



Казахский Национальный Исследовательский Технический
Университет,
Институт Геологии и Нефтегазового Дела
Кафедра “Геофизики”

Сейсмогеофизические предвестники и стратегия прогнозирования землетрясений

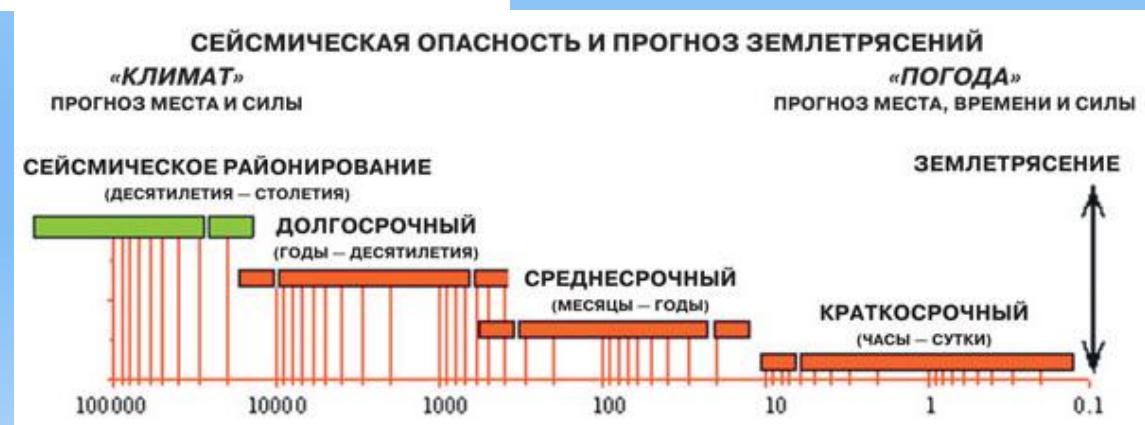
Лекция 2

Обзорная лекция по сейсмогеофизическим предвестникам
землетрясений

Преподаватель: Абетов Ауэз Егембердыевич – профессор,
доктор геол.-мин. наук, академик НАН РК

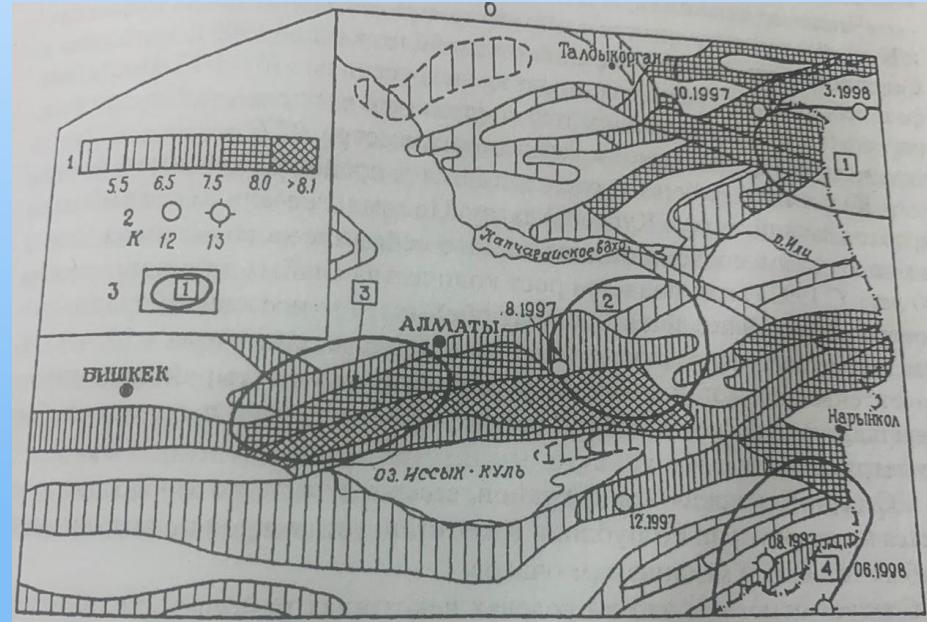
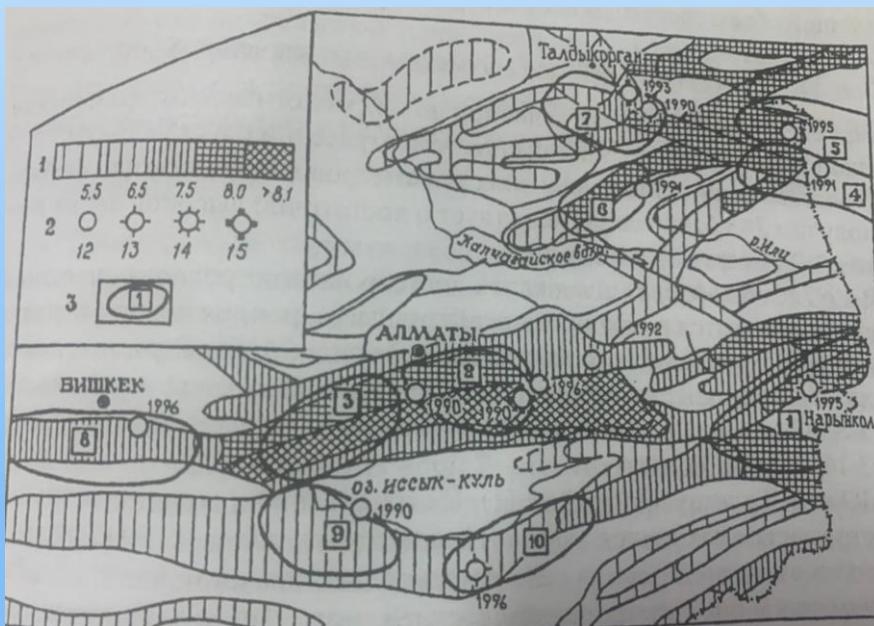
Возможность прогноза землетрясений

Прогнозы землетрясения по времени:



Долгосрочный прогноз землетрясений

Долгосрочный прогноз призван выявить сейсмически опасные зоны на ближайшие десятилетия. В его основе лежит изучение многолетней цикличности хода сейсмотектонического процесса, выявление периодов активизации, анализ сейсмических затишьй, миграционных процессов и т.д. Сегодня на карте земли очерчены все области и зоны, в которых могут случиться землетрясения, а значит, известно, где нельзя строить, например, атомные электростанции и где надо строить сейсмостойкие дома.



Карты долгосрочного прогноза сильных землетрясений Северного Тянь-Шаня и Джунгарии:

1 карта-1990-1996 гг, 2-карта 1997-2002 гг.

Условные обозначения: 1 – зона возможного возникновения очагов землетрясений по сейсмотектоническим данным; 2 – энергетическая классификация землетрясений; 3 – районы вероятного возникновения землетрясений с $M \geq 5,0-5,5$ ($K \geq 13-14$) в ближайшие 5-7 лет

Введение. Долгосрочный прогноз

Долгосрочное прогнозирование сейсмически опасных зон включает в себя анализ различных геологических и тектонических факторов для предсказания областей, которые могут подвергаться значительной сейсмической активности. Это прогнозирование основывается на понимании циклической природы сейсмических событий и процессов, которые их вызывают.

Результаты проведенных фундаментальных научных исследований позволяют осуществить мониторинг сейсмической опасности путем составления карт долгосрочного прогноза землетрясений (КДПЗ). Обычно на них показываются районы, в которых в ближайшие 5-7 лет вероятность возникновения землетрясения с $M \geq 5,0 - 5,5$ ($K \geq 13-14$) повышенна. Такие карты составляются один раз в 2-3 года и постоянно уточняются по мере получения новых данных и появления новых методических разработок.

Ключевые концепции

Сейсмотектонические процессы — это движения и взаимодействия тектонических плит Земли. К ним относятся субдукция, столкновение и движение плит относительно друг друга, которые вызывают напряжение в земной коре.

Цикличность — сейсмические регионы в которых крупные землетрясения происходят с регулярными или квазирегулярными интервалами. Эта цикличность может быть следствием накопления тектонического напряжения с течением времени, за которым следует внезапное освобождение во время землетрясения.

Анализ исторических данных - изучение исторических записей землетрясений, помогаю выявлять прогнозы и частоту сейсмических событий, установить интервалы повторяемости, которые указывают на то, как часто значительные землетрясения могут происходить в данной области.

Геологические индикаторы: геологические особенности, такие как разломы, слои осадков и предыдущая сейсмическая активность, могут дать подсказки о потенциальных будущих событиях. Палеосейсмология, изучающая древние землетрясения, может выявить долгосрочные прогнозы.

Мониторинг и моделирование: Современные сети сейсмического мониторинга собирают данные в реальном времени о тектонических движениях. В сочетании с компьютерными моделями эта информация может помочь уточнить долгосрочные прогнозы, моделируя накопление и освобождение напряжения

Методология долгосрочного прогноза землетрясений на основе параметров сейсмического режима, локализации и миграции сейсмичности

- *Параметры сейсмического режима* - основаны на выявленных пространственно-временных вариациях комплекса сейсмических характеристик. На их основе разработаны обобщенные модели поведения сейсмических предвестников и установлены зависимости их продолжительности от магнитуды и эпицентральных расстояний.
- *Локализация сейсмичности* - базируется на многостадийности процесса подготовки сильных землетрясений (активизация, затишье, миграция, кольцевая сейсмичность)
- *Миграция сейсмичности*: основан на том, что процесс подготовки сильного землетрясения начинается активизацией сейсмичности в конкретном районе, которая затем мигрирует в периферийную часть области подготовки, что выражается линейной зависимостью между расстоянием от эпицентра до центра района (R) и продолжительностью времени проявления (ΔT).
- Впервые в Казахстане карта долгосрочного прогноза землетрясений составлена в конце 80-х годов. По мере накопления новых материалов и усовершенствования методик она уточнялась через каждые 2-3 года.

