

**Новый подход к интерпретации результатов
испытаний образцов мрамора на одноосное
сжатие и воздействие ЭМ полей.
Информативность деформационных
измерений**

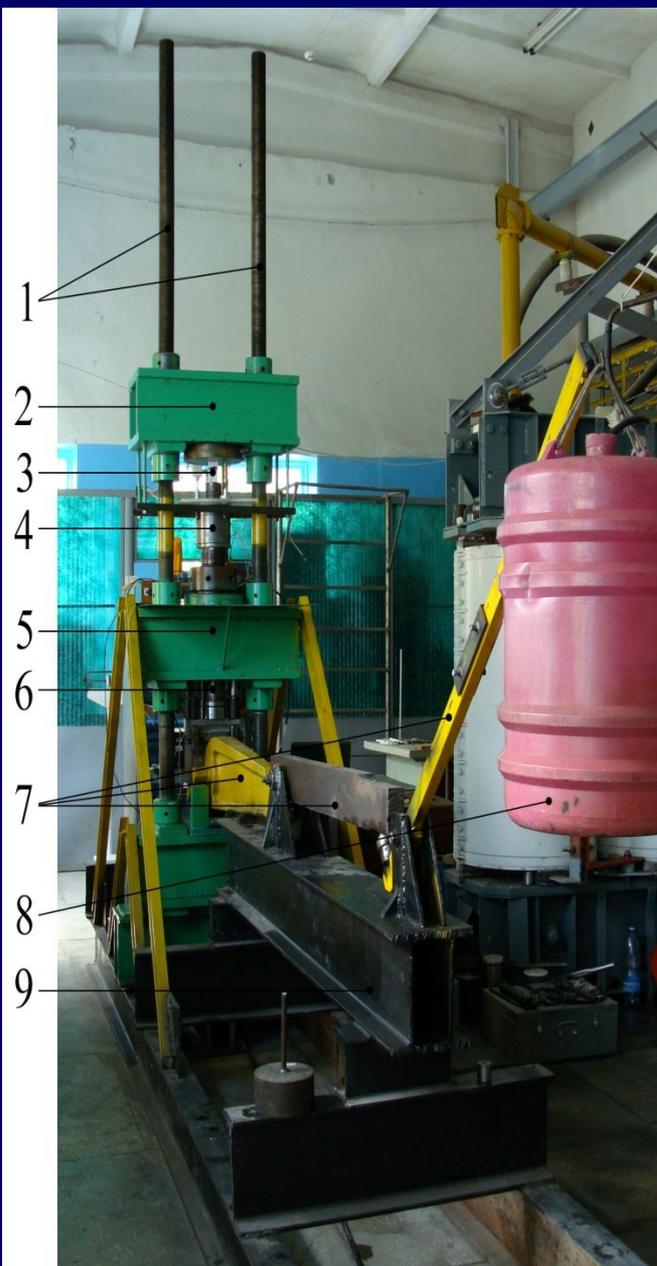
**Богомолов¹ Л.М., Закупин¹ А.С., Мубассарова²
В.А., Сычев² В.Н.**

1- ИМГиГ ДВО РАН, Южно-Сахалинск

2- ИС РАН в г. Бишкеке

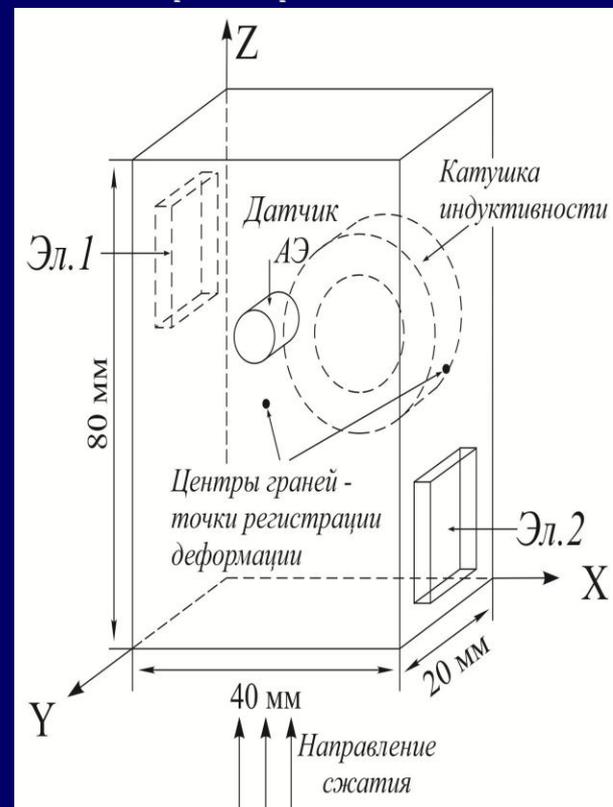
**“Физические основы прогнозирования разрушения
горных пород-ХІ”
14 – 18 октября 2019г
г. Пермь, Россия**

