



ВВЕДЕНИЕ В ГЕОМЕХАНИКУ МЕСТОРОЖДЕНИЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

Семестровый курс
Лекция 3



Процессы в литосфере и их проявления.

Литосфера зачастую воспринимается как неподвижное основание для сооружений и вместилище месторождений.

В литосфере постоянно идут процессы деформирования и перемещения вещества.

Эти процессы имеют различные временные масштабы, от долей секунд (распространение упругих волн) до миллионов лет (геологические процессы).

- Геологические процессы
 - Тектоника плит
 - Землетрясения
 - Вулканы
 - Оползни



Процессы в литосфере и их проявления.

Деформации литосферы приводят к образованию гор и глубоководных впадин.

Силы, вызывающие деформации, являются эндогенными, источники сил лежат в недрах Земли.

Физическими источниками сил являются

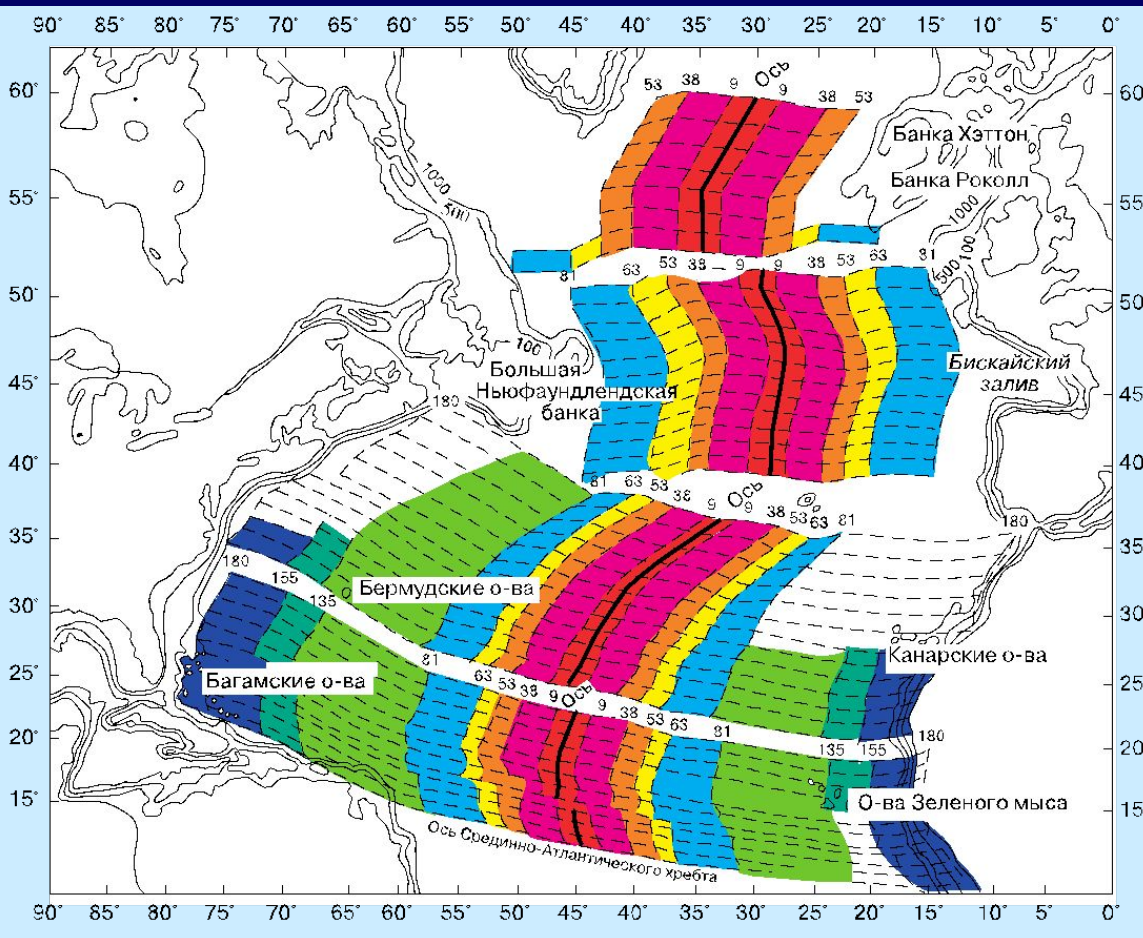
- гравитационная дифференциация вещества недр,
- перенос тепла,
- фазовые переходы.

Для равнинных областей характерны скорости порядка 10^{-6} 1/год, для областей орогенеза (горообразования) – 10^{-5} 1/год.

Тектоника плит

В начале XX века А. Вегенер высказал гипотезу о том, что в прошлом континенты Евразия и Африка, с одной стороны, и Северная и Южная Америка, с другой стороны, составляли единый суперконтинент. Гипотезу Вегенер обосновывал сходством очертаний западных и восточных береговых линий этих континентов.

В середине XX века была открыта мировая система срединноокеанических хребтов с рифтовыми долинами в осевой части, заполненными молодыми базальтами. Было обнаружено, что для пород океанической коры характерны линейные магнитные аномалии, параллельные осям срединных хребтов и расположенные симметрично по отношению к ним.





Тектоника плит

- Литосфера Земли, включающая кору и самую верхнюю часть мантии, подстигается более пластичной, менее вязкой оболочкой – астеносферой.
- Литосфера разделена на ограниченное число крупных (несколько тысяч километров в поперечнике), и среднего размера (около 1000 км) относительно жестких плит.
- Литосферные плиты перемещаются друг относительно друга в горизонтальном направлении; характер этих перемещений может быть трояким: а) раздвиг (**спрединг**) с заполнением образующегося зияния новой корой океанического типа; б) поддвиг (**субдукция**) океанской плиты под континентальную или океанскую же; в) скольжение одной плиты относительно другой по плоскости так называемых **трансформных разломов**, поперечных к осям срединных хребтов.

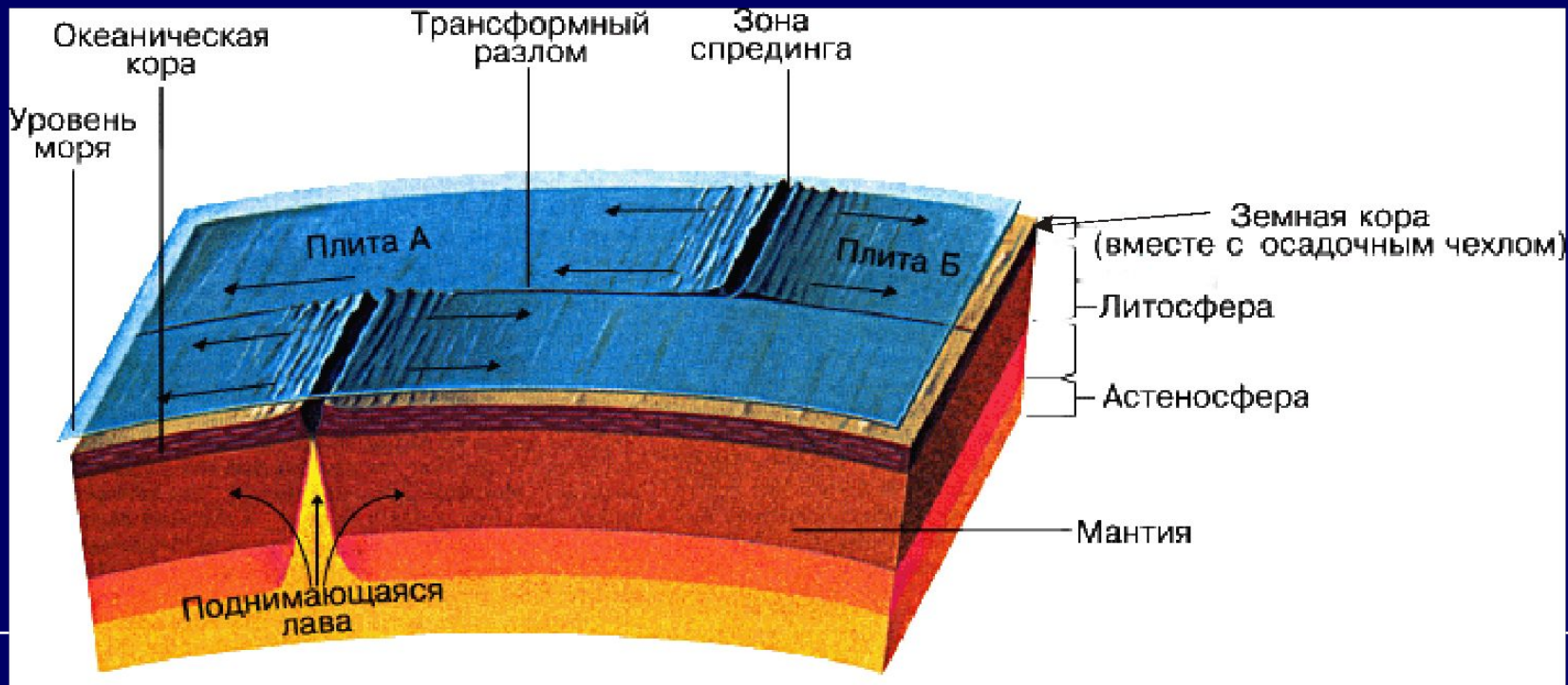


Тектоника плит

- Перемещение литосферных плит по поверхности астеносферы подчиняется теореме Эйлера, гласящей, что перемещение сопряженных точек на сфере происходит вдоль окружностей, проведенных относительно оси, проходящей через центр Земли.
- В масштабе планеты в целом спрединг компенсируется субдукцией, т.е. сколько за данный промежуток времени рождается новой океанской коры, столько же более древней океанской коры поглощается в зонах субдукции, благодаря чему объем Земли остается неизменным.
- Перемещение литосферных плит происходит под действием конвективных течений в мантии, включая астеносферу. Под срединными хребтами существуют восходящие течения; они превращаются в горизонтальные на периферии хребтов и в нисходящие в зонах субдукции на окраинах океанов. Конвекция обеспечивает перенос тепла из недр Земли к поверхности.