Исходя из результатов проведенных исследований составление карты долгосрочного прогноза проводится в два этапа. **На первом этапе** при помощи методов «Сейсмический цикл», «Глобальные геофизические факторы» выделяются периоды повышенной вероятности возникновения сильных землетрясений в пределах крупных сейсмоактивных регионов и зон (500 км.кв). При этом продолжительность времени ожидания составляет 7-10 лет, а магнитуда возможных землетрясений $M \geq 5,5-6,0$.

На втором этапе определяются место и время возникновения конкретных событий. Для этого используется «Сейсмический цикл», «Параметры сейсмического режима», «Локализация сейсмичности», и «Миграция землетрясений».

Проблемы и ограничения долгосрочного прогноза землетрясений

• Сложность и многокомпонентность геодинамических процессов

Земная кора и верхняя мантия находятся в постоянном движении, и на процессы, происходящие в них, одновременно воздействует множество факторов: тектонические сдвиги, температурные и давленческие градиенты, фазовые переходы в минералах, глубинные флюиды и др. Такая многослойная система затрудняет точное описание предвестников землетрясений.

• Недостаточность и неоднородность исходных данных

Во многих регионах отсутствует плотная сеть сейсмологических и геофизических станций. Это приводит к пробелам в наблюдениях, что снижает точность оценки параметров сейсмического режима и увеличивает неопределённость прогноза.

• Неопределённость и упрощённость используемых моделей

Долгосрочные прогнозы чаще всего опираются на эмпирические закономерности и статистику прошлых землетрясений. Эти подходы не всегда учитывают современные представления о глубинных процессах, а модели могут не быть универсальными и не применяться к другим регионам.

• Нестабильность сейсмических циклов и отсутствие повторяемости

Некоторые регионы демонстрируют чёткие циклы сейсмической активности, но в других может наблюдаться хаотичное поведение без видимой периодичности. Это ограничивает возможность использования «сейсмического цикла» как надёжного инструмента долгосрочного прогноза.

• Трудности интерпретации предвестников

Существующие предвестники (например, микросейсмическая активность, деформации, геохимические аномалии) могут наблюдаться и в периоды, не предшествующие сильным землетрясениям. Это создаёт высокую вероятность ложных срабатываний или пропуска событий.

• Невозможность точного определения времени и места

Даже если установлена повышенная вероятность сильного землетрясения в течение определённого временного окна, локализация его по координатам и времени остаётся приближённой. Это снижает практическую ценность долгосрочного прогноза для принятия решений.

• Социальные и политические ограничения

Прогнозы землетрясений могут вызывать панику или негативно влиять на экономику региона (например, на страхование, инвестиции, миграцию населения). Поэтому существует осторожность в публичной публикации даже научно обоснованных долгосрочных прогнозов.

• Ограниченные возможности валидации прогнозов

В отличие от краткосрочных прогнозов, долгосрочные (на 5–10 лет) проверяются временем, и их корректность может быть установлена только задним числом. Это затрудняет калибровку и усовершенствование моделей в реальном времени.

• Игнорирование скрытых или слабоизученных разломов

Многие землетрясения происходят на неизвестных ранее разломах или в областях, ранее считавшихся сейсмически спокойными. Это указывает на неполноту геологической и тектонической карты.

• Влияние внешних природных и антропогенных факторов

В некоторых случаях активизация сейсмичности может быть вызвана не только естественными процессами, но и техногенными воздействиями: добыча полезных ископаемых, строительство водохранилищ, закачка жидкостей в недра и т.п. Это добавляет дополнительную переменность в сейсмическую обстановку.

Среднесрочный и краткосрочный прогнозы землетрясений

Среднесрочный прогноз землетрясений

Среднесрочный прогноз основывается на выявлении аномалий, предшествующих сейсмическим событиям. В научной литературе описано более сотни возможных предвестников, из которых около 20 считаются наиболее значимыми.

Перед землетрясениями часто наблюдаются следующие изменения: исчезновение фоновых слабых толчков, деформации земной коры, аномалии в электрических и магнитных свойствах пород, снижение уровня и температуры подземных вод, изменение их химического и газового состава и другие явления.

Однако основная трудность среднесрочного прогнозирования заключается в том, что такие аномалии могут проявляться за пределами зоны будущего очага, что затрудняет их интерпретацию. Кроме того, ни один из известных предвестников не является универсальным.

Парадоксально, но одним из ключевых признаков надвигающегося землетрясения считается как раз исчезновение или ослабление ряда устойчивых среднесрочных аномалий.

Краткосрочный прогноз землетрясений

Краткосрочный прогноз пытается выявить признаки землетрясения за часы, дни или недели до события. Он основан на предположении, что в земной коре уже начался скрытый процесс формирования разлома.

К возможным предвестникам относят микроземлетрясения, деформации, электромагнитные аномалии, изменения подземных вод и радона. Однако большинство этих признаков слабо изучены и не всегда надёжны.

Из-за этого прогноз основывается в основном на анализе текущей сейсмической обстановки. Хотя точное краткосрочное предсказание пока невозможно, технологии и методы наблюдения продолжают развиваться

Краткосрочный прогноз землетрясений

Для краткосрочного прогнозирования землетрясений в настоящее время используются различные сейсмогеофизические предвестники землетрясений: сейсмогравитационные, неприливные вариации силы тяжести, геохимические, сейсмогидрогеологические, вариации гравитационного поля, электрические, магнитные, электромагнитные, оптические и др.

Сейсмогеофизические предвестники землетрясения

Это закономерное изменение различных параметров геофизических полей в геосферах, предваряющее возникновение отдельного землетрясения или группы землетрясений. Предвестники вызываются процессом подготовки землетрясения. Насчитывается несколько сотен различных предвестников землетрясений, однако ни один из них не даёт точных указаний на время, место и силу предстоящего землетрясения.

В различных сейсмоактивных районах разные предвестники работают по-разному; разброс в оценках места, времени и силы будущего землетрясения очень велик. Это связано не только со сложностью самого очага землетрясения и отсутствием количественной теории процесса подготовки землетрясения, но и с существенным влиянием различных помех. Поэтому прогноз землетрясений имеет вероятностный характер.

Все известные в настоящее время сейсмогеофизические предвестники обусловлены закономерным изменением геофизических полей на разных этапах подготовки землетрясения – наблюдаются статистически значимые (аномальные) отклонения текущих значений регистрируемых параметров от их долговременных значений.

К этой группе относятся сейсмические, гидрографические, деформационные, геохимические, электромагнитные, геотермические, геоакустические, ионосферные и др. предвестники, которые присутствуют практически во всех диапазонах прогноза по времени: от минут до десятилетий.

Анализ многолетних данных по ряду геофизических (в основном сейсмологических) предвестников показал, что вероятность успешного прогноза по каждому из них не превышает 50 %.

Одним из возможных выходов из этой ситуации является совместное использование нескольких прогностических признаков, поскольку каждый отдельный предвестник отражает ту или иную сторону процесса подготовки землетрясения и сам по себе не является достаточно информативным с точки зрения статистики.

Краткосрочный прогноз землетрясений

Комплексное использование различных предвестников позволяет повысить надёжность и эффективность прогноза. Практика последних лет показала оправданность такого подхода, по крайней мере, для среднесрочного прогноза (прогноза на ближайшие годы).

Многим землетрясениям, особенно крупным, предшествовали некоторые явления, не характерные для данной местности. В результате систематизации данных по крупным землетрясениям XVII - XXI веков, а также по летописям, в которых упоминаются события, связанные с землетрясениями, был установлен ряд некоторых типичных явлений, которые могут служить оперативными предвестниками землетрясений. Так как землетрясения имеют различные механизмы возникновения, происходят в разных геологических условиях, в разное время суток и года сопутствующие явления, служащие предвестниками, тоже могут быть различными.

Практически все явления предвестники по состоянию на начало 2010-х годов имеют научное объяснение. Тем не менее, использовать их для оперативного оповещения удается крайне редко, поскольку явления-предвестники не являются специфичными именно для землетрясений. Например, атмосферные световые явления могут возникать в периоды геомагнитных бурь или иметь техногенную природу и т.п.

В настоящее время выделяют следующие явления, которые могут служить предвестниками землетрясений: форшоки, аномальные атмосферные явления, изменения уровня грунтовых вод и т.п.

Форшоки

Умеренные и слабые землетрясения, которые предшествуют сильному. Возникают на фоне долгого (десятки-сотни лет) затишья за месяц-полтора до сильного землетрясения. Более всего исследовались как предвестники японскими сейсмологами.

До сих пор ученым не удавалось ответить на ряд принципиальных вопросов: почему не всем землетрясениям предшествуют форшоки, какова их природа и можно ли с помощью форшоков предсказать более разрушительное землетрясение.

Высокая форшоковая активность в сочетании с другими явлениями может служить оперативным предвестником. Так, например, Китайское сейсмологическое бюро на этом основании начало эвакуацию миллиона человек за день до сильного землетрясения в 1975 году.

