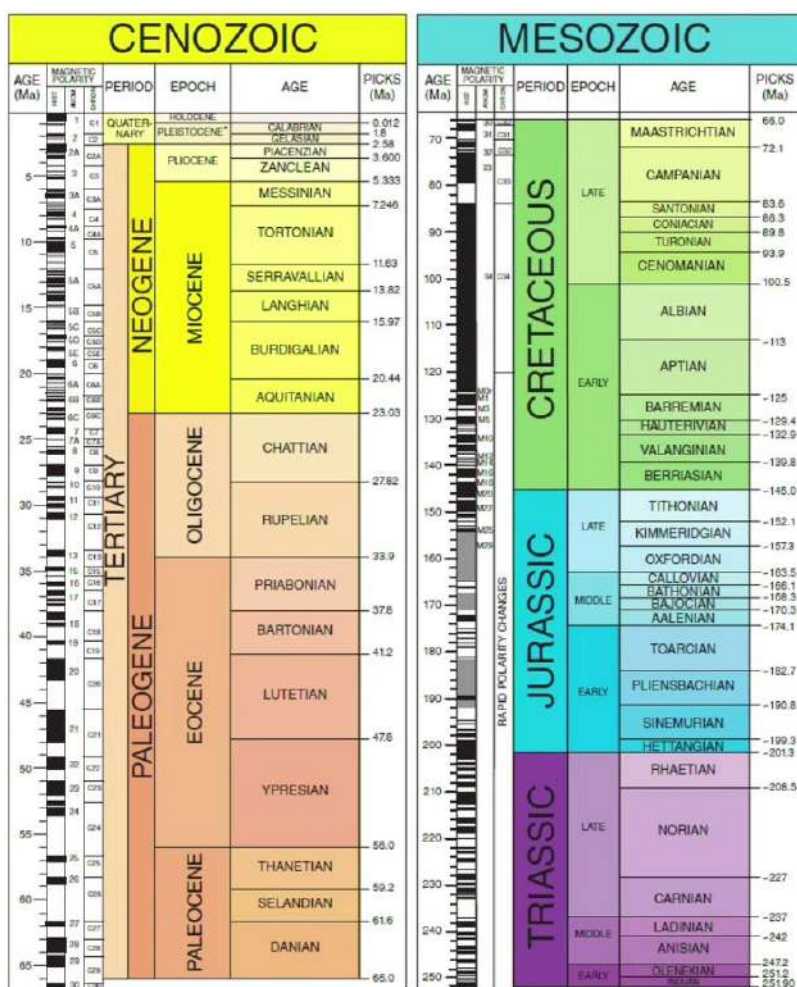


Рис. 10.18. Шкала магнитной полярности для кайнозоя и мезозоя

Палеомагнитологи

Палеомагнитологи занимаются изучением магнитного поля Земли (рис. 10.19). Геологи отбирают специальные образцы для того, чтобы поместить их в специальные приборы и считать информацию о древнем магнитном поле.

В институте физики Земли есть специальная лаборатория (рис. 10.20): обшита фанерой, под которой располагается несколько слоев специального железа, который экранирует внешние магнитные поля. Справа расположен магнитометр, который позволяет считывать вектор остаточной намагниченности.



Рис. 10.19. Палеомагнитологи



Рис. 10.20. Палеомагнитная лаборатория. Институт физики Земли РАН (Москва)

Исследования палеомагнитологов применяются в разных сферах человеческой деятельности: для поисков полезных ископаемых, проведения поисковых работ и реконструкций обстановок Земли в прошлом. Кроме того, исследователи спрогнозировали объединение континентов (рис. 10.21) в единый суперконтинент примерно через 250 млн лет. Ученые дали названия этому суперконтиненту: *Пангея Проксима*.

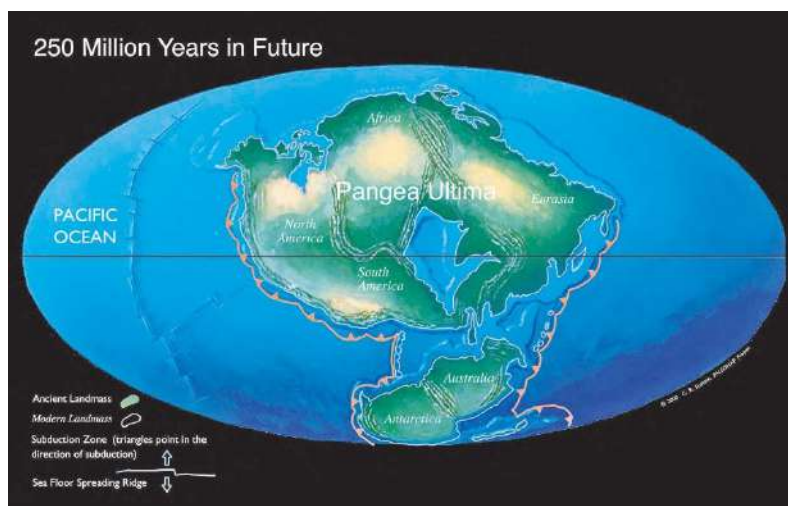


Рис. 10.21. Палеогеографическая реконструкция обстановки Земли через 250 млн лет

Палеомагнитологи показали, что магнитное поле Земли существует с начала ее существования.