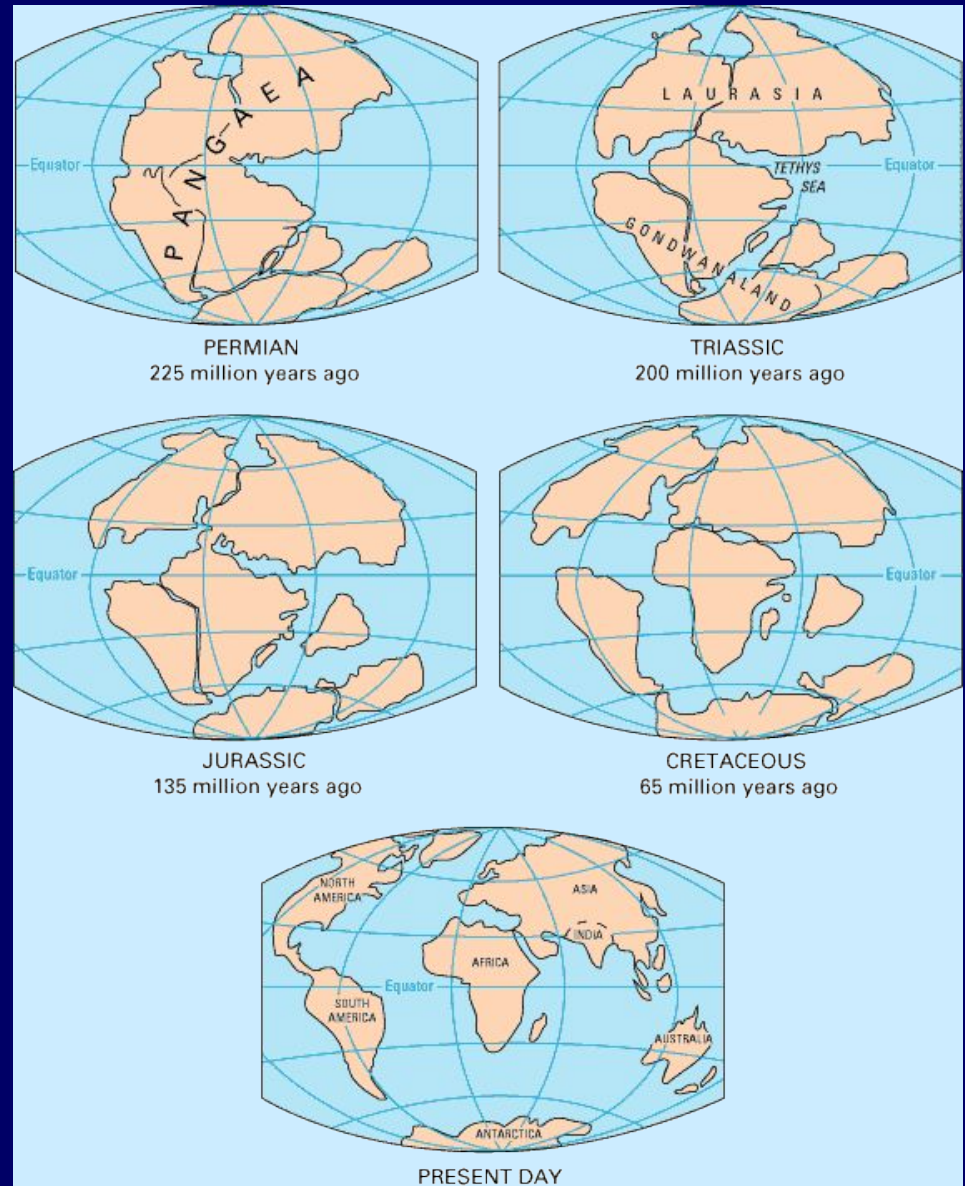
Тектоника плит

- Возможность конвекции показывается путем оценки безразмерного числа Релея.
- Для возникновения тепловой конвекции это число должно превышать величину примерно 1700.
- Оценки числа Релея для мантии дают значение около 2700.