Форшоки землетрясений



Хотя половине крупных землетрясений предшествуют форшоки, из общего числа землетрясений форшоками являются только 5-10 %. Это часто порождает ложные предупреждения.

Хорошим предвестником, очевидно, форшоки могут служить только в тех районах, где землетрясения не отмечались десятилетиями.

В сейсмически активных областях встает трудноразрешимая задача научиться отличать форшоки от роя обычных слабых землетрясений. Впрочем, здесь может оказаться полезным наблюдение, сделанное на Гармском полигоне советскими сейсмологами И.Л.Нерсесовым и И.Г.Симбирцевой, которые заметили переориентацию осей напряжения в очагах слабых предшествующих землетрясений. На первом этапе ориентировка осей сжатия в очагах довольно хаотична. За год полтора до события они группируются в области азимутов 90-180°, а за 3-4 месяца оси сжатия резко меняют свои направления на азимуты менее 90°.

До сих пор ученым не удавалось ответить на ряд принципиальных вопросов: почему не всем землетрясениям предшествуют форшоки, какова их природа и можно ли с помощью форшоков предсказать более разрушительное землетрясение.

Новое исследование, обнародованное в журнале «Нейча геосаенс», пролило свет на некоторые из этих вопросов. В частности, выяснилось, что форшоки возникают при медленном сближении двух тектонических плит, столкновение которых и вызывает землетрясение.

Форшоки землетрясений

По мнению одного из авторов исследования, специалиста в области сейсмологии Института наук о Земле в Гренобле (Франция) Вирджиния Дюран, форшоки не являются причиной землетрясений, как считалось ранее, а лишь являются его предвестником.

Изучив несколько десятков землетрясений магнитудой 6,5 и более, произошедших в период между 1999 и 2011 годами, Вирджиния Дюран ее коллеги выяснили, что каждому из них предшествовал форшок и сопутствующее ему малозаметное увеличение сейсмоактивности, которое начиналось примерно за два месяца до самого землетрясения. Примерно за 20 дней до кульминации сейсмоактивность заметно увеличивалась, а за два дня до землетрясения начинала набирать обороты каждые несколько часов.

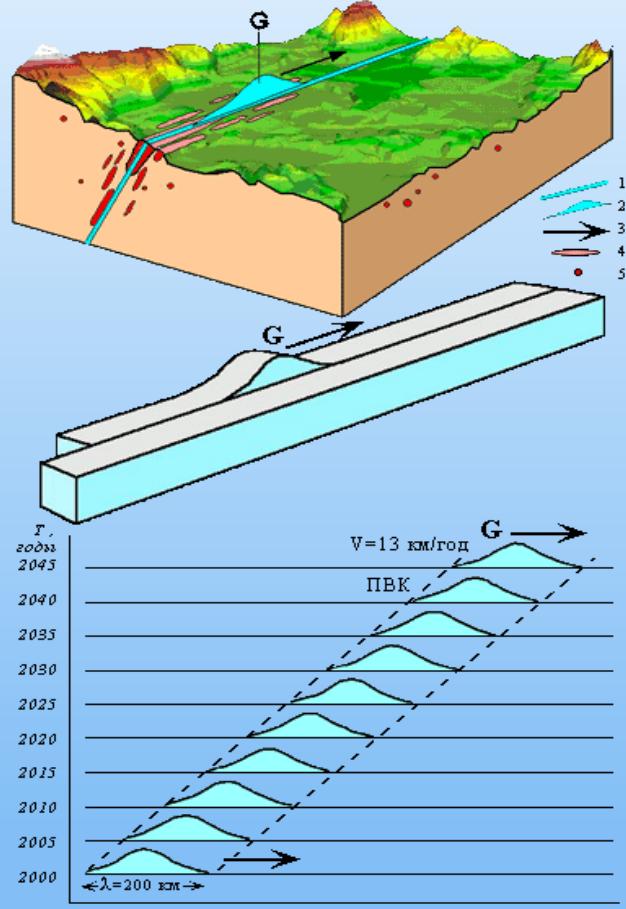
Тем не менее, этот принцип не работает в случае землетрясений, происходящих вне границ тектонических плит, при которых обычно не наблюдаются форшоки.

Пространственно-временной ход сейсмичности.

Метод был предложен в середине 1960-х годов советским сейсмологом С.А.Федотовым. При анализе большого статистического материала по землетрясениям в Курило-Камчатской зоне он обнаружил, что сильнейшие землетрясения мигрируют здесь и повторяются с периодом около 100 лет. При этом новые мощные землетрясения происходят в «молчавших» до этого времени участках, т.е. там, где их долгое время до этого не было. Эта методика долгосрочного прогноза подтвердилась сейсмическими событиями в Курило-Камчатской зоне в период 1965-1970 гг. В настоящее время достоверность прогнозов по методике А.С.Федотова оценивается в 70-80%.

Аналогичные результаты были получены и на Гармском полигоне в Таджикистане, где исследователи ИФЗ РАН обнаружили изменение сейсмического фона во времени и его связь с геологическими структурами. **Фон сначала растет в течение 7-8 лет, а затем в области будущего сильного землетрясения отмечаются сейсмические затишья.** Кроме того, на полигоне в результате длительных наблюдений был выявлен эффект изменения соотношения энергии высоких и низкочастотных волн перед землетрясениями.

Пространственно-временной ход сейсмичности



По данным В.И.Уломова

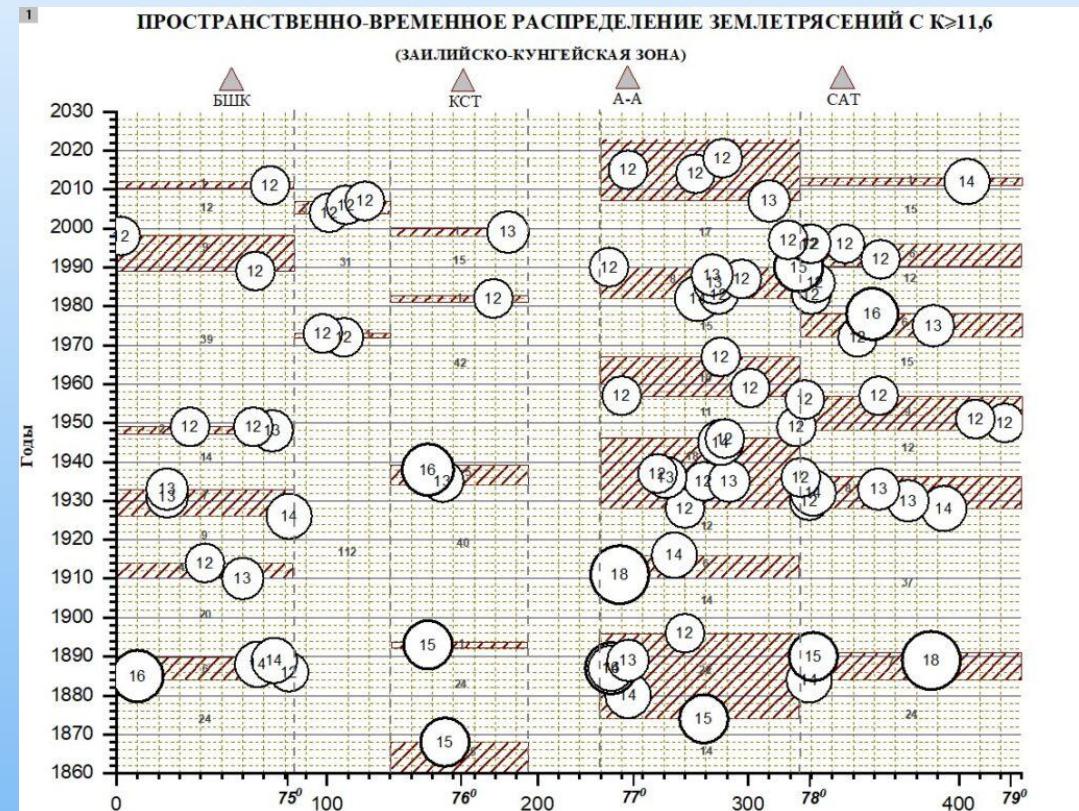


Рисунок- График пространственно-временного распределения землетрясений с $K \geq 11,6$ для Заилийско-Кунгейской зоны (по данным лаборатории региональной сейсмичности ИС МЧС РК)