Археомagnetизм

Археомagnetизм – эволюция магнитного поля Земли в «обозримом» (историческом) прошлом. В глине артефактов (рис. 10.22), созданных человеком, содержатся магнитные минералы, которые сохраняли направление магнитного поля Земли в момент обжига. Датировать момент обжига ученые могут с точностью до года.

Палеомagnetизм спелеотемов – характеристики магнитного поля за последние десятки-сотни тысяч лет, записанные в натёчных образованиях пещер (рис. 10.23).



Рис. 10.22. Артефакты (обломки кирпичей, горшков и др.)



Рис. 10.23. Изучение натёчных образований пещер

Итоги

Итак, магнитное поле Земли:

1. Непрерывно меняется.
2. Защищает от космического излучения.
3. Используется для навигации.
4. Генерируется во внешнем жидком ядре Земли.
5. Может сохраняться в горных породах.
6. Используется для восстановления облика Земли в прошлом.
7. Имеет способность менять полярность.
8. Существует около 4 миллиардов лет.

Лекция 11. Магия подземных вод

Земля – «голубая» планета. 2/3 поверхности Земли покрыты водой. Воды Земли – это гидросфера (рис. 11.1), объем которой составляет около 1.5 млрд км³:

- 94% – воды мирового океана;
- 6% – воды суши (3.8 % – подземные воды, 2.2 % – поверхностные воды и ледники).

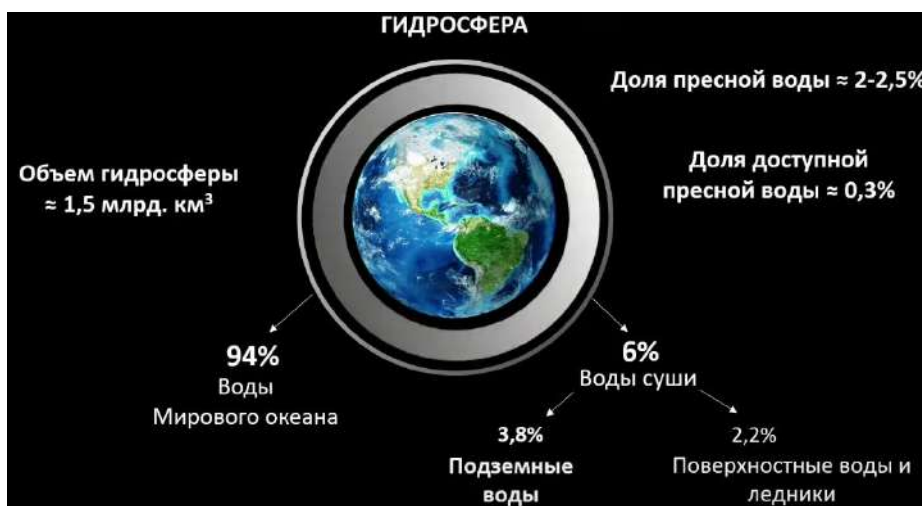


Рис. 11.1. Гидросфера Земли

Подземные воды:

- уникальный геологический объект земной коры;
- часть общих водных ресурсов нашей планеты;
- подвижны, т.е. переносят массу и энергию;
- возобновляемый, но уязвимый природный ресурс.

Гидрогеология – наука о подземных водах, которая изучает геологическую роль, происхождение, формирование, движение подземных вод, их физические и химические свойства.

На рисунке 11.2 представлена схема образования подземных вод: после дождя часть атмосферных осадков просачивается по связанным порам вглубь земли. Под действием силы тяжести капли воды спускаются все ниже и ниже, пока не достигают выдержанного по площади мощного низкопроницаемого слоя. Такой слой называется *водоупором*. Водоупор сложен преимущественно глинистыми отложениями. Часто может быть сложен плотными скальными породами с низкой трещиноватостью. Достигая водоупор капли накапливаются. Формируется мощный выдержанный слой воды, который ученые называют *водоносным горизонтом*. Первый от поверхности водоносный горизонт называется *грунтовым*. Водоносный горизонт сверху ограничен невидимой линией, которая называется *УГВ* (уровень грунтовых вод, зеркало грунтовых вод). Выше расположена зона аэрации.