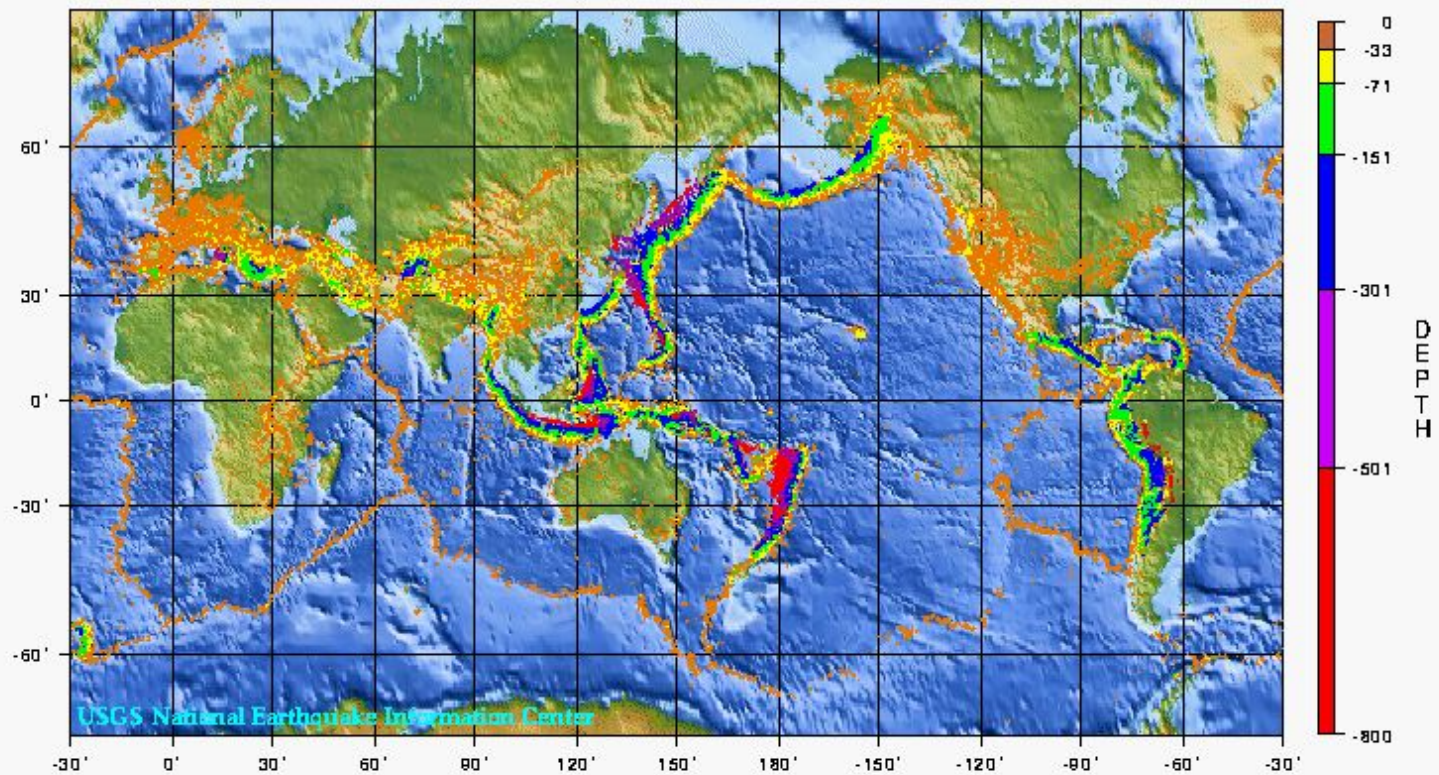
Тектоника плит

Реконструкция положения
литосферных плит в
различные геологические
эпохи



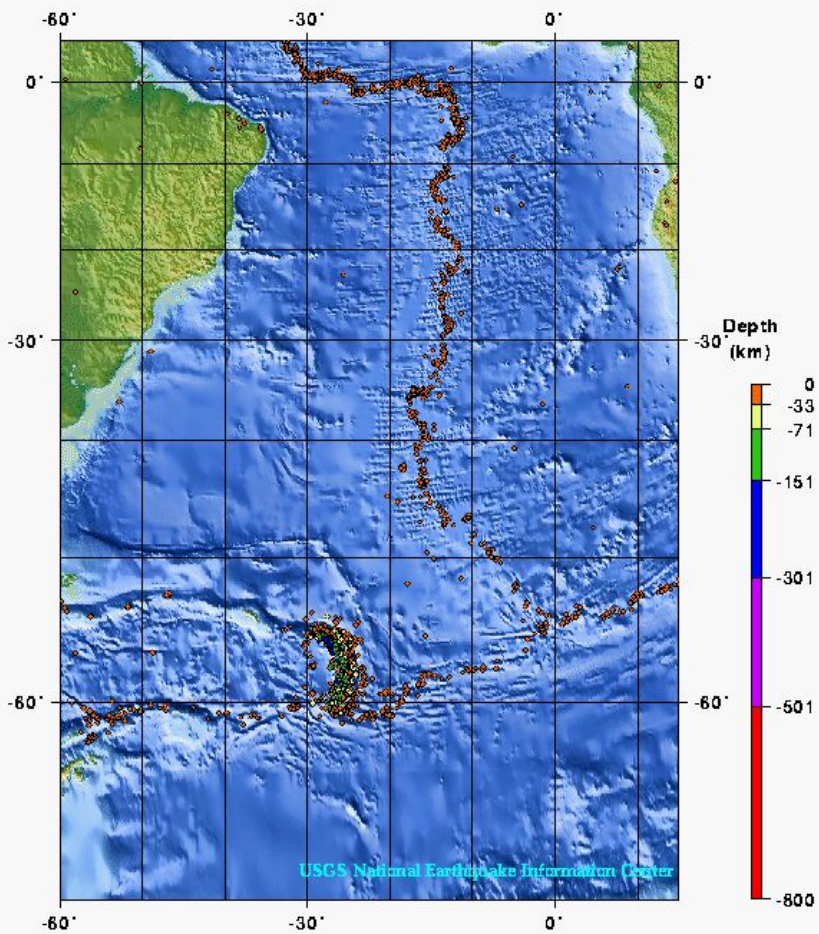
Тектоника плит и землетрясения

World Seismicity: 1975 - 1995

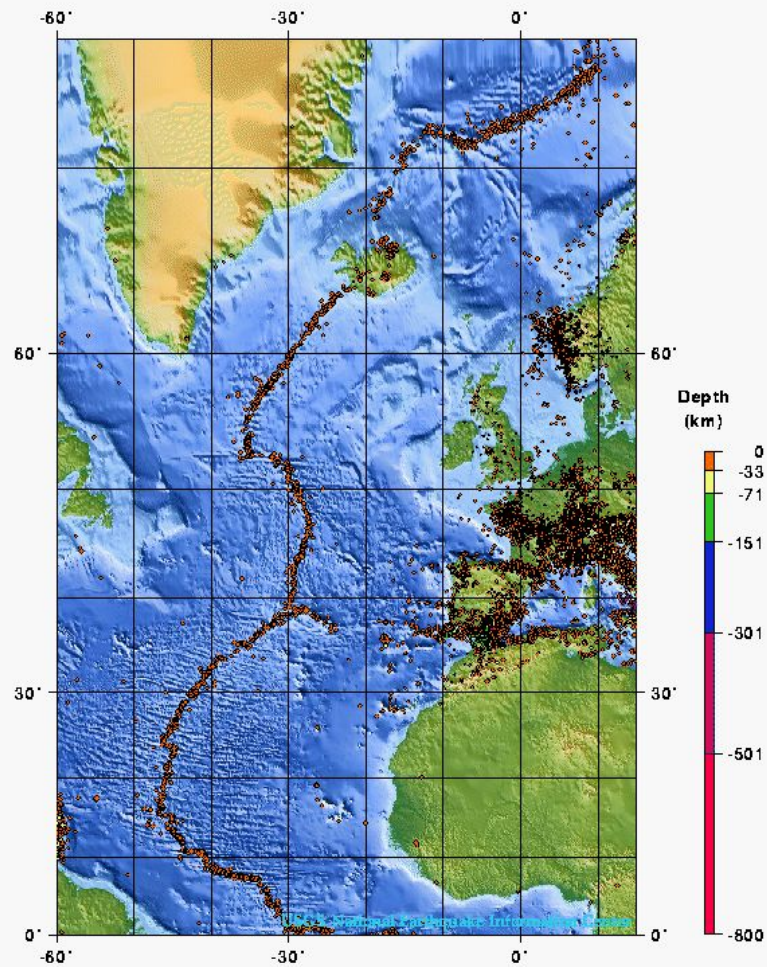


Тектоника плит и землетрясения

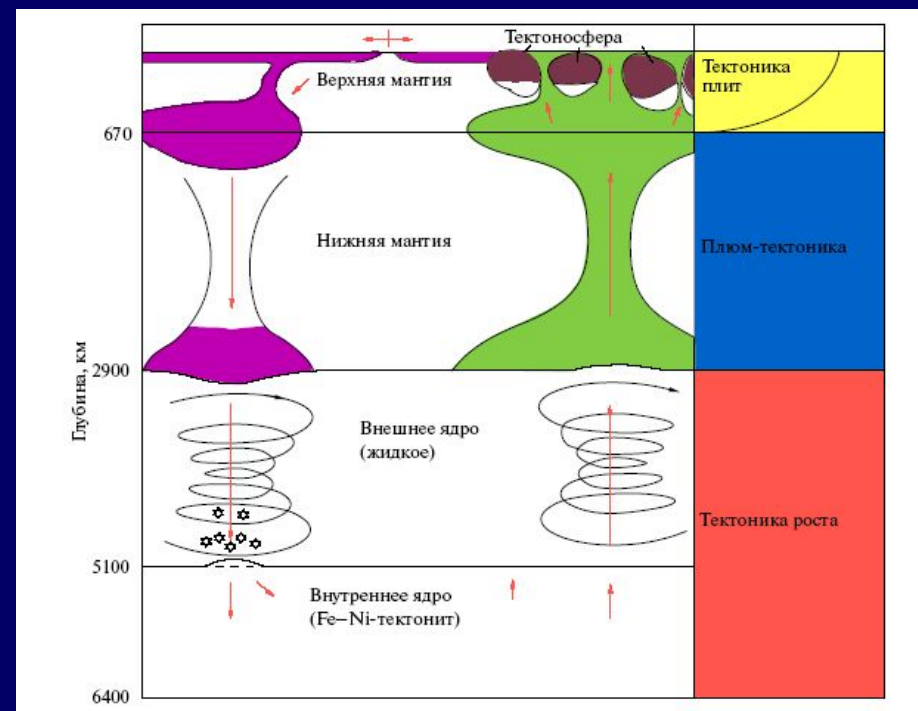
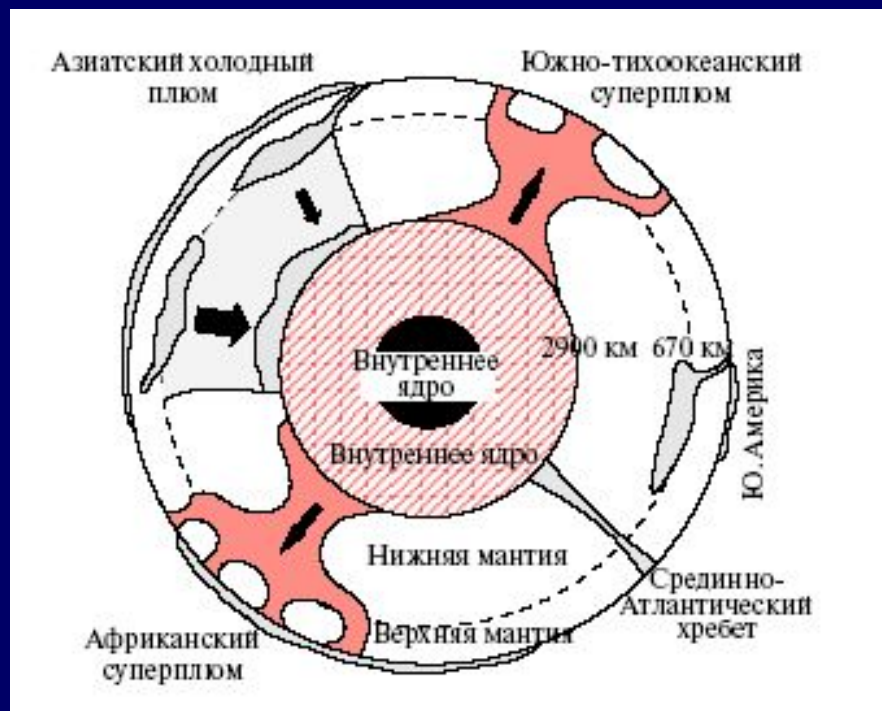
Seismicity of the South Atlantic Ocean: 1975 - 1995



Seismicity of the North Atlantic Ocean: 1975 - 1995



Плюм-тектоника



Для объяснения внутриплитного магматизма и данных сейсмической томографии была предложена гипотеза мантийных струй («плюмов»)



Современные модели глобальной тектоники

- В Земле выделяются три главных области: **тектоносфера**, охватывающая кору и верхнюю мантию с переходной зоной, **нижняя мантия** и **ядро**.
- В **тектоносфере** действует **тектоника плит**, в **нижней мантии** – **плюм-тектоника** мантийных струй, в **ядре** – **тектоника роста** (разрастание внутреннего ядра за счет внешнего).
- В зонах субдукции происходит погружение плит холодной литосферы. Достигнув глубин около 670 км, эти плиты задерживаются, пока материала не накопится столько, что он начнет «проваливаться» в нижнюю мантию, достигая в конечном счете поверхности ядра.
- Внедрение холодного вещества вызывает подъем мантийных струй (плюмов) от границы ядра. Достигнув уровня 670 км, эти плюмы расщепляются, проникая далее в верхнюю мантию и порождая здесь восходящие течения, над которыми образуются оси спрединга срединноокеанских хребтов.

Землетрясения.



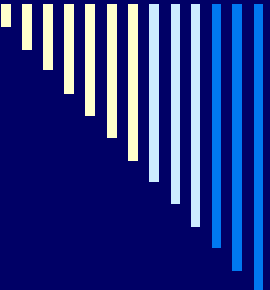
Наиболее заметным для человека образом деформационные процессы в литосфере проявляются в сейсмических событиях различной энергии – от слабых микросейсм, до катастрофических событий, уносящих жизни сотен тысяч людей



Характеристики землетрясений

- Эпицентр – проекция на поверхность очага землетрясения.
- Гипоцентр – положения очага землетрясения.
- Сила (интенсивность) землетрясения – характеристика воздействия сейсмических волн в баллах. XII-балльная шкала Рихтера (модифицированная шкала Меркалли).
- Магнитуда землетрясения – характеристика сейсмической энергии в очаге землетрясения, определяется по записям сейсмических волн. Различают магнитуду, определяемую по поверхностным волнам, по объемным волнам, локальную магнитуду.
- Энергетический класс – логарифм сейсмической энергии в очаге землетрясения, выраженной в джоулях.

$$\lg E = K \quad \lg E = 2.4m_b - 1.2 \quad \lg E = 1.5M + 4.8$$



Механические критерии разрушения

- критерий Кулона-Мора

$$\tau_{crit} = \tau_0 + \mu\sigma_n$$

- наличие флюида

$$\tau_{crit} = \tau_0 + \mu(\sigma_n - p)$$



Модели подготовки землетрясений.

□ Дилатансионно-диффузная модель (ДД)

Дилатансией называется неупругое увеличение объема материала под действием приложенной к нему нагрузки. Возрастание объема происходит в результате раскрытия пор и/или появления и раскрытия трещин отрыва, ориентированных параллельно сжимающим напряжениям. Величина изменения объема зависит от типа породы и составляет от долей до первых процентов.

Стадия 1. Напряжения и деформации нарастают до некоторого критического уровня.

Стадия 2. Дилатансионное увеличение пористости, причем скорость роста пустотности превышает скорость фильтрации флюидов из окружающего пространства.

Стадия 3. Характеризуется притоком флюидов.

Землетрясение возникает после того, как в результате притока жидкости поровое давление возрастает и прочность пород падает.



Модели подготовки землетрясений.

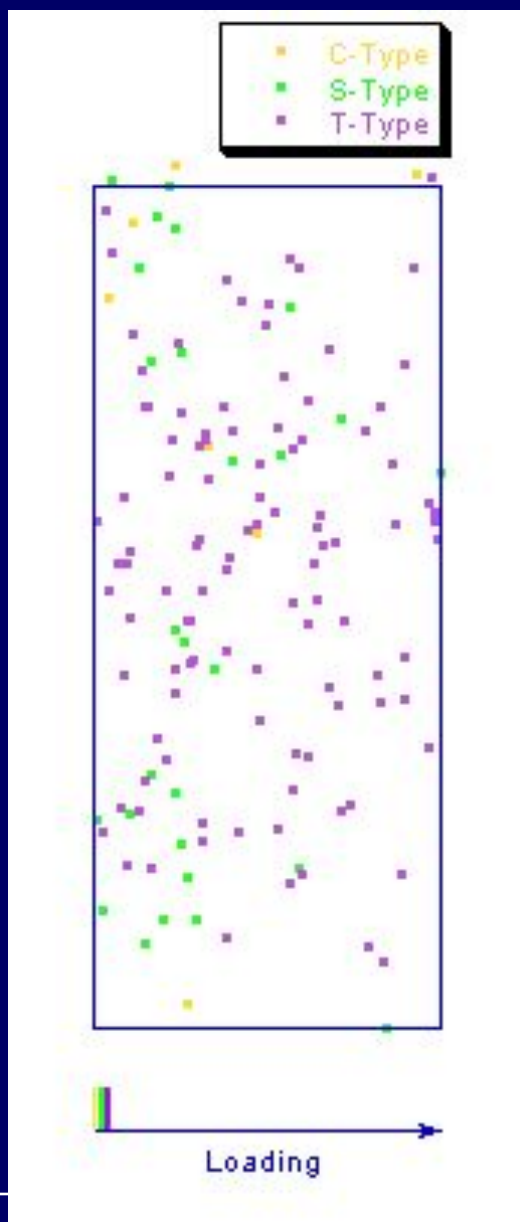
□ **Модель лавинно-неустойчивого трещинообразования (ЛНТ).**

Стадия 1. Растрескивание статистически однородно по пространству, рост напряжений вызывает увеличение плотности трещин.