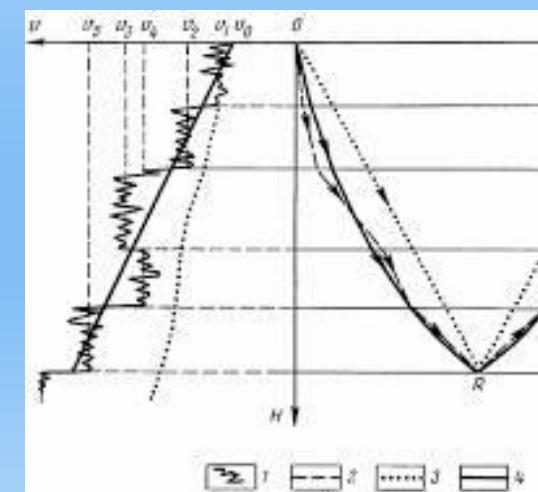
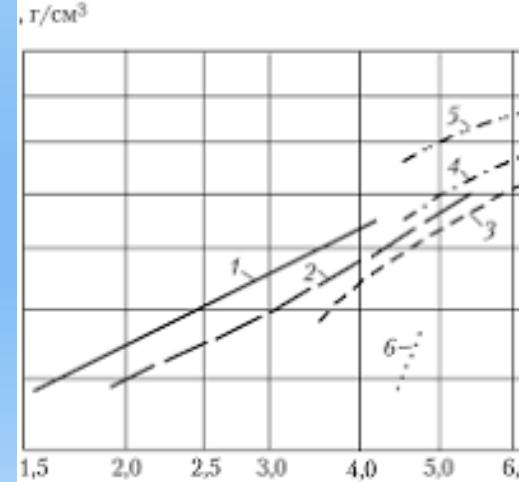
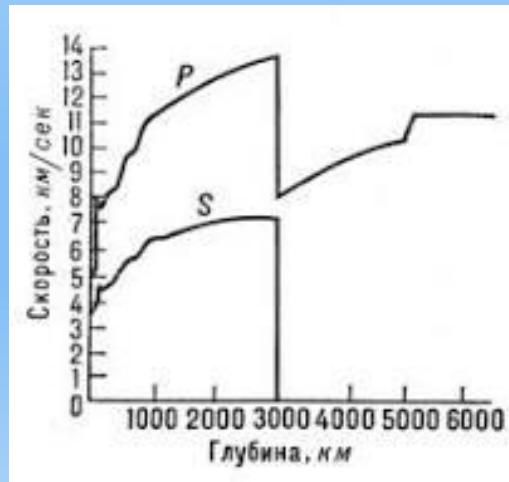
Изменение соотношение скорости продольных и поперечных сейсмических волн.

Изменение соотношение скорости продольных и поперечных сейсмических волн.

На Гармском полигоне в 1962 г. А.М.Кондратенко и И.Л.Нерсесов выявили эффект изменения скорости P-волн после сильного землетрясения на 10-12%. В 1969 г. сотрудник Гармской экспедиции А.Н.Семенов при анализе длинных рядов сейсмичности выявил эффект вариации отношения сейсмических скоростей V_p/V_s перед землетрясением.

Сначала это отношение уменьшается на 8-10%, затем следует его (отношения) восстановление, после чего и происходит сейсмический толчок. Этот прогностический метод при наличии сейсмостанции в данном районе очень важен и удобен, т.к. поддается инструментальному измерению и численному выражению. Если отношение скоростей падало 2 месяца, через 2 месяца и следует ожидать события.

К тому же длительность интервала снижения скоростей, коррелирует с силой ожидаемого землетрясения. Так, после снижения скоростного отношения длительностью 2 месяца магнитуда землетрясения составила 4,0, а после четырехмесячного снижения — 5,5. К сожалению, достоверность прогнозов не достигает 100%, хотя метод с успехом использовался и в СССР, и в США.



Деформации земной поверхности

Землетрясения являются результатом сложных тектонических процессов, связанных с перераспределением напряжений в земной коре. Одним из наиболее информативных признаков подготовки сейсмических событий служат деформации земной поверхности — постепенные изменения её формы, фиксируемые как в локальных зонах разломов, так и на обширных территориях. Наблюдение за этими процессами давно стало важной частью систем сейсмологического мониторинга и прогноза.

Исторические наблюдения и развитие исследований

Первые систематические данные о связи деформаций поверхности с сейсмическими событиями были получены в середине XX века:

СССР (Гармский полигон): при повторной высокоточной нивелировке обнаружена корреляция смещений реперов с изменением сейсмического фона. Характерная особенность — перед землетрясением фиксировалась смена знака смещения (поднятие сменялось опусканием или наоборот).

США и Япония: активно разрабатывались геодезические сети для выявления закономерностей накопления напряжений в зонах разломов.

Разлом Сан-Андреас (Калифорния): в районе Палмдейла (1959–1974 гг.) зарегистрировано медленное поднятие обширного участка площадью около 13 000 км². Центральная часть возвысилась на 45 см, после чего деформация прекратилась. Спустя 15–20 лет в этой зоне произошли два сильных землетрясения (1989 и 1991 гг.), что подтвердило значимость геодезических наблюдений. Эти данные стали основой для понимания деформации как одного из ключевых предвестников землетрясений.

Формы проявления деформаций- деформации земной поверхности могут принимать различные формы:



Рис. 9. Древний и вновь образованный от Чуйского землетрясения 2003 г. сейсмообвалы на снимках 2004 г. (А) и 2010 г. (Б). Пунктиром показаны основные сейсморазрывы.



Рис. 8. Стенка отрыва в тыловой части сейсмообвала от Чуйского землетрясения 2003 г.

Деформации земной поверхности

Вертикальные движения — поднятие или опускание участков суши, включая береговые линии и локальные зоны поднятий;

Горизонтальные смещения — растяжение или сжатие земной коры, проявляющееся в изменении расстояний между геодезическими точками;

Наклоны — изменение угла наклона поверхности, фиксируемое как на равнинах, так и на склонах;

Куполообразные выпучивания — формирование возвышенностей в результате давления магмы или тектонического сжатия.

Эти процессы развиваются постепенно, в течение месяцев и лет, и становятся заметными лишь при использовании высокоточных методов регистрации.

Методы диагностики - современные технологии позволяют отслеживать деформации с высокой пространственной и временной точностью:

- 1. GPS-станции** — обеспечивают миллиметровую точность регистрации перемещений земной коры и дают возможность строить карты скоростей деформаций;
- 2. Интерферометрическая радиолокация (InSAR)** — позволяет выявлять малейшие вертикальные смещения на больших территориях с использованием спутниковых данных;
- 3. Классические геодезические методы (нивелировка, триангуляция, трилатерация)** — применяются для локальных наблюдений и проверки спутниковых измерений;
- 4. Интеграция методов** — совместное использование GPS, InSAR и геодезических данных повышает достоверность интерпретации и выявления аномалий.

Значение для сейсмологии и прогноза

Мониторинг деформаций всё чаще становится элементом **систем раннего предупреждения**. В сочетании с другими признаками — ростом микросейсмической активности, изменением состава и уровня подземных вод, выбросами газов, электромагнитными аномалиями — данные о деформациях позволяют строить более надёжные прогнозы и оценивать уровень подготовки землетрясений.

Перспективы исследований -Развитие технологий дистанционного зондирования и искусственного интеллекта открывает новые возможности:

- использование спутниковых группировок для глобального мониторинга;
- применение машинного обучения для выявления скрытых закономерностей в динамике деформаций;
- создание интегрированных геоинформационных систем прогнозирования, объединяющих геодезические, сейсмические и геохимические данные.

Заключение - деформация земной поверхности — один из важнейших индикаторов подготовки землетрясений. Систематические наблюдения позволяют выявлять скрытые процессы в литосфере, оценивать степень накопления напряжений и формировать прогнозы сейсмической активности. Современные методы мониторинга и интеграция данных превращают изучение деформаций в ключевой инструмент повышения сейсмической безопасности.

Оптические явления в атмосфере

Оптические явления в атмосфере

С давних времен замечено, что многим крупным землетрясениям предшествуют необычные для данной местности оптические явления в атмосфере: сполохи, похожие на полярные сияния, световые столбы, облака странной формы. Появляются они как непосредственно перед толчками, но иногда могут происходить и за несколько суток.

В Гималаях. Иногда за несколько суток перед землетрясением появляются высокие тонкие облака. Эти «сейсмические» облака приурочены к разломным зонам. Они прекрасно фиксируются со спутников и космических станций. Образуются они, скорее всего, из-за выбросов глубинных газов и аэрозолей, которые служат ядрами конденсации атмосферной влаги.

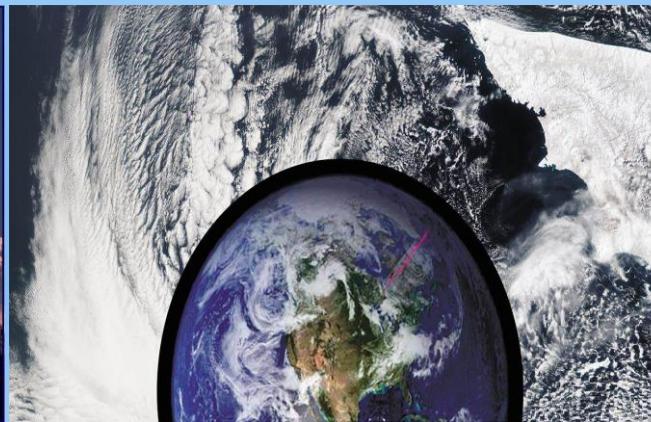
Так как эти явления обычно замечаются случайно людьми, не имеющими специальной подготовки, которые не могут дать объективного описания до массового появления мобильных фото- и видеодевайсов, анализ такой информации весьма сложен. Лишь в последнее десятилетие, с развитием спутникового мониторинга атмосферы, мобильной фотографии и автомобильных видеорегистраторов необычные оптические явления перед землетрясением были надежно зафиксированы, в частности перед Сычуаньским землетрясением.

По современным представлениям необычные оптические явления в атмосфере связаны с такими процессами в зоне будущего землетрясения как:

1. Выход в атмосферу газов из паров из напряженных горных пород. Вид и характер явлений зависят от исходящих газов: горючие метан и сероводород могут давать факела пламени, что наблюдалось, например, перед Крымскими землетрясениями, радон под действием собственной радиоактивности флюоресцирует голубым светом и вызывает флюоресценцию других атмосферных газов, сернистые соединения могут вызывать хемилюминисценцию.
2. Электризация напряженных горных пород, что вызывает электрические разряды на поверхности земли и в атмосфере в районе будущего очага.