МОТИВАЦИЯ- ОТ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

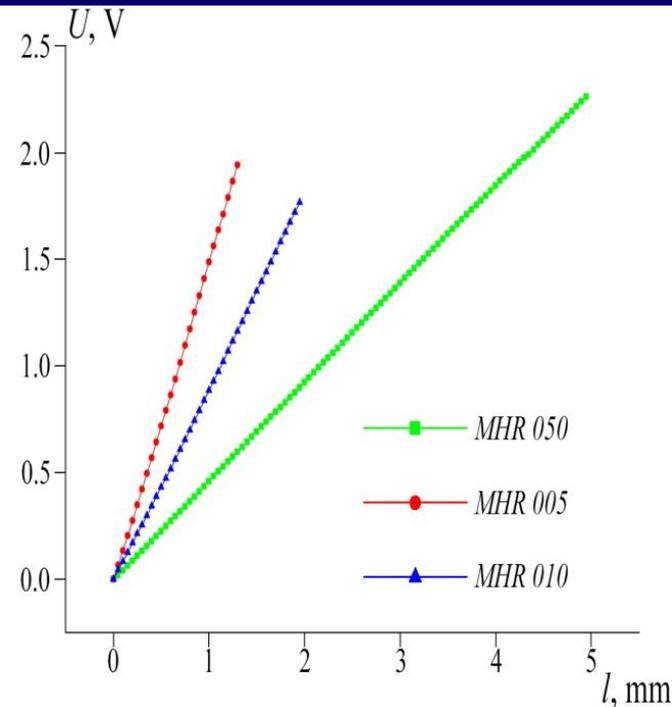


Гравитационно - рычажный пресс с линейно нарастающей нагрузкой. Одноосное сжатие, макс. Усилие 300 кН
Мрамор – классический материал для исследования дислокационных эффектов, от движения отдельных дислокаций до двойникования. Экранирования дислокаций атмосферой примесей и возможное убегание от атмосферы Котрелла – то что связывает ЭМ поля и пластичность.

Что обнаружили?
Различие боковых Деформаций. Значит есть сдвиг в плоскости ХУ. Проверяли на Образцах – прямоуго параллелипипедах



Измерение деформации и нагрузки



Датчики LVDT

MHR 005 ± 0.127 мм, $k = 2.1$ мкм/мВ

MHR 010 ± 0.254 мм, $k = 1.1$ мкм/мВ

MHR 050 ± 1.27 мм $k = 0.66$ мкм/мВ

Узнаем информацию :

- Напряжение сжатия σ_{zz}

- Деформация укорочения ε_{zz} , средняя по z
(без смазки на торцах - неоднородность)