Стадия 2. После превышения плотностью трещин некоторого критического уровня трещины начинают взаимодействовать между собой, что вызывает ускоренный их рост на второй стадии процесса. Эта стадия характеризуется ростом деформации и пористости.

Стадия 3. Укрупнение трещин в некоторой локальной зоне и, соответственно, падением напряжений и деформаций в окружающей среде.

Стадия 4. Укрупненные трещины в локальной зоне сливаются между собой и развивается магистральный разрыв, сопровождающийся землетрясением.



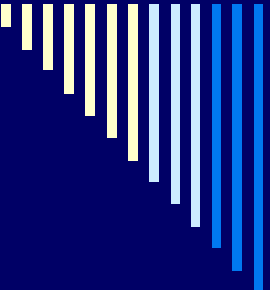


Модели подготовки землетрясений.

- Модель прерывистого скольжения.

$$\Delta\sigma = 2 \left[\mu_s - \mu_k / (1 - \eta) \right] \sigma_n$$

Если сдвиговое напряжение на разломе растет во времени, то скольжение начнется тогда, когда напряжение превысит трение покоя $\mu_s \sigma_n$. Процесс прерывистого скольжения сложным образом зависит от условий контакта бортов разлома, от шероховатости контактирующих поверхностей, от механических свойств массива, вмещающего контактирующие блоки. Введение зависимости динамического коэффициента трения от скорости движения позволяет получить определенный набор устойчивых типов прерывистого скольжения, которые удобно описывать в терминах нелинейной динамики.



Землетрясения, индуцированные инженерной деятельностью человека.

- В результате воздействия человека на верхние слои земной коры происходит изменение напряженного состояния среды. Это может вызвать разрушение горного массива и/или подвижки по существующим нарушениям сплошности.
- **Техногенные землетрясения:**
 - естественные тектонические напряжения невелики,
 - магнитуда индуцированных землетрясений составляет 0 – 3
 - гипоцентры землетрясений расположены в пределах объекта, оказывающего воздействие (например, месторождения), или на его границах.
 - наиболее характерные примеры – горные удары и микросейсмичность при проведении гидроразрыва пласта на месторождениях нефти.
- **Техногенно-индуцированные землетрясения (наведенные, триггерные)**
 - высокий уровень естественных тектонических напряжений
 - нарушение стационарных деформационных режиммов
 - энергия может достигать максимальных для естественной сейсмичности значений и определяется тектоническими напряжениями в регионе
 - гипоцентры приурочены к области объекта, но могут удаляться от нее на километры.



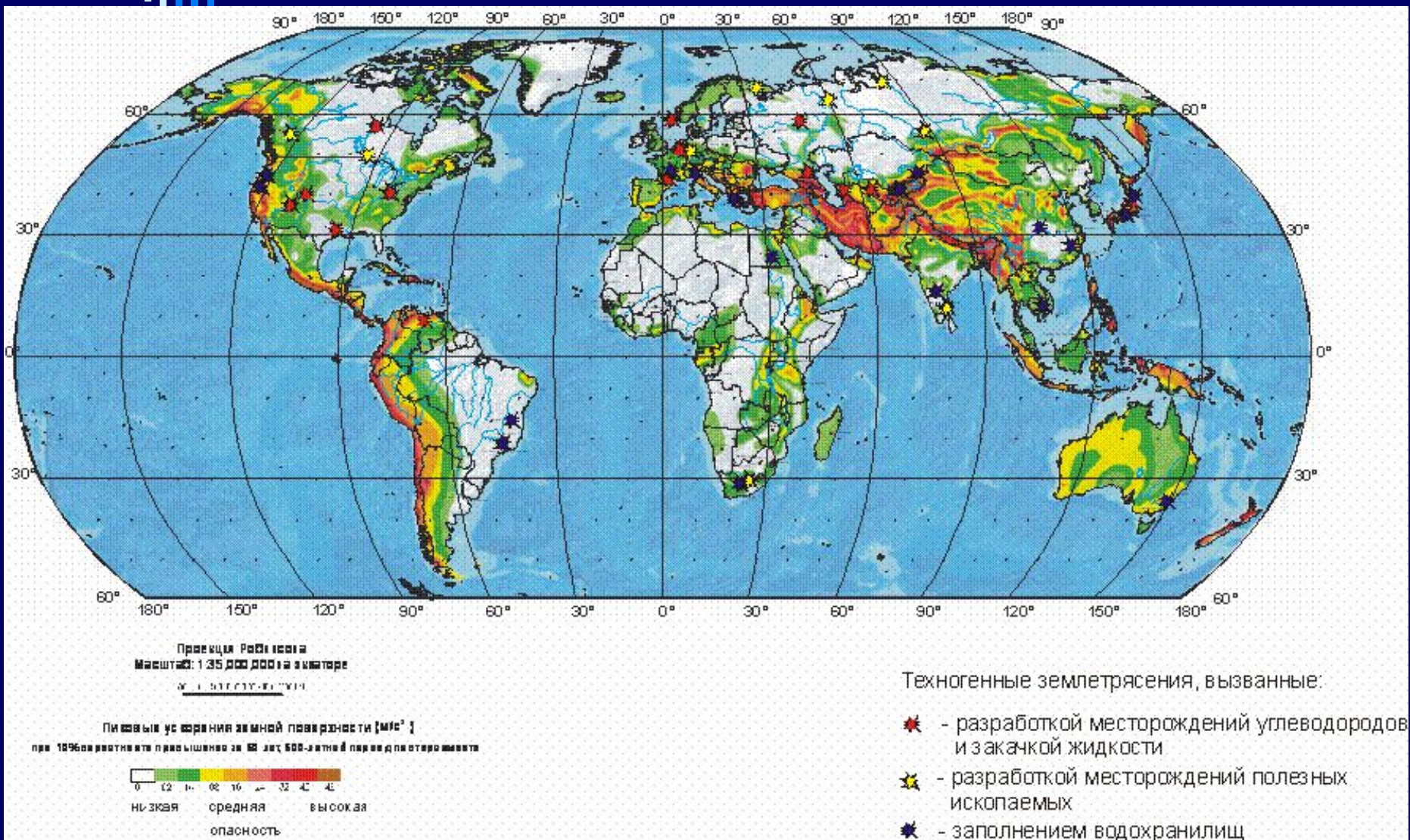
В настоящее время известны более 200 случаев возникновения техногенной сейсмичности, вызванной:

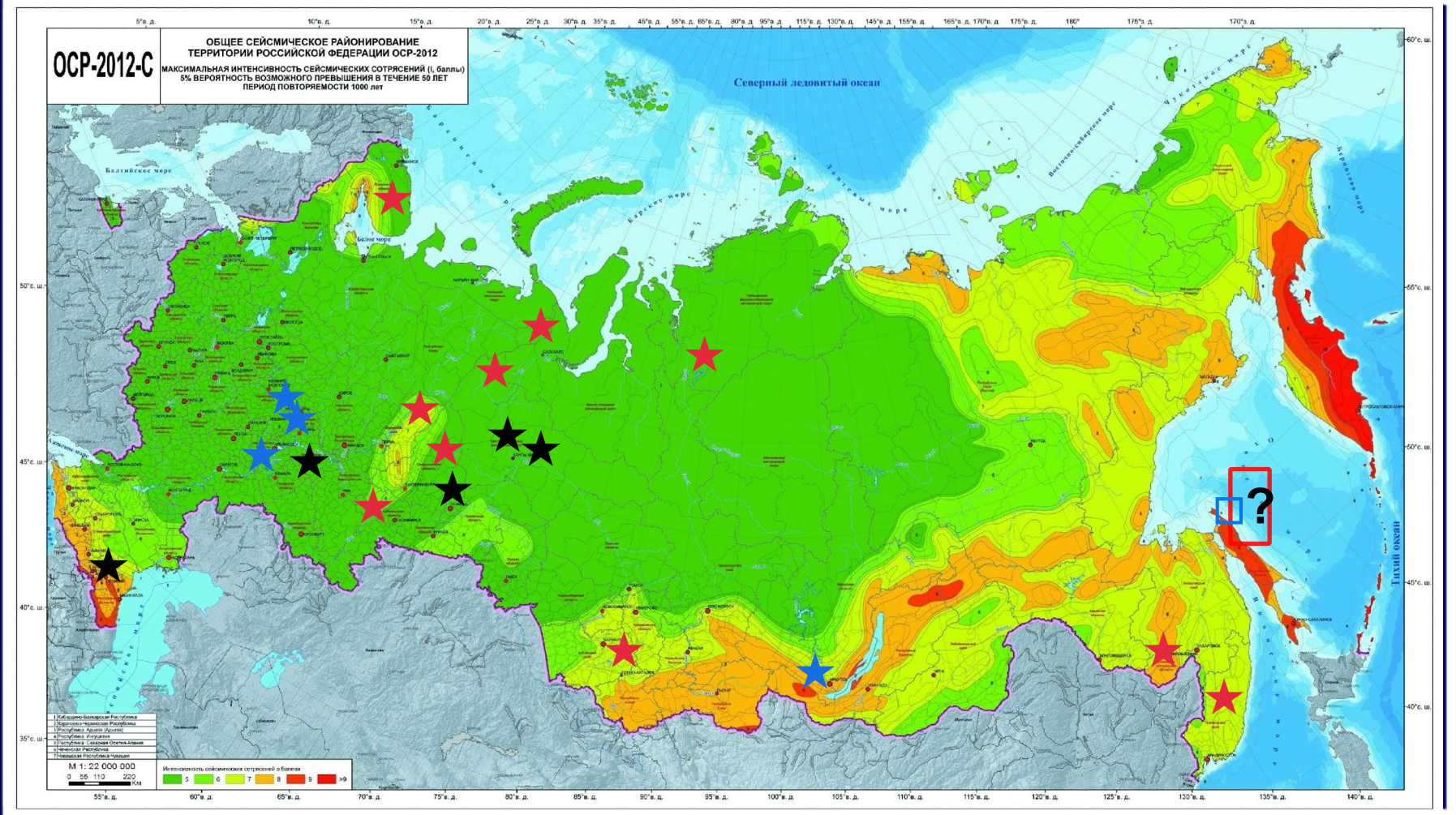
- заполнением водохранилищ,
- добычей полезных ископаемых,
- разработкой месторождений нефти и газа



- Самое сильное землетрясение из числа индуцированных водохранилищами произошло вблизи плотины Коупа в Индии. Магнитуда этого землетрясения 6.5, в результате погибло 200 человек, ранено 1500, значительные повреждения нанесены плотине.
- Сильнейшими из индуцированных землетрясений являются три землетрясения с магнитудами до 7.3, произошедшие в районе Газлийского газового месторождения. Эти землетрясения полностью разрушили пос. Газли и привели к многочисленным человеческим жертвам.
- Магнитуда шахтных сейсмических событий достигает 5, горно-тектонические землетрясения приводят к человеческим жертвам.