Огни землетрясений –
редкий световой феномен



Облака – предвестники землетрясений



Облака в роли сейсмоиндикаторов
землетрясений

Озоновые аномалии

Озоновые аномалии

Очень интересен вопрос о связи землетрясений с изменением общего содержания озона (ОСО). Российский исследователь А.В.Тертышников убедительно доказал наличие такой связи. Природа ее легко объясняется с позиций водородной теории разрушения озонового слоя. Виновником разрушения является с нашей точки зрения глубинный газ — водород, выделение которого усиливается перед землетрясением, о чем говорилось выше.

Связь сейсмичности с состоянием озонового слоя особенно интересна тем, что планетарное поле ОСО ежедневно отслеживается специальными спутниками и соответствующие карты общедоступны в Интернете.

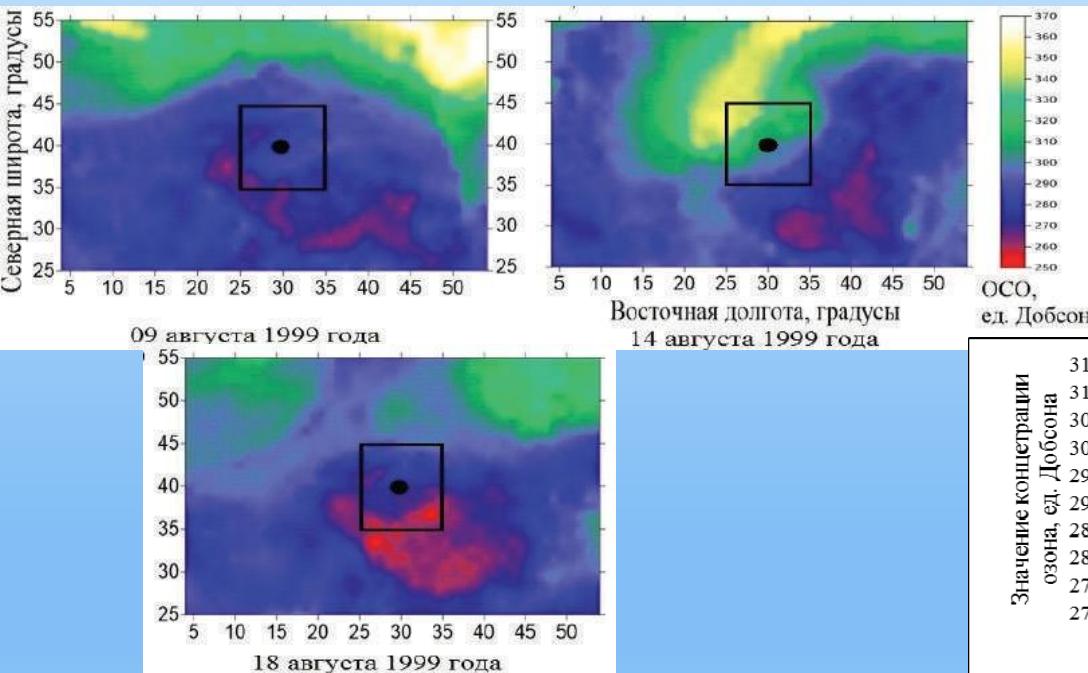


Рис._. Карты ОСО над очаговой областью турецкого землетрясения, «черной» точкой обозначен эпицентр землетрясения, квадратом – очаговая область

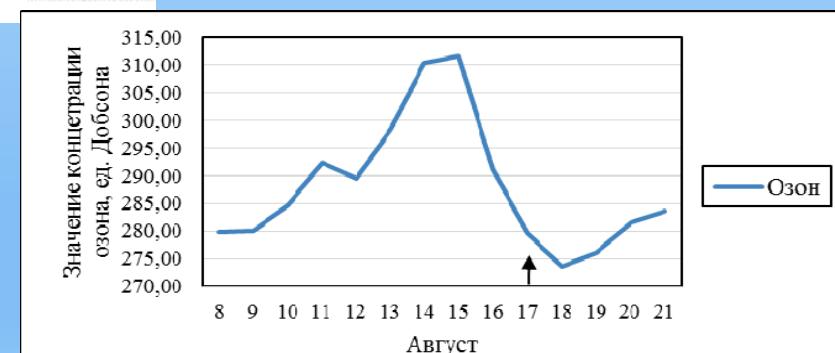


Рис - График изменчивости ОСО над очаговой областью $10^{\circ} \times 10^{\circ}$ в августе 1999 г

Ионосферные аномалии

Для примера можно сказать, что за несколько дней до трагического землетрясения 26 декабря 2004 г. в Индийском океане, которое вызвало убийственную волну — цунами, на спутниковых картах поля ОСО инфракрасной съемкой были зафиксированы отрицательные аномалии озона над Индонезийским архипелагом, в том числе и точно над эпицентром будущего землетрясения.

Ионосферные аномалии. В 1980-е годы прошлого столетия были обнаружены резкие всплески интенсивности электромагнитных низкочастотных шумов в диапазоне 100 Гц-20 кГц над эпицентрами сильных землетрясений за несколько часов до события. За 2-3 суток до сейсмособытия на высотах внешней ионосферы наблюдаются изменения плотности и температуры плазмы. Эти возмущения ионосферы сохраняются несколько суток после землетрясения.

Ионосферные предвестники, так же как и озоновые аномалии, и линейная облачность вдоль разломных зон могут быть легко обнаружены из космоса, их мониторинг обеспечен группировками ИСЗ, что решает сложную, но чрезвычайно важную проблему прогноза землетрясений в труднодоступных районах суши и даже в океане.

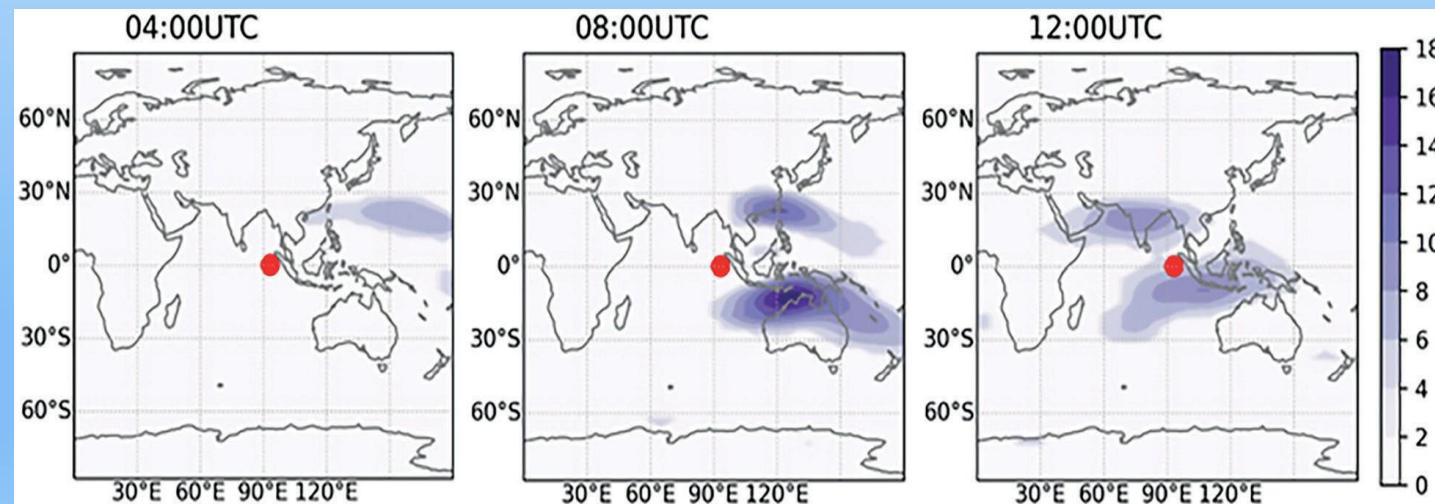


Рис. Развитие во времени пространственного распределения аномалий ПЭС 05.04.2021 (за 6 дней до события $M = 8,6$, эпицентр которого отмечен красным маркером)

Космическая ритмика

Космическая ритмика. Важнейшую прогностическую информацию имеет закономерно меняющееся взаимное расположение планет в Солнечной системе, в первую очередь Земли, Луны и Солнца. Оно влечет изменение гравитационного воздействия на Землю, на которое последняя реагирует изменением положения твердого ядра относительно жидкого, что приводит к усилению глубинной дегазации. «Если изменяются вращательные параметры спутника, то должны изменяться и параметры вращения Земли. А это повлечет за собой: изменение фигуры Земли, перетекание подкорового пластического материала мантии, изменение течений в гидросфере, ядре, изменение климата».

«Солнечные» 11-летние циклы сейсмической активности известны давно и описаны еще А.Л.Чижевским (1976г.) и А.Д.Сытинским (1987 г.).

«Лунные» (18,6 лет) циклы выявлены исследованиями длительных рядов сейсмичности Байкальской впадины, при этом через половину срока (9,3 г.) землетрясения северо-западного ряда сменяются землетрясениями юго-восточного ряда. За 150 лет (до 1966 г.) здесь было зафиксировано 23 сильных землетрясения от 6 до 10 баллов.

Заметим, что приливное действие Солнца в 2,17 раза меньше лунного, однако наша звезда может эффективно влиять на земное ядро и за счет электромагнитного излучения, особенно мощного во время солнечных бурь.