Зона аэрации – зона неполного насыщения, поры частично заполнены водой, частично воздухом. Мощность зоны изменяется в широких пределах: от нуля (подземные воды выходят на поверхность) до нескольких сотен метров (такое явление можно наблюдать в горно-складчатых областях, сложенных в скальных трещиноватых отложениях).

УГВ – это не прямая линия.

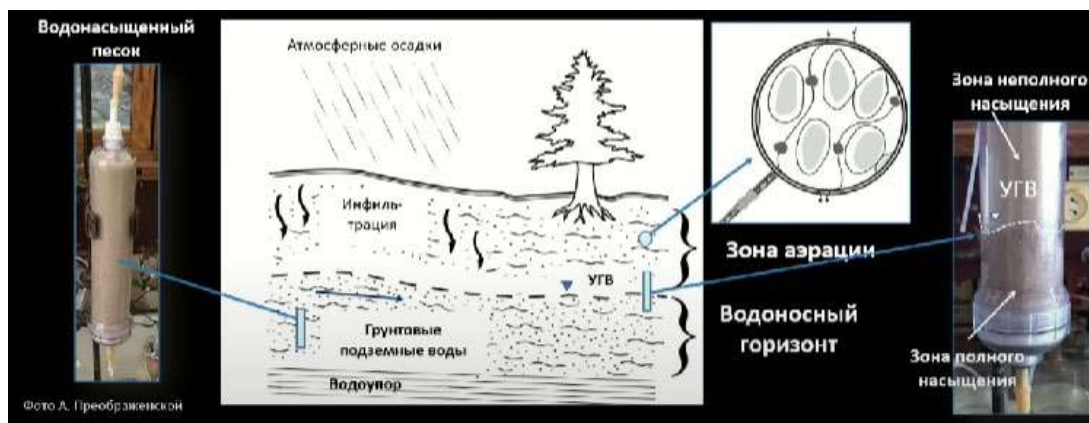


Рис. 11.2. Образование подземных вод

11.1. Классификация подземных вод

Содержание воды в земной коре не ограничивается первым водоносным горизонтом. За первым водоупорным слоем следует следующий водоносный горизонт.

$7,9 \cdot 10^{21}$ кг – общее содержание о всех типов вод в земной коре (В. П. Зверев, 2006) (рис. 11.3).

Двигутся не все воды, а только те, которые называются свободными.

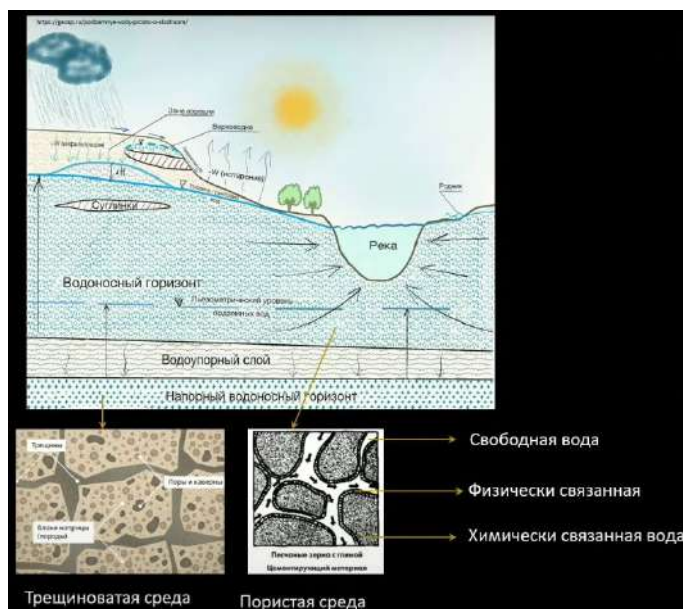


Рис. 11.3. Классификация подземных вод

Свободная вода под разностью градиента напоров способна перемещаться по связанным трещинам и каналам, порам и частичкам водоносного горизонта. Вода переносит массу, энергию, растворенные компоненты. Кроме того, водоносный горизонт, содержащий свободную воду, способен питаться, т.е. восполнять свои запасы. Это происходит преимущественно за счет фильтрационного питания.

Родники – это естественные выходы водоносных горизонтов на поверхность.

Водоносные горизонты могут разгружаться в реки / озера / моря / океаны.

Помимо свободной воды в земной коре находится и *связанная* вода.

Физически связанная вода может находиться в виде моно-, полимолекулярных пленок на поверхности минералов или глинистых частиц. Химически связанная вода входит в структуру минералов и может быть извлечена оттуда только путем разрушения данного минерала.