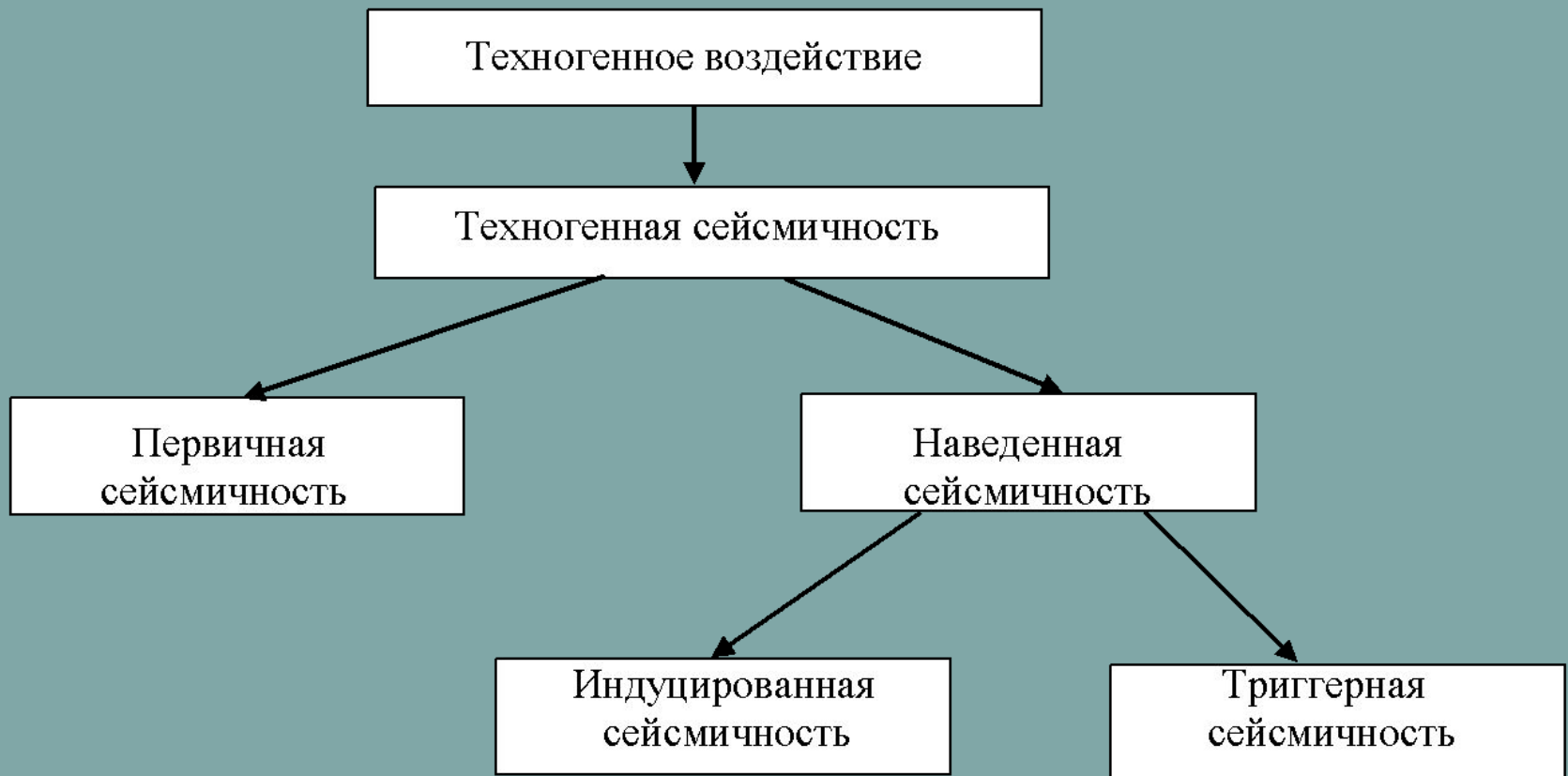
Географическое распределение техногенной сейсмичности в сопоставлении с опасностью естественных землетрясений.





ТЕХНОГЕННАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ В СОПОСТАВЛЕНИИ С СЕЙСМИЧЕСКИМ РАЙОНИРОВАНИЕМ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

Классификация техногенной сейсмичности



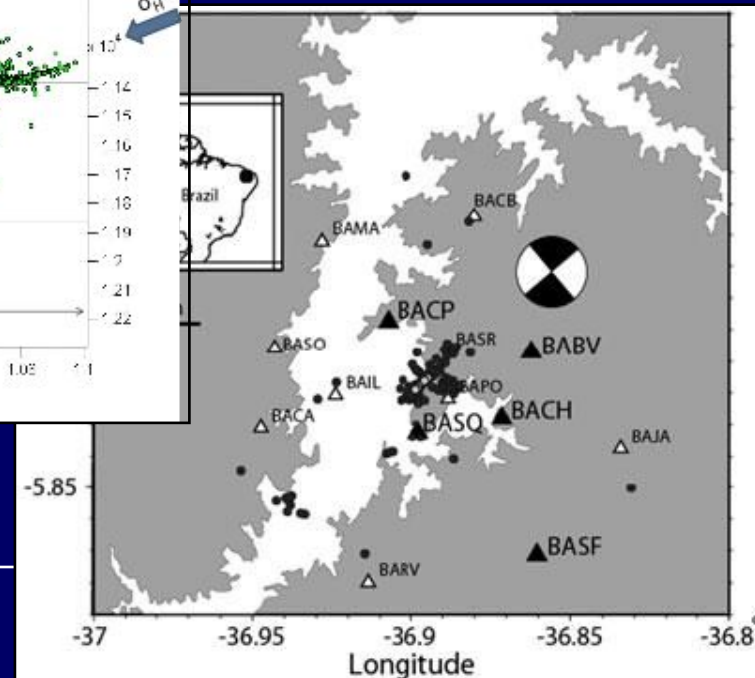
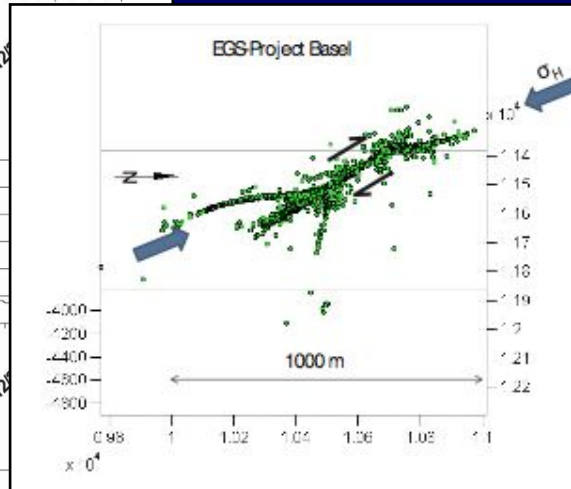
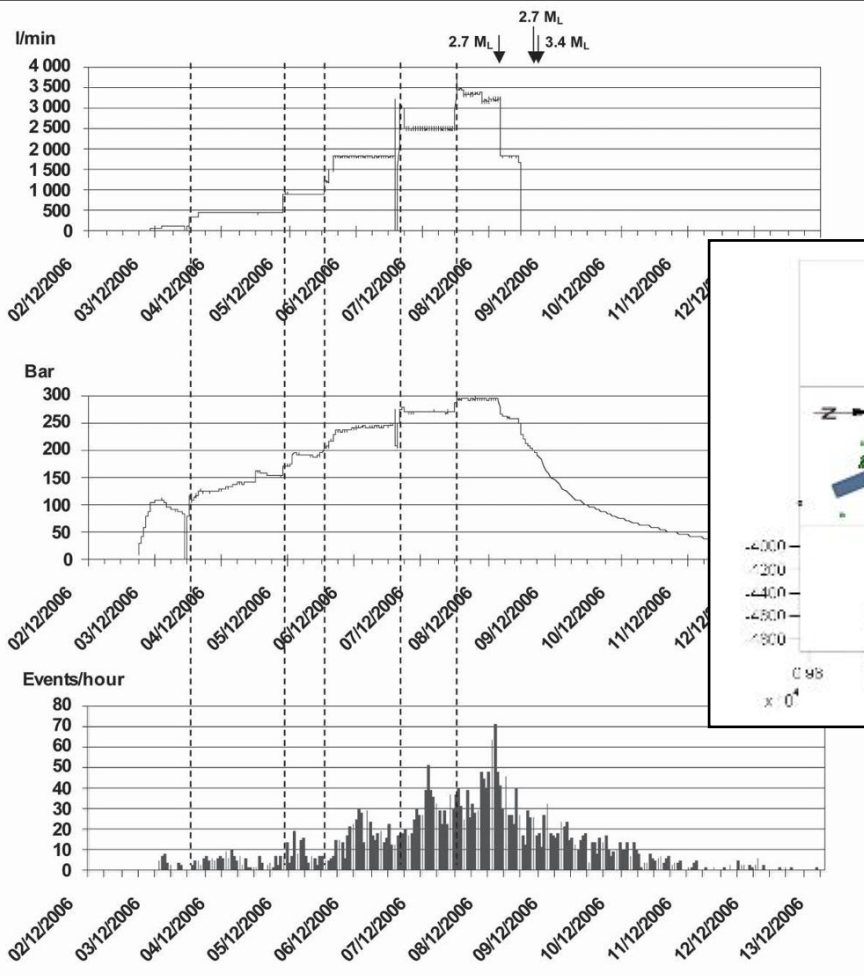
Техногенная сейсмичность, вызванная закачкой жидкости