Космические технологии в совокупности с наземными измерениями наиболее эффективных из отмеченных выше предвестников, легли в основу комплексного метода прогноза и мониторинга признаков землетрясений, разработанного в Научном центре оперативного мониторинга Земли (НЦ ОМЗ) Роскосмоса под руководством Л.Н.Доды.

Наличие признаков подготовки землетрясений, по мнению разработчиков, обусловлено причинно-следственной связью аномалий гравитационного и электротеллурического полей, нестабильностью вращения и обращения Земли, протонной диффузией в геоболочках, с одной стороны, и сейсмотектонических процессов — с другой.

Факт совпадения отмеченных аномалий по месту и времени может указывать на приближение мощных землетрясений с магнитудой больше 6,0. Облачные сейсмотектонические индикаторы, фиксируемые из космоса, позволяют определить возможную магнитуду землетрясений и локализовать зону его подготовки. Метод обеспечивает среднесрочный прогноз землетрясений с 2-3-недельным упреждением по дате, а также по месту в рамках 7-градусной круговой зоны.

Вариации в электромагнитных полях как возможные предвестники сейсмических событий

Ряд геофизических исследований указывает на существование корреляции между изменениями в электромагнитной обстановке и подготовительными стадиями землетрясений. В частности, наблюдаются колебания напряжённости магнитного поля Земли, а также аномальные вариации в локальных электромагнитных сигналах за часы, дни или даже недели до наступления сейсмического события. Хотя причинно-следственные механизмы этой связи остаются предметом научных дискуссий, выдвинуто несколько правдоподобных гипотез, объясняющих данный феномен.

Одной из ключевых теорий является электрокинетическая модель, согласно которой в результате тектонического напряжения, накапливающегося в горных породах, происходят механические деформации, вызывающие движение поровых флюидов. Это движение, особенно в трещиноватых и насыщенных влагой зонах земной коры, может индуцировать электрические токи благодаря эффекту стриминга (электрокинетический эффект), в результате чего возникают электромагнитные аномалии. Эти токи, в свою очередь, могут вызывать локальные изменения в напряжённости магнитного поля, регистрируемые как предсейсмические сигналы.

Дополнительные гипотезы рассматривают следующие процессы:

Пьезоэлектрический эффект — деформация кристаллических пород (например, кварца) при сжатии может вызывать генерацию электрических потенциалов.

Выделение заряженных частиц — в преддверии землетрясений в земной коре могут происходить процессы разрушения пород, сопровождающиеся эмиссией электронов, ионов и радионовых изотопов, что также способно влиять на электромагнитное поле.

Изменение электропроводности горных пород — при увеличении трещиноватости и насыщении водами возрастает проводимость, что влияет на поведение геоэлектрического поля.

Наблюдение и анализ таких электромагнитных аномалий осуществляется с помощью наземных магнитометров, электрометрических станций, радиочастотных датчиков, а также спутниковых платформ, таких как *DEMETER*, *Swarm* и другие. Однако несмотря на наличие зафиксированных корреляций, интерпретация данных остаётся сложной задачей, поскольку электромагнитные сигналы могут быть подвержены влиянию множества внешних факторов — от космической погоды до антропогенных источников.

Тем не менее, изучение вариаций в электромагнитных полях продолжает рассматриваться как одно из перспективных направлений в области предсказания землетрясений. В совокупности с другими геофизическими, геохимическими и сейсмологическими данными, эти сигналы могут внести существенный вклад в развитие систем раннего предупреждения и повышения сейсмической безопасности.

Электромагнитные предвестники

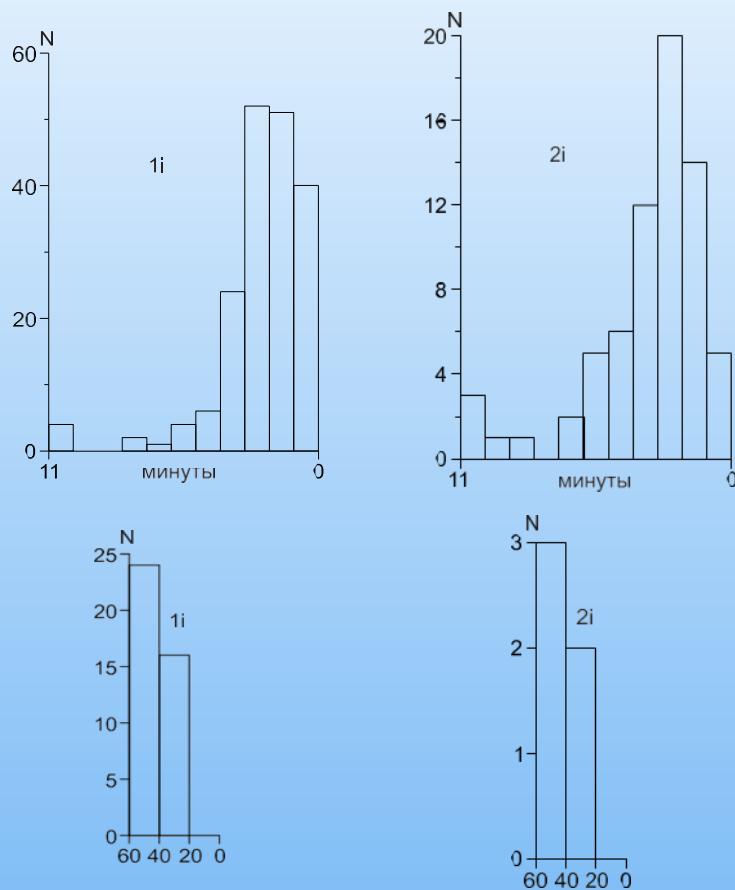


Рис.-Распределение электромагнитных сигналов- предвестников в интервале 0–11 мин (верхняя панель) и за минуту до землетрясения (нижняя панель). Слева – одиночные сигналы, справа – парные.

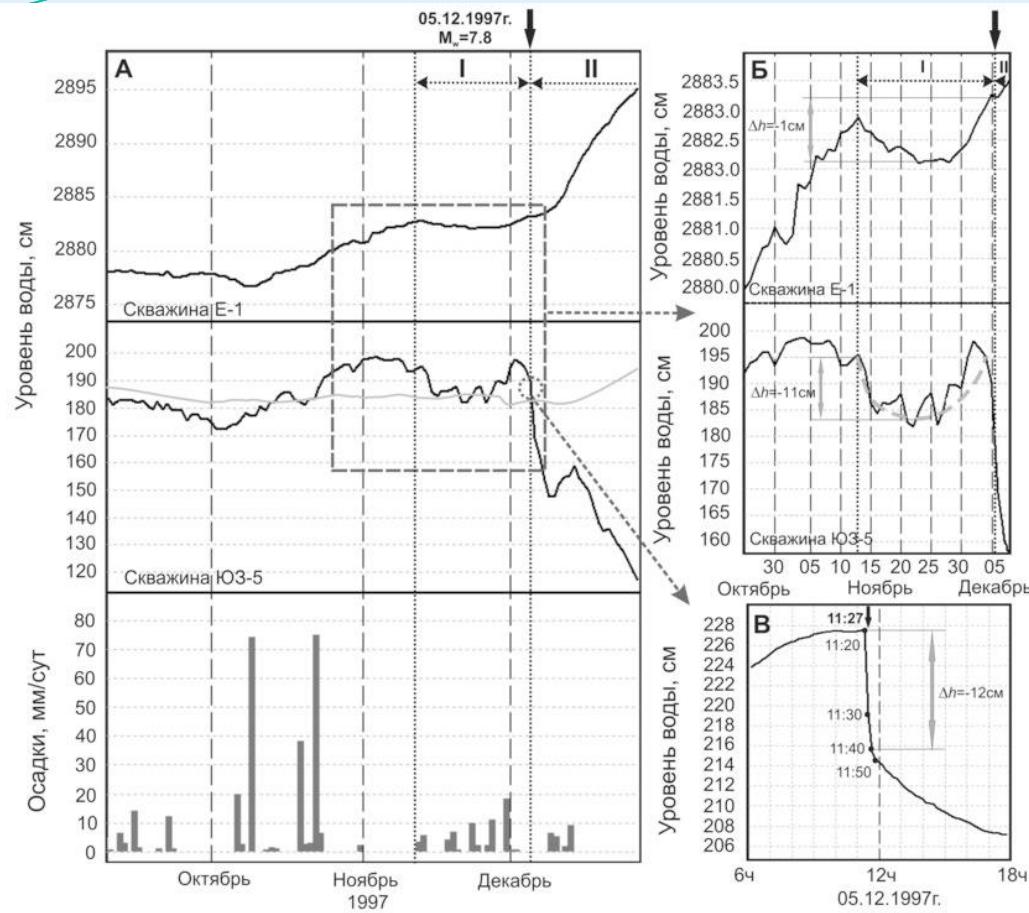
Изменение электрических полей. Электромагнитные явления, связанные с землетрясениями, начали изучаться в Японии еще в 1886 г. На Гармском полигоне в Таджикистане советскими сейсмологами при режимных наблюдениях был установлен эффект уменьшения кажущегося электрического сопротивления длительностью 2-3 месяца перед сейсмическим событием. Этот эффект объясняется изменением электрических свойств пород на глубине из-за привноса жидкости и изменении давления.

На Камчатке за 1-2 недели до землетрясений с амплитудой $M>5$ наблюдались изменения уровня электротеллурических аномалий, т.е. аномалий земных токов, имеющих бухтообразную форму. Эффекты вариаций электромагнитного поля наблюдались в Японии перед Нефтегорским землетрясением 1995 г. на Сахалине. Однако в целом эти методики еще малорезультативны и надежных предвестников землетрясений давать не могут.