Минералы, содержащие химически связанную воду, называются *кристаллогидратами*. Яркими представителями являются гипс и кварц (рис. 11.4, 11.5).



Рис. 11.4. Кристалл кварца с включениями нефти, битума, воды и природного газа



Рис. 11.5. Кристаллы гипса

11.2. Строение, структура и состав воды (H₂O)

Молекула воды состоит из атома кислорода и двух атомов водорода (рис. 11.6), которые соединены с атомом кислорода прочной ковалентной связью. Атомы водорода расположены относительно атома кислорода под углом 104.5°. Молекула воды – это активный диполь.

Пример молекулярного агрегата в жидкой среде – единого мнения о структуре жидкой воды нет. Известно, что молекулы воды соединяются друг с другом посредством крепкой водородной связи. Для того, чтобы разрушить водородную связь необходимо приложить много энергии.

Электроны внутри молекулы воды распределены неравномерно и предпочитают область атома кислорода, чем атома водорода. В результате молекула воды обладает свойствами диполя - неравномерно заряженной частицы.

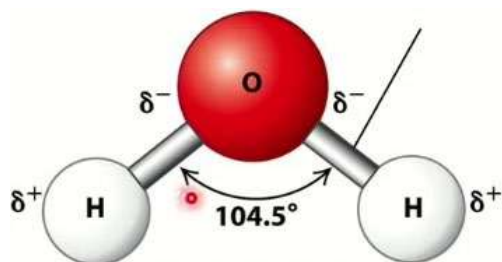


Рис. 11.6. Строение молекулы воды

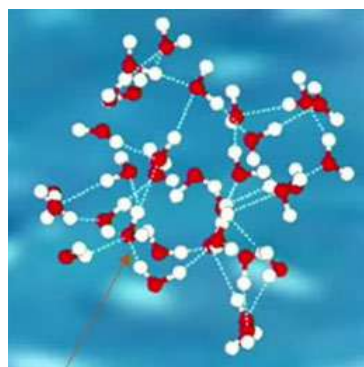


Рис. 11.6. Структура льда

Вода как растворитель

Рассмотрим схему (рис.11.7): имеем стакан с чистой водой, в который была помещена соль. Со временем твердая соль начинает диссоциировать: в раствор переходит положительно заряженный натрий и отрицательно-заряженный хлор. Диполи воды устремляются к ним (рис. 11.8) и вокруг них формируют объемную оболочку, которая называется *гидратационной оболочкой*.

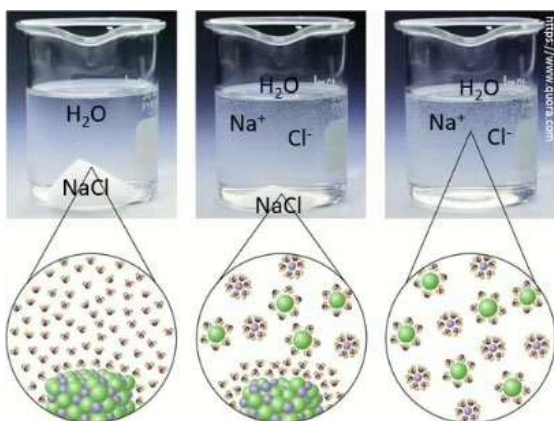


Рис. 11.7. Процесс растворения

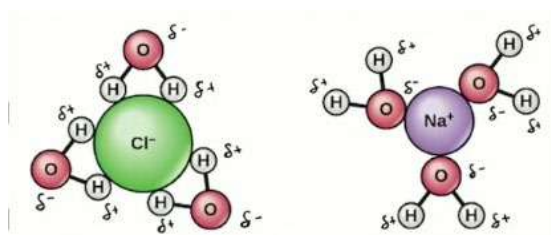


Рис. 11.8. Гидратационная оболочка

Неполярные молекулы (жиры и масла), не взаимодействуют с водой, вокруг них не образуются гидратационные оболочки.

Растворение и выщелачивание

Растворение – процесс перевода в подземные воды из окружающей среды (спорных пород) любого вещества (минерального, органического, газов).

Растворение предполагает полное разрушение кристаллической структуры твердой фазы.

При определенных условиях могут быть полностью растворены горные породы, состоящие из простых солей: NaCl , CaCO_3 , CaSO_4 .



Рис. 11.9. Выщелачивание. Образование карстовых пещер



Рис. 11.10. Натечные формы

Выщелачивание – избирательное растворение и вынос наиболее растворимого компонента породы (рис. 11.9). Например, из известняков могут выщелачиваться включения гипса.

Состав подземных вод

Подземные воды, растворяя горные породы обогащаются различными элементами (рис. 11.11).