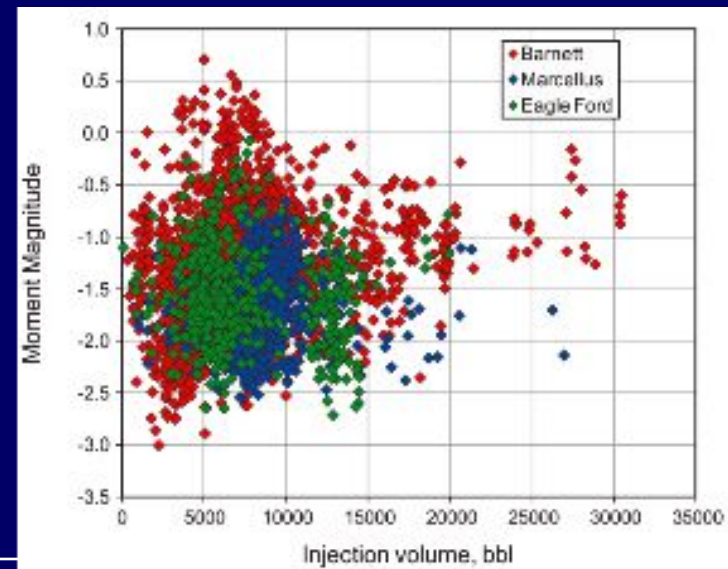
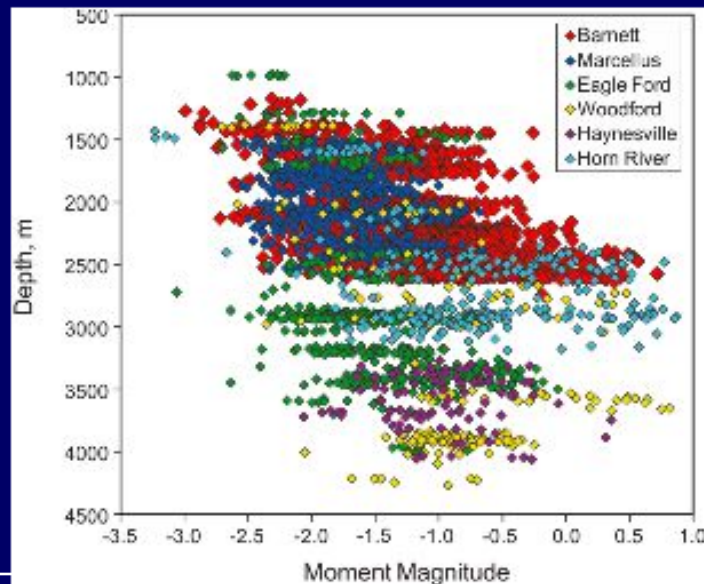
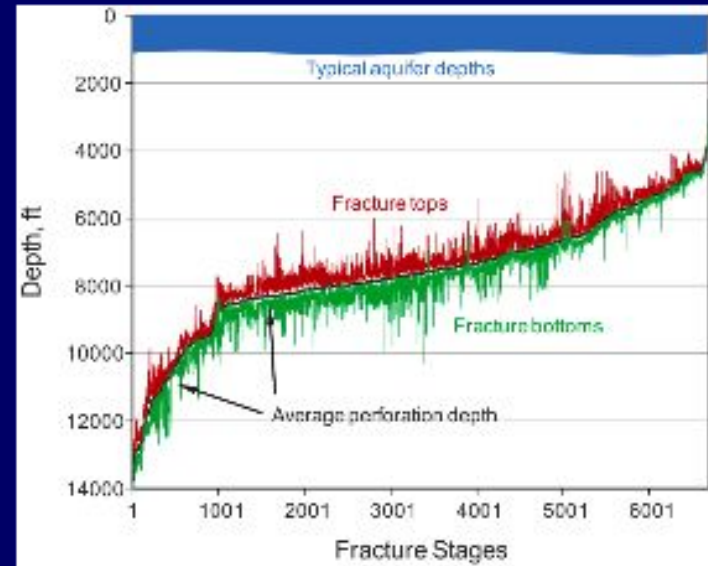
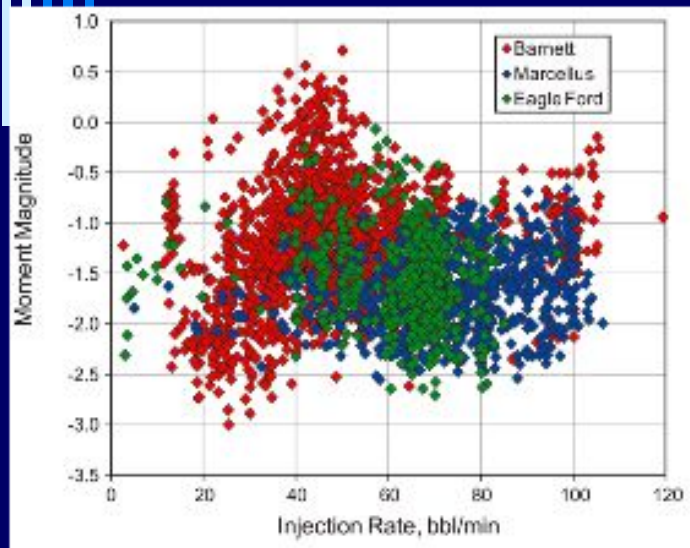


Базельский геотермальный проект

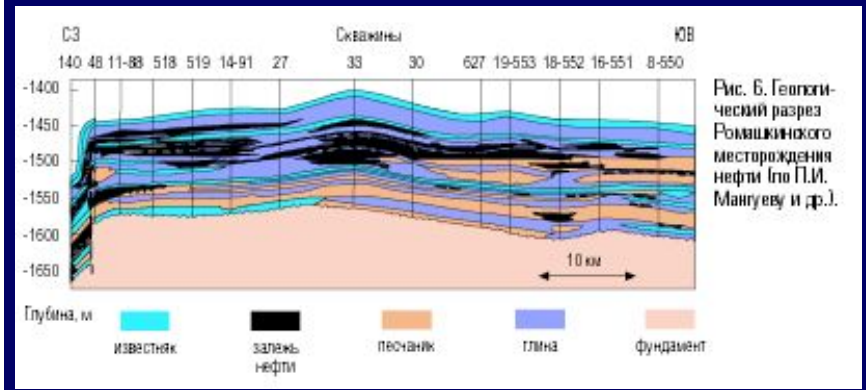
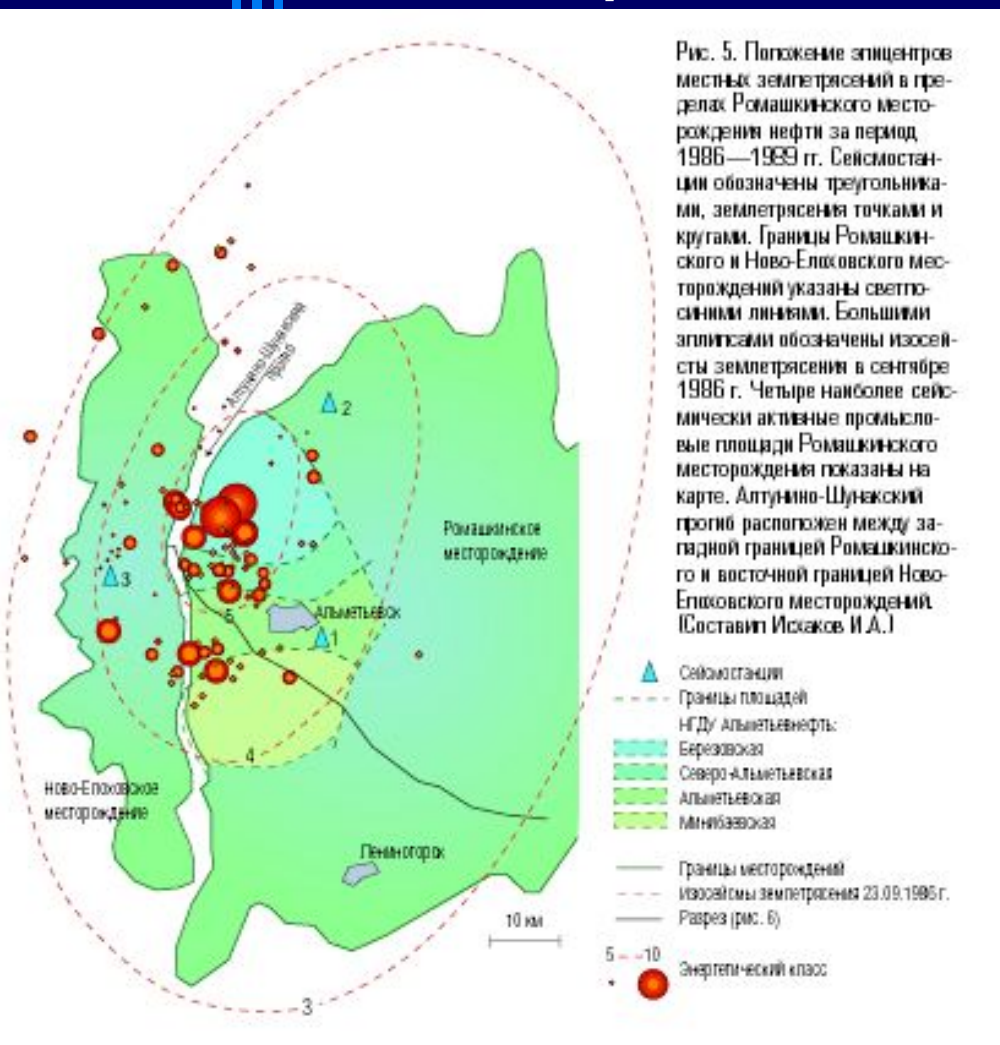
Усиление сейсмической активности при закачке воды в глубокие скважины на геотермальных электростанциях привело к остановке проекта в Базеле, Швейцария, в который были инвестированы миллионы евро, угрожает остановке аналогичных проектов (стоимостью до 100 миллионов евро) на юге Германии и других регионах Европы.