В рассмотренных Довбней Б.В, и др.(2019) случаях зарегистрированы сигналы, наблюдаемые в первые десятки секунд или минуты до землетрясения. По виду динамического спектра это были либо единичные, либо парные электромагнитные импульсы с дискретной структурой.

Обнаруженные сигналы можно рассматривать как проявление механоэлектромагнитных преобразований в зоне землетрясений. Обычно при рассмотрении возможной причины генерации сейсмо- электромагнитных сигналов предлагаются индукционный и пьезомагнитный механизмы [Guglielmi, Levshenko, 1996].

Изменение уровня грунтовых вод



Изменение уровня грунтовых вод.

Постфактум установлено, что многим крупным землетрясениям предшествовало аномальное изменение уровня грунтовых вод, как в колодцах и скважинах, так в ключах и родниках. В частности, перед Чуйским землетрясением местами на поверхности почвы внезапно появились множественные ключи из которых стала достаточно быстро поступать вода. Тем не менее, значительная часть землетрясений не вызывала предшествующих изменений в водоносных горизонтах.

Феномен резкого колебания уровня воды в водоемах особенно заметный в колодцах, был известен еще в древнем Китае, а в Японии используется для прогноза землетрясений с 684 г..

Изменения уровня воды в скважинах Е-1 и ЮЗ-5 в период Кроноцкого землетрясения 05.12.1997 г., M_w = 7.8: А – изменения уровня воды в скважинах с 9 сентября по 31 декабря 1997 г. в сопоставлении с суточными осадками по данным метеостанции Пионерская: цифрами I и II и двухсторонними горизонтальными стрелками выделены интервалы времени: I – проявления гидрографического предвестника КЗ (см. врезку Б: двухсторонними вертикальными стрелками и цифрами показаны величины амплитуд понижения уровня воды); II – проявления косейсмического скачка понижения уровня воды в скважине ЮЗ-5 (см. врезку В: 11:27 – время вступления сейсмических волн по данным сейсмостанции РЕТ) и постсейсмических вариаций уровня воды.

Изменение уровня грунтовых вод. Геохимические предвестники землетрясений

Особенно информативны термальные источники, обычно приуроченные к вулканическим постройкам или разломным зонам. Незадолго перед землетрясениями наблюдаются скачки дебита воды, вплоть до полного иссякания, нередки выбросы грязи и газа, резкие колебания температуры воды.

В наше время эти эффекты поставлены на службу предсказания землетрясений во многих странах, особенно успешные исследования этого рода были проведены в СССР во Всесоюзном научно-исследовательском институте гидрографии и инженерной геологии под руководством Г.С.Вартаняна. В сейсмоопасных районах СССР была разбушена сеть скважин, в которых велись непрерывные наблюдения за уровнем воды. Идейная основа такого прогноза состоит в том, что все напряжения, которые испытывает земная кора при подготовке землетрясения, мгновенно передаются на водные горизонты, так называемое глобальное гидродеформационное поле (ГГДП).

Удачным примером использования гидрологических параметров являются наблюдения сахалинских ученых в г. Южно-Курильске (о. Кунашир в Курильском архипелаге) в 1992 г.

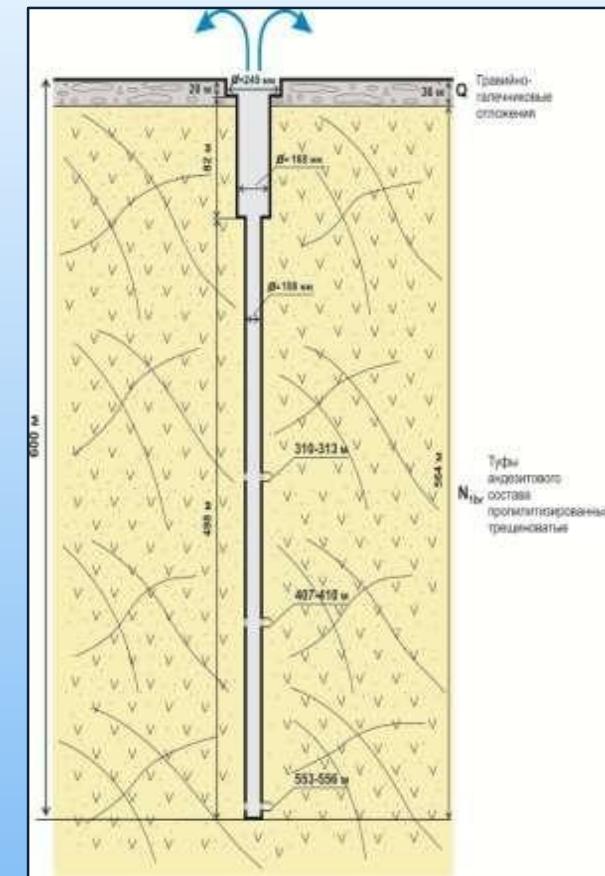
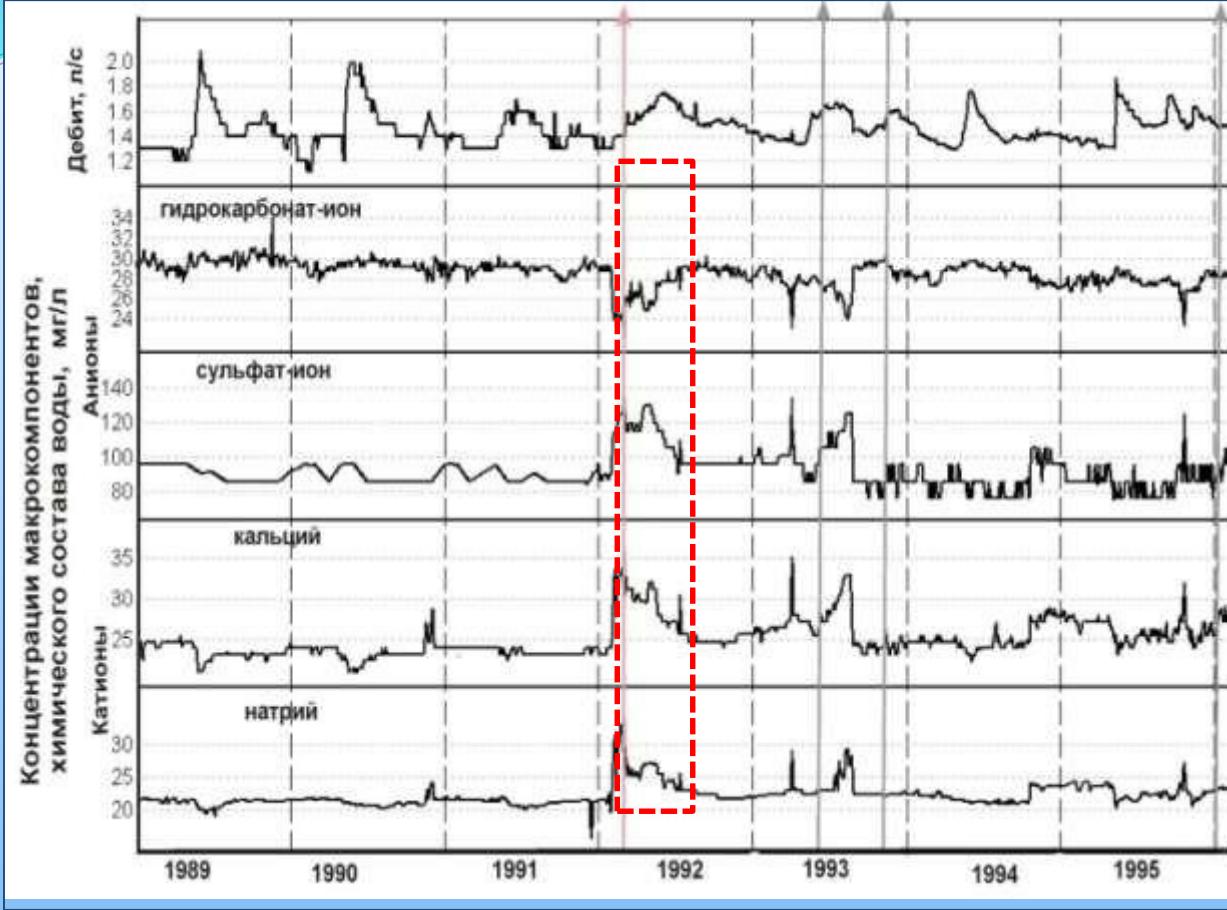
Отмечались изменения уровня воды в колодцах и дебита скважины № 5 в пос. Горячий Пляж у подножия вулкана Менделеева. Выводы об усилении тектономагматической активности региона, подкрепленные анализом сейсмологических материалов, полученных под руководством известного сахалинского геофизика Т.К.Злобина, были своевременно доложены администрации Южно-Курильского района и командованию Курильского погранотряда. С 8 по 12 января 1993 г., а затем 4 октября 1994 г. в районе произошло несколько крупных и катастрофических землетрясений.

Геохимические аномалии.

Предвестники этого рода основаны на эффектах изменения химического состава природных вод и газов в источниках, колодцах, скважинах перед землетрясениями. Особенно ярко эти феномены проявляются в термальных водах на вулканах (в том числе и грязевых) и в разломных зонах. Спектр элементов, которые изучаются с этой целью, довольно широк. К сожалению, геохимические эффекты, так же как и электромагнитные не стабильны, что снижает их прогностическую ценность. Однако изучать их нужно, т.к. отсутствие стопроцентных предвестников заставляет использовать их комплекс, и чем обширнее он будет, тем точнее будет предсказание.