Элементы, находящиеся в составе подземных вод разделяются на классы:

- Минеральные вещества (макро и микрокомпоненты);
- Загрязняющие вещества;
- Органические вещества;
- Растворенные газы;
- Микроорганизмы.



Рис. 11.11. Состав подземных вод

Фтор

Употребление подземных вод с повышенным содержанием фтора может привести к возникновению флюороза.

Флюороз – поражение зубов и костей, вызванное чрезмерным поступлением в организм F в количестве более 1,5 мг/л (ПДК_F) через питьевую воду.

Поступление в организм фтористых соединений в небольших количествах способствует профилактике кариеса зубов.

Мышьяк

140 млн. человек в 50 странах пьют воду с концентрацией мышьяка выше рекомендованного ВОЗ уровня >10 мкг/л ((ПДК_{As}, 50 мкг/л) (Аргентина, Бангладеш, Индия, Китай, Мексика, США, Чили и др., рис. 11.12).



Рис. 11.12. Области с повышенными концентрациями мышьяка в воде

Минерализация

Минерализация – суммарная масса растворенных твердых минеральных веществ в единице объема или массы воды – вычисляется суммированием весовых количеств всех веществ, определенных при химическом анализе (г/дм³, г/л, г/кг).

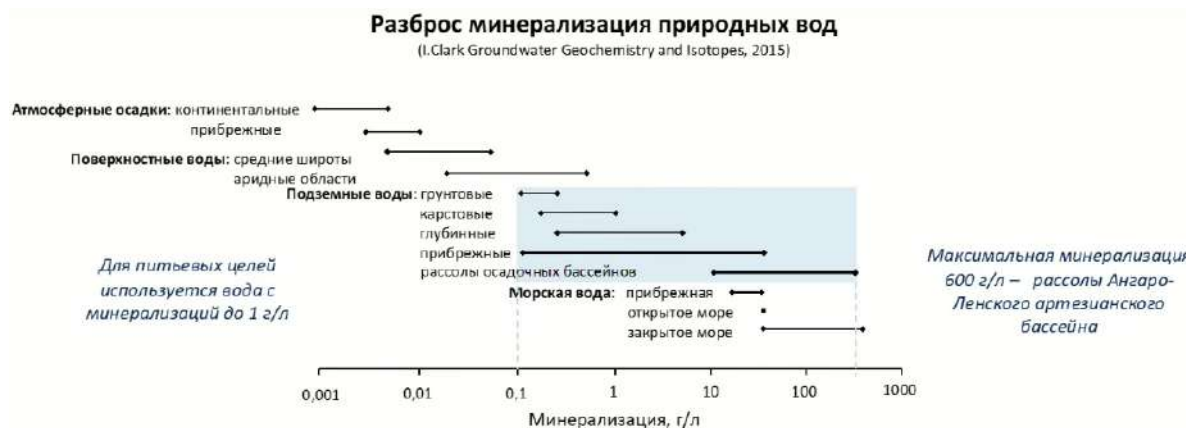


Рис. 11.13. Разброс минерализации природных вод

В зависимости от количественных значений минерализации подземные воды классифицируются (ОСТ 41-05-263 -86 «Воды подземные. Классификация по химическому составу и температуре»)

Таблица 11.1. Классификация по химическому составу и температуре

Минерализация	Группа вод
<1 г/дм ³	пресные

1 – 25 г/дм ³	солончатые
25 – 50 г/дм ³	солёные
>50 г/дм ³	рассолы

Органолептические свойства воды

К органолептическим свойствам воды относят:

- Мутность;
- Цветность;
- Запах;
- Вкус.



Рис. 11.14. Воды нефтяных месторождений



Рис. 11.15. Воды с сероводородом

Таблица 11.2. Классификация по химическому составу и температуре

Содержание	Привкус/запах
NaCl <500 мг/дм ³	Сладковатый
NaCl >500 мг/дм ³	Солончатый
SO ₄ ²⁻ >500 мг/дм ³	Горьковатый
Fe >50 г/дм ³	Терпкий или чернильный
H ₂ S	Запах сероводорода (тухлых яиц)

рН подземных вод

рН – это величина, характеризующая активность ионов H⁺ в растворе, численно равная отрицательному десятичному логарифму активности (ед. рН)

$$pH = -\lg[H^+]$$

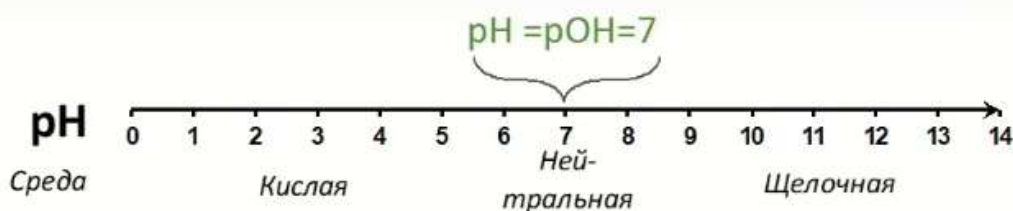


Рис. 11.16. Классификация pH сред

Значения pH подземных вод изменяются от 0 до 12,5.