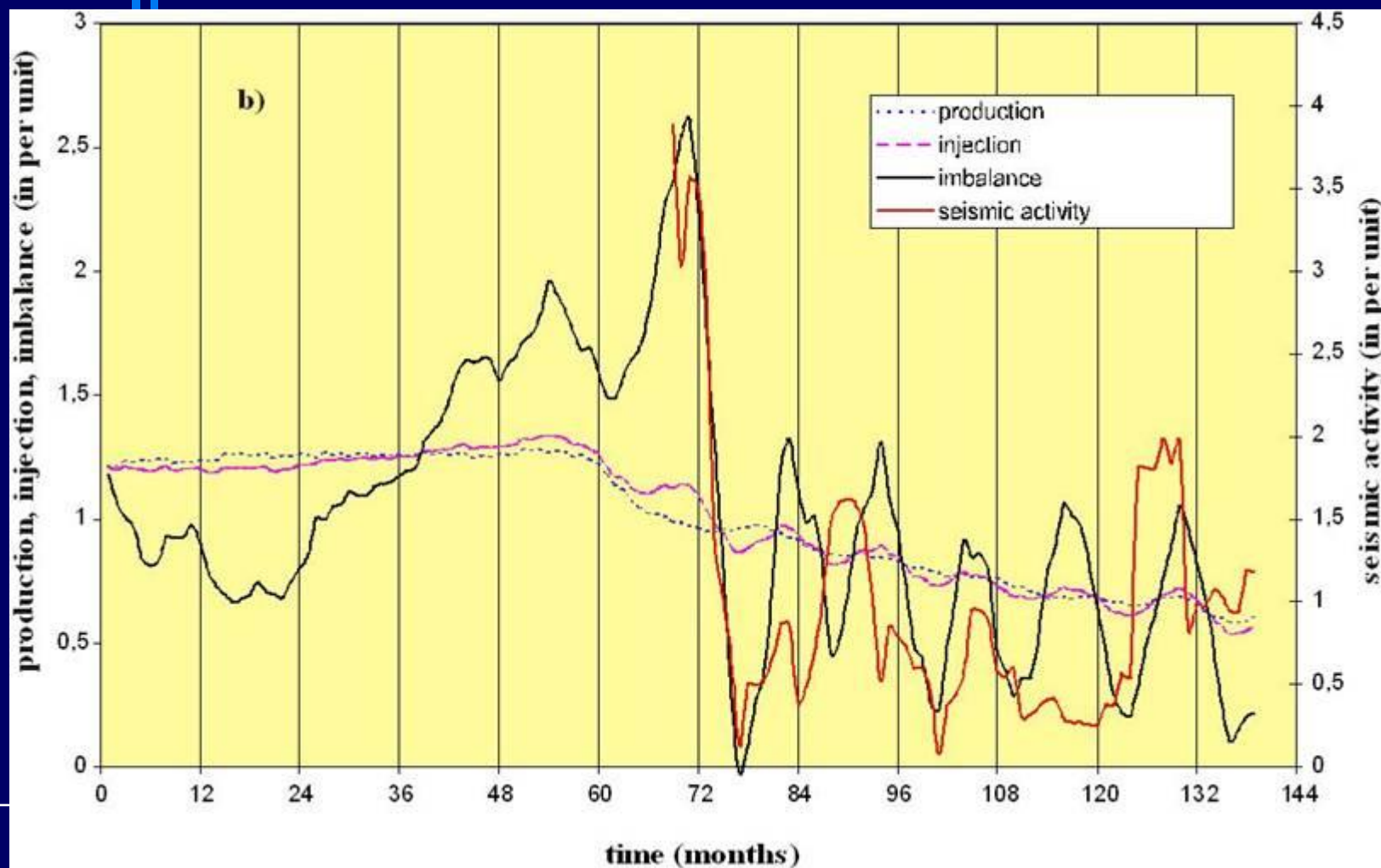
Техногенная сейсмичность при гидроразрыве пласта



Сейсмичность Ромашкинского месторождения нефти

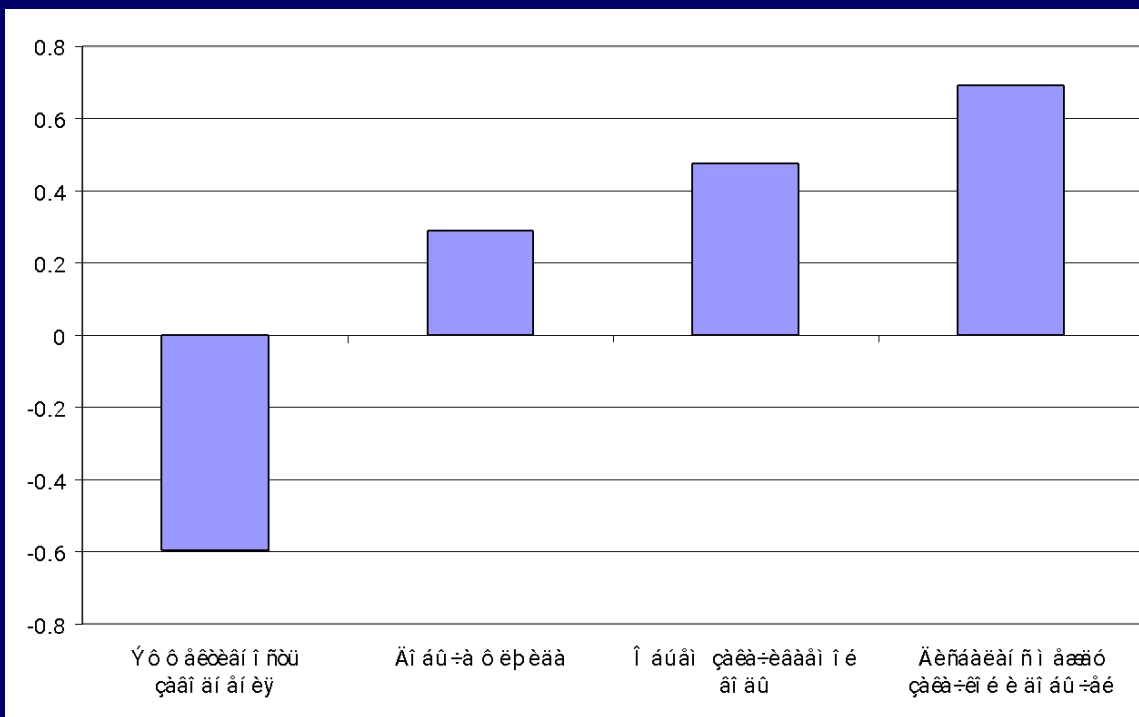


Изменение сейсмичности в районе Ромашкинского месторождения нефти в сопоставлении с вариациями объемов добычи и закачки жидкости и дисбаланса.



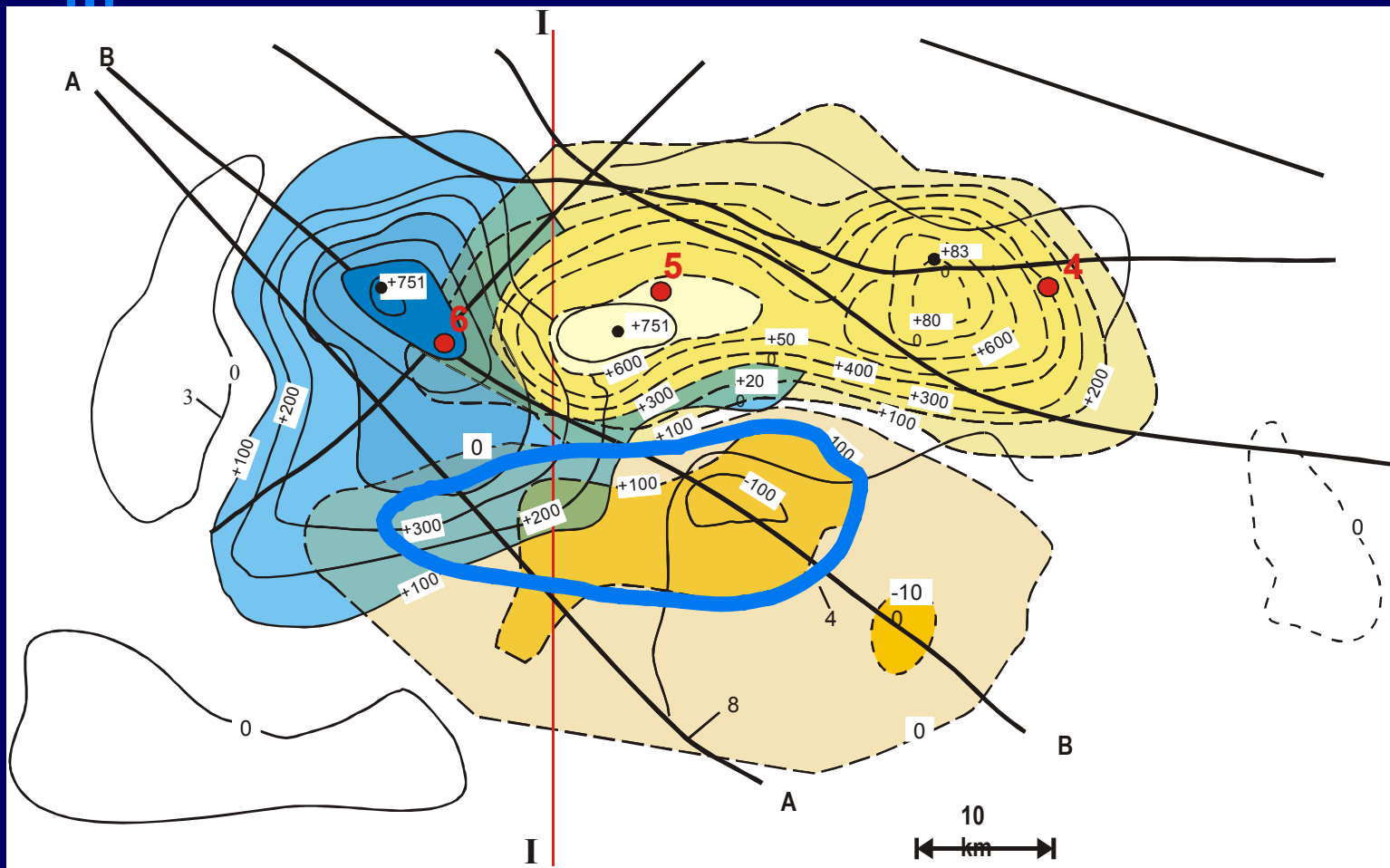
Взаимодействие техногенных воздействий при разработке месторождений углеводородов и сейсмодеформационных режимов

- Усиление техногенной сейсмичности вызывается дисбалансом между объемами закачанной и добытой жидкостями и совпадением периодов изменения объемов закачки при нестационарном заводнении с периодами естественных сейсмодеформационных режимов.
- Рост техногенной сейсмической активности ведет к падению эффективности мер по увеличению нефтеотдачи



Коэффициенты корреляции между сейсмической активностью и показателями разработки Ромашкинского месторождения нефти

Деформации земной поверхности в зоне катастрофических Газлийских землетрясений. Показан контур месторождения газа.