- Деформация бокового расширения ε_{xx} , ε_{yy}

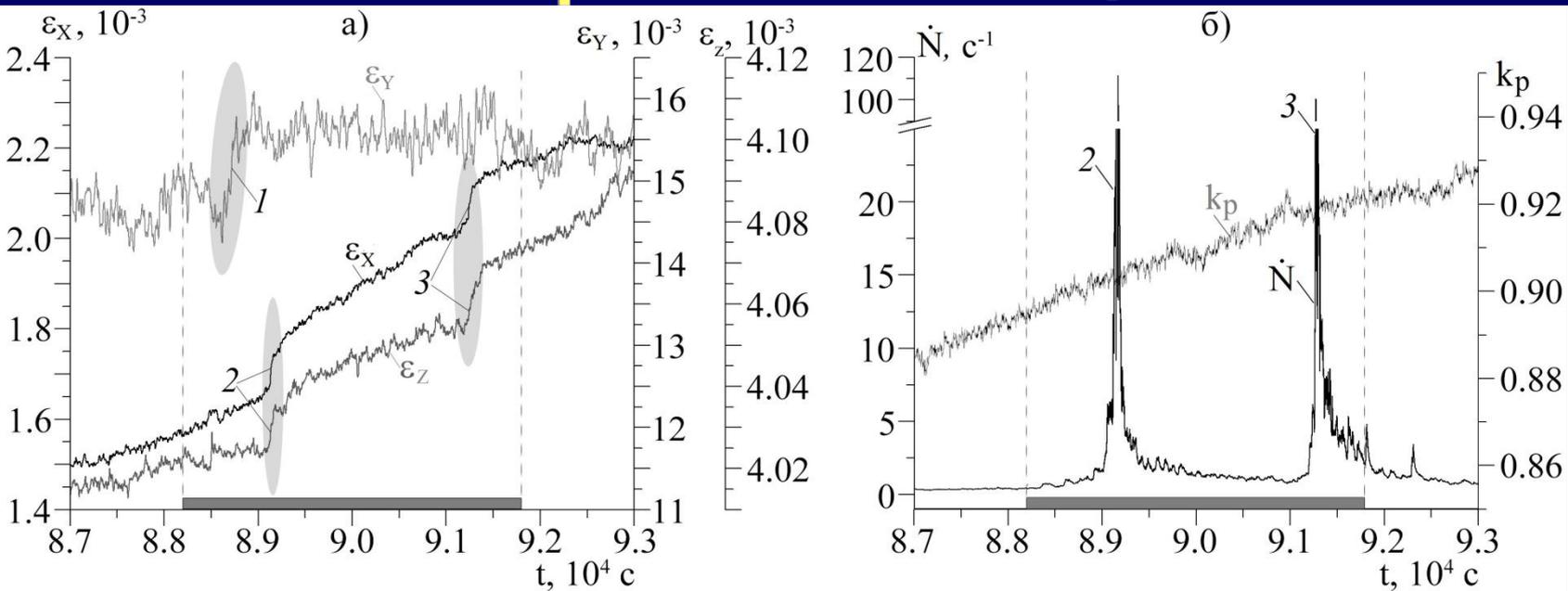
Зависимости 4 параметров известны из эксперимента. Также известным можно считать модуль E , его изменения вплоть до точки разрушения не более 10-15%

Можно попробовать оценить поперечные напряжения ?

Система регистрации деформаций и нагрузки
Не зависит от системы измерений АЭ,

Погрешность : F : 260 Н,
 l_z : не более 0.4%, l_x : - 0.7 %, l_y : - 0.4 %

Простейшая оценка



Эксперимент с сеансовым ЭМВ, согласно [Мубассарова и др, Геосистемы переходных зон, 2019.№2.]

Из закона Гука вытекает

$$\sigma_{xx} - \sigma_{yy} = E/(1-\nu) (\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}) \sim 5 \cdot 10^{-4} E/(1-\nu) \sim 10 \text{ МПа}$$

Принято $G = E/(1-\nu) \sim 20$ ГПа

По крайней мере одно из усредненных по сечению боковых напряжений такого порядка 10 МПа, а характерное напряжение сжатия $\sigma_{xx} \sim 100$ МПа

При “скачках” деформации вариации σ_{xx} могут быть гораздо выше

Попытка обобщения -теория

Гипоупругая модель – классическая связь деформаций и напряжений.

3 уравнения

$$\sigma_{xx} = E/(1+\nu) (1-2\nu) [(1-\nu) \varepsilon_{xx} + \nu (\varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz})]$$

$$\sigma_{yy} = E/(1+\nu) (1-2\nu) [(1-\nu) \varepsilon_{yy} + \nu (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{zz})]$$

$$\sigma_{zz} = E/(1+\nu) (1-2\nu) [(1-\nu) \varepsilon_{zz} + \nu (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy})]$$

Задача 1. Неизвестными считаются σ_{xx} , σ_{yy} , ν

Решение – Коэфф.Пуассона выражается как корень кв. уравнения

$$\nu^2 2 \sigma_{zz} + \nu (\sigma_{zz} - E \varepsilon_{zz} + E \varepsilon_{xx} + E \varepsilon_{yy}) - (\sigma_{zz} - E \varepsilon_{zz}) = 0$$