Таблица 11.3. Классификация подземных вод по величине pH

Вид вод	Характерные величины pH
Термальные воды и конденсаты вулканических газов в районах современного магматизма	<2
Зоны окисления сульфидных месторождений, содержащих сульфиды (пирит и др.)	
Высококонцентрированные рассолы Cl-Ca и Cl-Ca-Na состава с минерализацией более 400 г/л	До 4
Маломинерализованные азотные термы, формирующиеся в массивах кристаллических пород с высокими концентрациями OH-задающих ионов	Около 9
((HCO ₃ +CO ₃)-Na и HCO ₃ -Cl-Na воды осадочных пород краевых прогибов и межгорных альпийских впадин	>8.4
Воды глубоких горизонтов массивов щелочных пород апатитового типа	8-12.5
Грунтовые воды (большинство)	6-8.5

Температура подземных вод

Температура подземных вод изменяется от отрицательных значений до высокоположительных.

Таблица 11.4. Классификация подземных вод по температуре Н.И. Толстихина

Типы воды	Температура
Отрицательно-температурные воды (криопэги - всегда соленые или рассолы)	менее 0 °C
Холодные воды	от 0 до +20°C
Теплые, горячие и весьма горячие (термы)	от +20 до +100°C
Сверхгорячие или перегретые (супертермы)	от +100 до +700 °C
Горячие пары (вапортермы магматических очагов)	> +700 °C

-14°C – максимально отрицательная температура подземных вод. Нордвик, Антарктида (рис. 11.18)



Рис. 11.17. Термы Камчатки



Рис. 11.18. Криопэги

$+360^{\circ}\text{C}$ – максимально положительная температура подземных вод (на глубине 2 469 м) в районе оз. Солтон-Си, Калифорния, США (рис. 11.19)



Рис. 11.19. Супертермы

Кристаллизация

Кристаллизация – процесс выделения твердой фазы из насыщенных водных растворов (рис. 11.20, 11.21)



Рис. 11.20. Образование натёчных форм в пещерах при испарительном концентрировании



Рис. 11.21. Образование белых травертиновых террас в Памуккале, Турция при выходе на поверхность

высокотемпературных углекислых подземных вод

Образование гейзеритов (отложений кремниевого туфа) при выходе на поверхность высокотемпературных глубинных вод со значительной концентрацией кремниевой кислоты (до 300-400 мг/дм³) показано на рисунках 11.22-11.23.



Рис. 11.22. Образование гейзеритов



Рис. 11.23. Образование гейзеритов

Жесткость подземных вод

Жесткость подземных вод – совокупность химических свойств воды, связанных с содержанием в ней растворенных солей щелочноземельных металлов, главным образом, Ca^{2+} и Mg^{2+} (ммоль/дм³, мг-экв/л, °Ж и др.).

Классификация жесткости:

- Карбонатная (непостоянная): CaCO_3 , MgCO_3 и др.
- Некарбонатная (постоянная) CaSO_4 , CaCl_2 , MgSO_4 , MgCl_2 , и др.

Таблица 11.5. Классификация жесткости подземных вод

Вода	Жесткость мг·экв/л
Очень мягкая	До 1.5
Мягкая	От 1.5 до 4
Средней жесткости	От 4 до 8
Жесткая	От 8 до 12
Очень жесткая	Более 12

По нормам СанПиН 2.1.4. 559-96 жесткость питьевой воды должна быть < 7,0 мг·экв/л.

Использование подземных вод для питьевого водоснабжения

- >2 млрд. человек в мире пьют воду, добываемую из подземных источников
- >25% населения Земли

В ближайшем будущем одним из главных, а в аридных условиях основным источником водоснабжения человечества будут подземные воды – это генеральная тенденция мирового опыта водообеспечения.

Подземные воды используются для питьевого водоснабжения, так как:

- Защищены от поверхностного загрязнения.
- Менее подвержены влиянию засух и маловодий, чем поверхностные воды.
- Для устойчивого водоснабжения крупных городов-мегаполисов необходимость наличия альтернативных источников водоснабжения (поверхностные и подземные).
- Отсутствие доступных для водоснабжения ресурсов поверхностных вод в аридных регионах.
- Возможность организации децентрализованного водоснабжения мелких населенных пунктов.

На рисунках 11.24, 11.25 показаны водозаборные скважины на дачных участках.