Особое внимание в группе геохимических предвестников заслуживает изучение характера выделения глубинных газов. Выше мы указали, что в последние годы целый ряд исследователей (А.А.Маракушев, И.К.Карпов, В.С.Зубков, И.Л.Гуфельд) выдвинули гипотезы, связывающие напрямую сейсмичность с процессом глубинной дегазации. В таком случае наблюдение этого процесса максимально приближено к его результату — сейсмичности, и прогноз должен быть наиболее достоверным.

Камчатка: скважина 1, ст. Морозная, ГГХП землетрясения 2.02.1992г., M=6.8.



$M_{0.19} (SO_4^{78} HCO_3^{20}) / (Ca^{56} Na^{44})$ - в фоновых условиях

$M_{0.25} (SO_4^{87} HCO_3^{11}) / (Ca^{55} Na^{45})$ - на стадии формирования ГГХП

ГГХП землетрясения 02.03. 1992 г., M=6.8, de=135 км:

- увеличение минерализации воды на 30% ,
- изменение гидрогеохимического типа воды за счет относительного увеличения сульфат-иона и уменьшения гидрокарбонат-иона.

Постсейсмический эффект визуально не выражен.

$V=7.3 \text{ м}^3$,
 $Q=1.5-1.3 \text{ дм}^3/\text{с}$,
 $T=1.0-1.6 \text{ ч}$,
 $\Delta t=3 \text{ сут}$
 $\Delta_i=2-10\%$
 $O= 1-6\%$

Геохимические предвестники землетрясений

В 1956 г. в СССР под Ташкентом были начаты наблюдения за выделением газа радона. Ровно через 10 лет в 1966 г. здесь произошло катастрофическое землетрясение. Оказалось, что за 2-3 недели перед землетрясением содержание радона увеличилось втрое. Эффект оказался столь ярко выраженным потому, что скважина где проводились измерения радона была расположена всего в 2 км от эпицентра. После этого измерения радона стали проводиться в прогнозных целях во всех сейсмоопасных регионах страны. Позже аналогичные исследования получили развитие за рубежом. В Китае в 1969 г., в Японии в 1973 г.

В дальнейшем уже на Гармском полигоне были поставлены прогностические работы по гелию. В последние годы начались исследования выделения водорода как предвестника землетрясений. Первые результаты были получены под руководством Г.И.Войтова в Дагестане. Здесь в 2000 г. за 3 дня до землетрясения, был зафиксирован всплеск концентрации подпочвенного водорода.

С 2005 г. аналогичные исследования проводятся нами совместно с сотрудниками Геологического института КНЦ РАН (В.А. Нивин и др.) на Кольском полуострове. Сопоставление хода водорода и времени реализации сейсмических событий в пределах Ловозерских лопаритовых и Хибинских апатитовых месторождений показало, что многим из них предшествует повышение интенсивности эманаций.

Однако, наиболее крупные сейсмособытия предваряются минимумами газовыделения (рис. 1). Такая динамика хода подпочвенной концентрации водорода может быть обусловлена сжатием участка массива при увеличении нагрузки. При этом объем трещин в нем и, следовательно, проницаемость уменьшаются, а выделение газа снижается. После разрядки напряжения в той или иной форме, в массиве происходит раскрытие старых и образование новых трещин, что способствует нарастанию газовыделения.

Аномалии в поведении животных

Достоверно засвидетельствовано, что основным толчкам многих сильных землетрясений предшествует необъяснимое беспокойство животных на значительной территории.

Известно, что поведение зверей, птиц, рыб, змей и других организмов меняется перед сильным сейсмическим событием. Так, в холодное время года змеи покидают свои норы, что наблюдалось, например, перед Хайченским землетрясением 4 февраля 1975 г. (магнитуда землетрясения 7,3). Домашние животные (кошки, собаки) проявляют необъяснимое беспокойство, стремление покинуть жилище, увлекая за собой и хозяев. Неоднократно отмечалось, что в разрушенных населенных пунктах, попавших в район эпицентра землетрясения, не обнаруживались трупы кошек и собак. Это позволяет предположить, что животные заблаговременно уходили из опасной зоны.

Данная группа предвестников менее изучена, чем геофизическая группа. Такие предвестники предваряют землетрясение за часы или дни.

Схема расположения станций с биологическими наблюдениями и пункт биологических наблюдений Курты



№ п/п	Виды животных	Станции				
		Ботсад	Бурунчай	Казачка	Курты	Чилик
1	Геккон сцинковый	4	3	-	-	2
2	Ящурка быстрая	4	4	3	0	3
3	Полоз узорчатый	1	1	1	1	1
4	Удавчик восточный	1	1	-	1	-
5	Куры бентамские	10	10	6	-	10
6	Попугайчики волнистые	10	5	5	2	6
7	Сомики мешкоjabерные	3	0	6	-	-
8	Голуби почтовые	-	-	-	-	-
9	Кролики	9	10	-	-	-
	Количество видов	8	8/7*	5	3	6/5**

Геохимические предвестники землетрясений

Наиболее вероятно, что животные ощущают при этом непривычные вибрации или реагируют на инфразвуковые колебания. Такое наблюдалось, например, при Крымских землетрясениях 1927 года, перед Ашхабадским землетрясением и перед Чуйским землетрясением. Но перед Спитакским землетрясением и землетрясением в Нефтегорске массового аномального поведения животных замечено не было.

Примеры аномального поведения животных перед землетрясениями многочисленны. Они описаны в специальной литературе. [Икея М. Землетрясения и животные. От народных примет к науке. М.: Научный мир, 2008. 320 с.]. Сейчас известно около 70 видов животных, способных чувствовать приближение землетрясений. Среди них млекопитающие, птицы, пресмыкающиеся, рыбы.

Домашние животные испытывают тревогу и пытаются покинуть здание перед землетрясением. В части первой нашего цикла «Ликбез по землетрясениям» мы писали об аномальном поведении слонихи в Калининградском зоопарке за несколько часов до землетрясения. Птицы в клетках начинают кричать и метаться, аквариумные рыбки, наоборот, неестественно застывают. Очень чувствительны змеи, которые перед землетрясением массово покидают норы.

Крысы всеми способами пытаются покинуть подвалы зданий и будучи запертыми, прогрызают толстые стены или роют ходы наружу. В водоемах наблюдаются случаи массового выброса рыбы на берег. Причины повышенной чувствительности животных неясны. Изучением вопроса занимаются исследователи многих стран. В 1976 г. в Калифорнии проводилась международная конференция, посвященная этой проблеме. Что же заранее улавливают животные?

Предлагаются различные варианты — электромагнитные колебания, подземные шумы, микросейсмичность, ультразвуковые сигналы, изменение атмосферного давления и др. Со своей стороны, хочу добавить еще фактор дегазации. Усиление глубинной дегазации, т.е. повышенное выделение восстановленных газов (водорода, метана, угарного газа), которые или сами являются ядовитыми или влияют на концентрацию кислорода в воздухе, обязательно должно улавливаться всеми аэробными организмами.

В сейсмоопасных районах Японии и США организованы специальные пункты наблюдения за поведением животных. Можно утверждать, что на сегодняшний день, аномальное поведение животных является наиболее достоверным предвестником землетрясений, относиться к которому нужно самым серьезным образом. Так как поступили 4 февраля 1975 г. власти китайского города Хайнэня в Манчжурии, о чем мы говорили выше. ²⁷

Вопросы по закреплению содержания лекции 2

- Сейсмогеофизические предвестники землетрясения- понятийная база. Характер и закономерности проявления. Достоверность прогнозирования.
- Форшоки- определение и характер проявления.
- Отличия форшоков от роя обычных слабых землетрясений. Вероятные причины возникновения.
- Пространственно-временной ход сейсмичности.
- Изменение соотношение скорости продольных и поперечных сейсмических волн– предвестник землетрясения.
- Деформации земной поверхности – предвестник землетрясения.
- Оптические явления в атмосфере– предвестник землетрясения.
- Озоновые аномалии – предвестник землетрясения.
- Ионосферные аномалии - – предвестник землетрясения.
- Космическая ритмика. Космические технологии в совокупности с наземными измерениями.
- Изменение электрических полей, связанные с землетрясениями.
- Изменение уровня грунтовых вод перед землетрясениями.
- Геохимические аномалии– предвестник землетрясения.

Библиография

- Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология-Москва, Изд.Иностранной Литературы, 1963г., 667с.
- Хачиян Э.Е. Прикладная сейсмология. Гитутюн, Ереван, 2008 г., 523 стр., УДК: 550.34, ISBN: 978-5-8080-0726-0.
- Аки К., Ртчардс П. Количественная сейсмология. Т.1.М.: Мир, 1983, 520м.
- Добровольский И.П. Механика подготовки тектонического землетрясения. М. ИФЗ, ВН СССР, 1984, 88с.
- Касахара К. Механика землетрясений. М.: Мир, 1985, 264с
- Ризниченко Ю.В. Проблемы сейсмологии. М.: Наука, 1985, 408с.
- Соболев Г.А. Основы прогнозирования землетрясений. М.: Наука, 1993, 313с.
- Эйби Дж. Землетрясения.М.: Недра, 1982, 264с.

Благодарю за внимание!

Thank you for your attention!

Назарларыңызға рахмет!