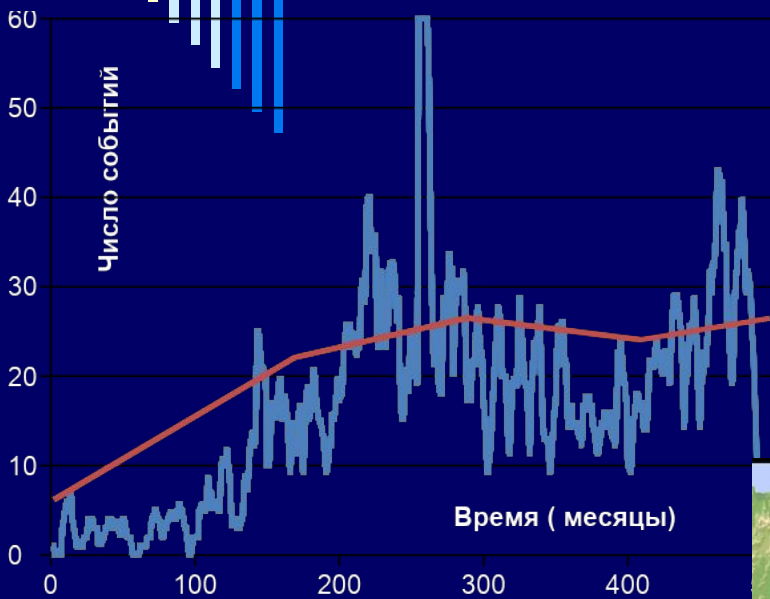


Последствия землетрясения в Нефтегорске

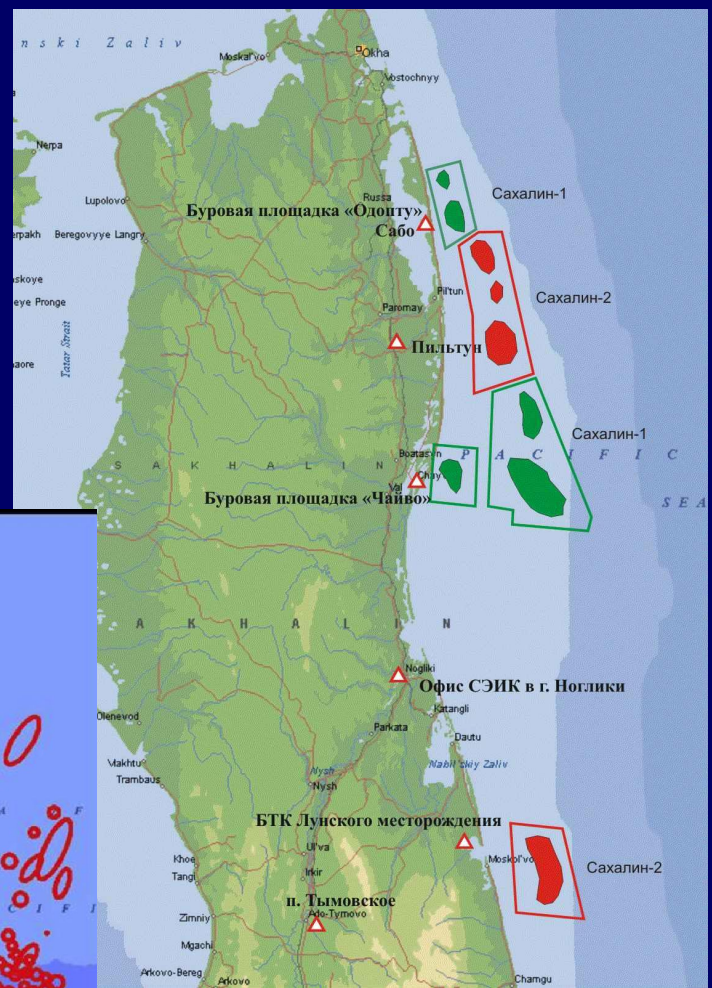
Ряд ученых полагает, что разработка месторождения привела к усилению сейсмического эффекта Нефтегорского землетрясения.



Сейсмичность в районе месторождений углеводородов шельфа о-ва Сахалин.



Контуры месторождений, разрабатываемых по проектам Сахалин-1,2 и положение сейсмостанций



Изменение сейсмической активности и объема добычи нефти на о.Сахалин в период 1950-1991гг.



Эпицентральные области землетрясений и основной тектонический разлом о. Сахалин



Модели техногенной сейсмичности

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} p \right)$$

$$\tau = \tau_0 + \mu(\sigma_n - p)$$

$$\mu = \mu_0 - a \ln \left(\frac{v^*}{|v|} \right) + b \ln \left(\frac{v^* \theta}{D_c} \right)$$

$$M_0 = G \int D dS$$

$$M_w = \frac{\log_{10} M_0}{1.5} - 6.06$$

Для решения вопросов о возникновении и распространении сейсмических событий при изменении порового давления необходимо:

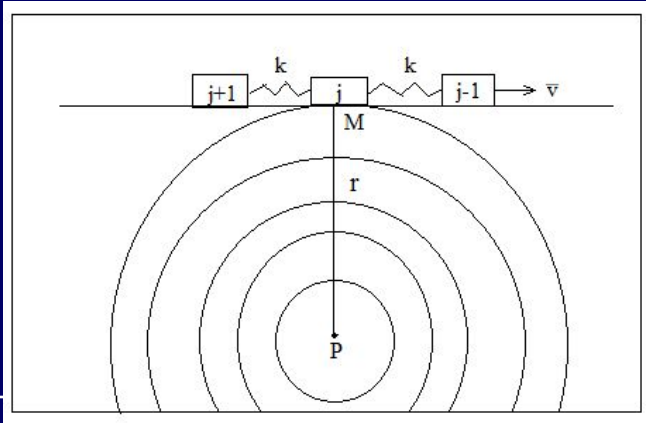
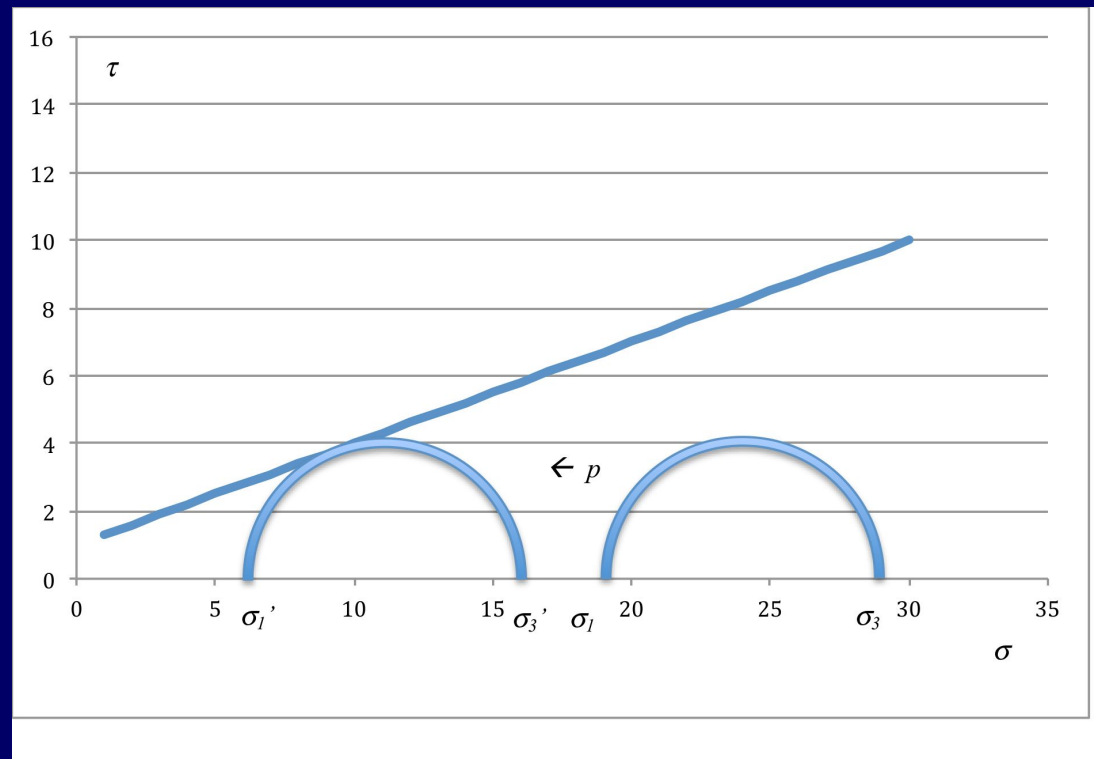
- решить задачу о распространении порового давления,
- задать то или иное распределение значений критического уровня порового давления, при котором происходит сейсмическое событие,
- сформулировать модель, позволяющую оценить магнитуды ожидаемых сейсмических событий.

Модели техногенной сейсмичности

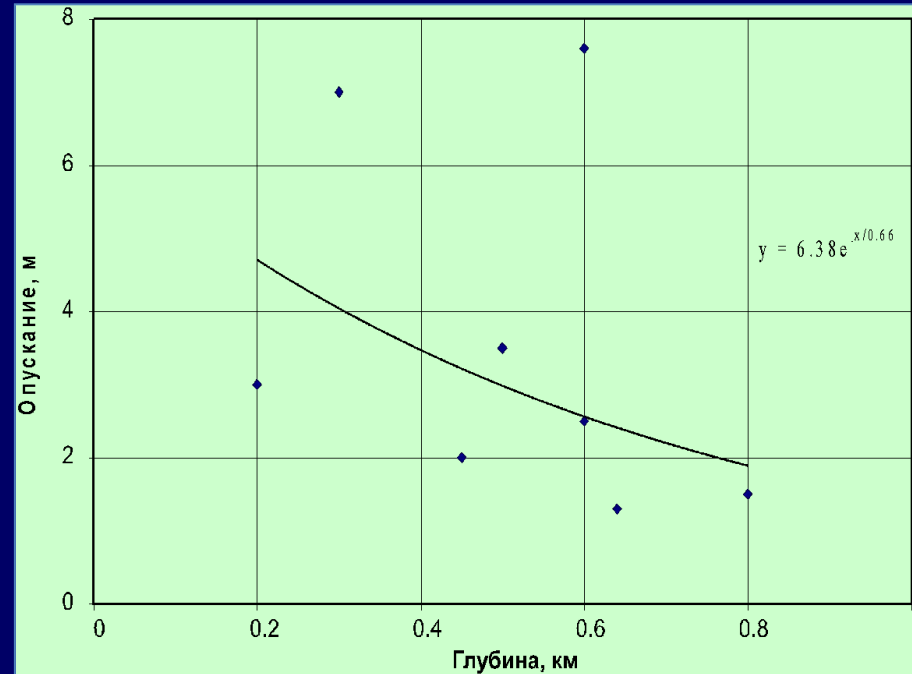
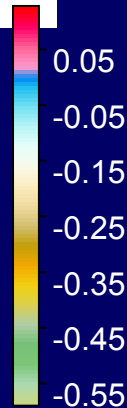
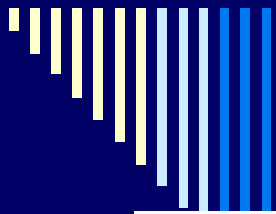
$$\tau = \tau^* + a \ln \left(\frac{v^*}{|v|} \right) + \theta_1 + \theta_2$$

$$\tau^* = \tau_0 + \mu(\sigma_n - p)$$

$$\dot{\theta}_i = -\frac{v}{L_i} (\theta_i + b_i \ln (v/v^*))$$



Деформации земной поверхности при разработке месторождений углеводородов



Связь между величиной проседания поверхности и глубиной расположения разрабатываемого пласта месторождения углеводородов. Данные аппроксимированы экспоненциальной зависимостью

Изменение уровня земной поверхности над месторождением Уилмингтон, Калифорния, США:

- а) в ходе добычи нефти в 1926-1960 гг. без закачки воды;
- б) в результате закачки воды в 1960-1967 гг.



Литература

- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика, т.VII. Теория упругости.
 - Родионов В.Н., Сизов И.А., Цветков В.М. Основы геомеханики.
 - Адушкин В.В., Турунтаев С.Б. Техногенные процессы в земной коре.
 - Болт Б. В глубинах Земли.
 - Рихтер Ч. Элементарная сейсмология.
-