Рис. 11.24. Водозаборная скважина на дачном участке



Рис. 11.25. Водозаборная скважина на дачном участке

Водозаборы подземных вод – инженерные сооружения, требующие серьезных капитальных и эксплуатационных затрат, в том числе и на водоподготовку (рис. 11.26 – 11.29).

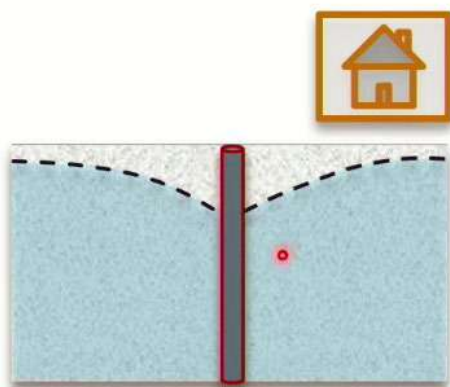


Рис. 11.26. Схема водозаборной скважины



Рис. 11.27. Прибрежный водозабор подземных вод



Рис. 11.28. Эксплуатационные водозаборные скважины



Рис. 11.29. Эксплуатационные водозаборные скважины

Основные места отбора проб подземной воды: скважины, родники (рис. 11.30-11.33)



Рис. 11.30. Наблюдательная скважина



Рис. 11.31. Родники



Рис. 11.32. Заброшенный колодец

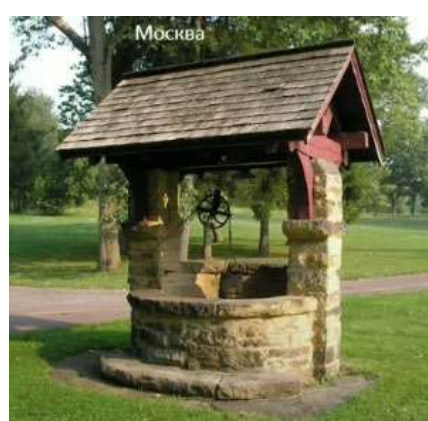


Рис. 11.33. Действующий колодец

11.3. Подземные воды как источник питьевого водоснабжения

Количество

Ученые решают вопросы: где, сколько и как можно отбирать подземные воды в рамках концепции устойчивого водопользования: т.е. не допуская деградации ресурсов, как подземных, так и поверхностных вод и ландшафтов?

Качество

Ученые решают вопросы: как прогнозировать и сохранять качество (химический состав) отбираемых вод в техногенной-нагруженных районах?

Хозяйственно-питьевое водоснабжение в России

Доля подземной воды в общем количестве воды, используемой для водоснабжения, достигает 50% (рис. 11.34).

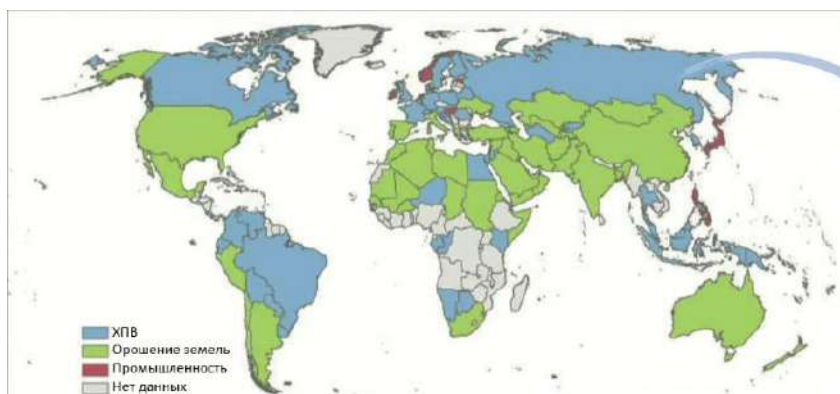


Рис. 11.34. Целевое назначение использования подземных вод

При этом ее распределение неравномерно по регионам (рис. 11.35): в центральном регионе потребление подземной воды составляет в среднем 127 л/(сут·чел), а в Северо-Западном регионе: 37 л/(сут·чел).

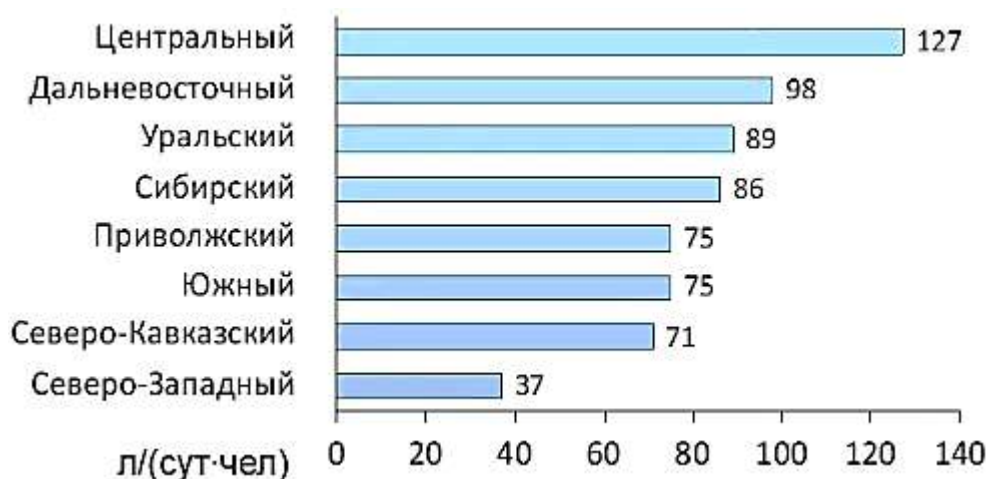


Рис. 11.35. Среднесуточное потребление подземных вод для ХПВ в РФ

Использование подземных вод для орошения

Минерализация подземных вод, пригодных для орошения, должна быть $<0,4$ г/л.

Ограниченное применение с учетом местных природных и ирригационных условий имеет вода с минерализацией 0,4-1,0 г/л

Около 43 % общего объема воды, используемой для орошения, приходится на подземные воды.

Подземные воды как источник GREEN Energy

Главным достоинством геотермальной энергии является её практическая неиссякаемость и полная независимость от условий окружающей среды, времени суток и года.



Рис. 11.36. Теплоэнергетический завод в Исландии



Рис. 11.37. ГеоЭС на Филиппинах

Подземные воды, как источник сырья

Промышленные воды – воды, из которых экономически выгодно извлекать растворенные в них компоненты (йод, бром, редкие металлы и др.)

В минерализованных подземных водах и рассолах на территории России и СНГ содержатся огромные запасы редкометалльного сырья:

- более 55% общих запасов Li;
- более 40% Rb;
- Более 35% Cs .

Мировая добыча йода из подземных вод – 80%.

Воды нефтяных месторождений

Пластовые воды нефтяных месторождений:

- имеют различную минерализацию и отличаются по солевому составу, зависящему от геологического возраста, стратиграфии эксплуатируемого горизонта и т. д.;
- всегда содержат в растворенном виде в том или ином количестве органические вещества и газы.

Загрязнение подземных вод

Пресные подземные воды – очень уязвимый ресурс, который требует защиты и экологически разумного поведения людей (рис. 11.38).

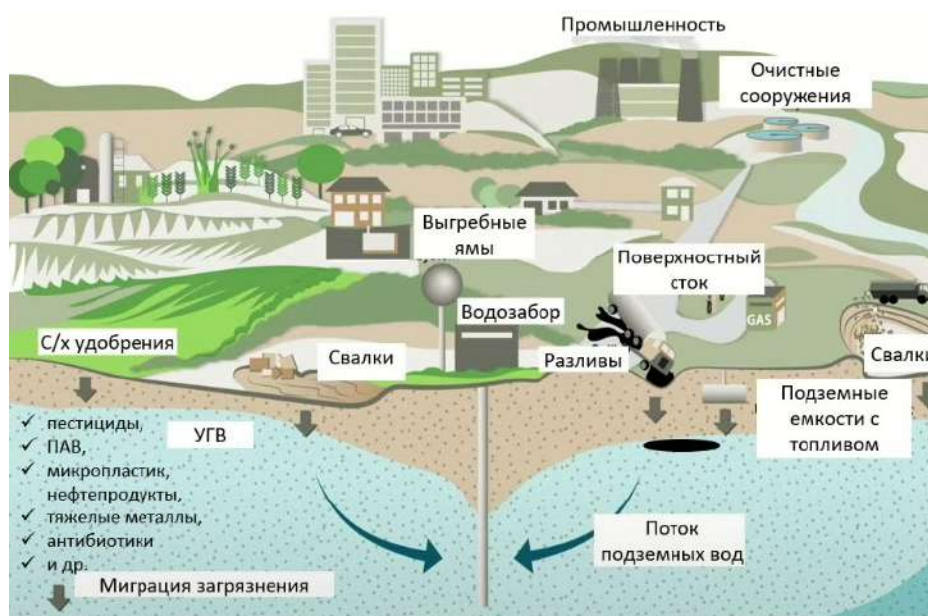


Рис. 11.38. Загрязнение подземных вод за счет техногенных источников



ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ
ФАКУЛЬТЕТ
МГУ ИМЕНИ
М.В. ЛОМОНОСОВА

teach-in
Л Е К Ц И И У Ч Е Н Ы Х М Г У