Явная форма

$$\nu = [(\sigma_{zz} - E \varepsilon_{zz} + E \varepsilon_{xx} + E \varepsilon_{yy})^2 + 8 \sigma_{zz} (\sigma_{zz} - E \varepsilon_{zz})]^{1/2} / 4\sigma_{zz} - (\sigma_{zz} - E \varepsilon_{zz} + E \varepsilon_{xx} + E \varepsilon_{yy}) / 4 \sigma_{zz}$$

Далее по вычисленному ν и изв.параметрам

$$\sigma_{xx} = (\sigma_{zz} - E \varepsilon_{zz}) / 2\nu + E (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) / 2(1+\nu)$$

$$\sigma_{yy} = (\sigma_{zz} - E \varepsilon_{zz}) / 2\nu - E (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) / 2(1+\nu)$$

Из-за погрешности в расчете малой разности $(\sigma_{zz} - E \varepsilon_{zz})$ результат оказался неустойчив

Задача 2

Одна из причин, что расчет в задача 1 – с большой погрешностью неоднородность деформации ε_{zz} – у торцов образца область упрочнения, средняя часть деформируется сильнее. Отсюда постановка задачи 2

Известными считаются зависимости σ_{zz} , ε_{xx} , ε_{yy} + значения модулей E , ν

Неизвестные ε_{zz} , σ_{xx} , σ_{yy} (смешанная задача)

Решение получается аналитически

$$\varepsilon_{zz} = (\sigma_{zz} / E) (1+\nu) (1-2\nu)/(1-\nu) + (\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy})/(1-\nu)$$

$$\sigma_{xx} = \sigma_{zz} \nu / (1-\nu) + E (\varepsilon_{xx} + \nu \varepsilon_{yy}) / (1-\nu^2)$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_{zz} \nu / (1-\nu) + E (\nu \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}) / (1-\nu^2)$$

Но и для этих формул погрешность вычислений оказалась значительной. Возможные причины: 1) неверно исходное предположение об изотропности материала; 2) недостаточная точность измерений.

При постановке целенаправленного эксперимента и его обработке по этой методике есть шанс получить информацию о боковых напряжениях в период, когда формируется отклик материала на внешнее воздействие ЭМ полей или вибраций.

Верхний слой земной коры

Другое применение – оценки прироста горизонтальных напряжений в верхнем слое земной коры. Сахалин, южная часть Субширотное укорочение $\sim 5 \cdot 10^{-7}$ в год. Но большая часть на разломах, с применением сглаживающих моделей, на зоны между разломами $\delta\varepsilon_{xx} \sim 10^{-8}$

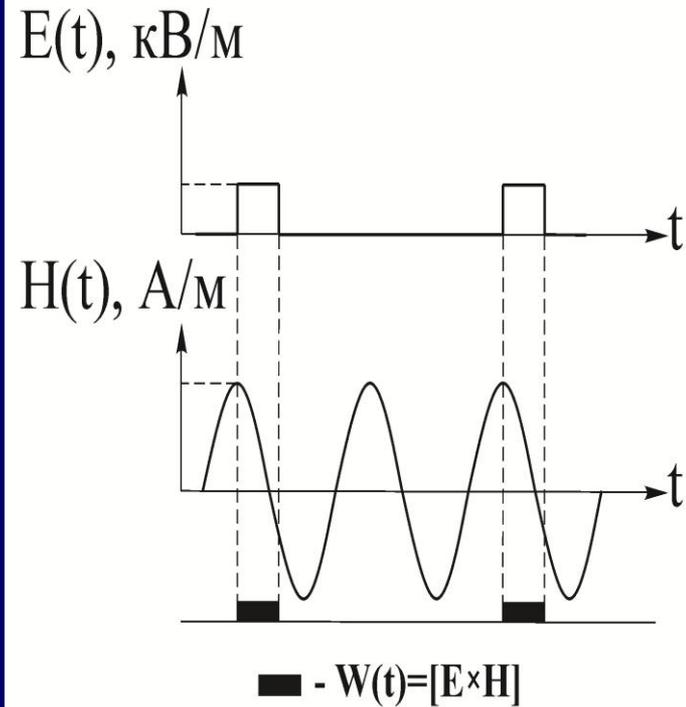
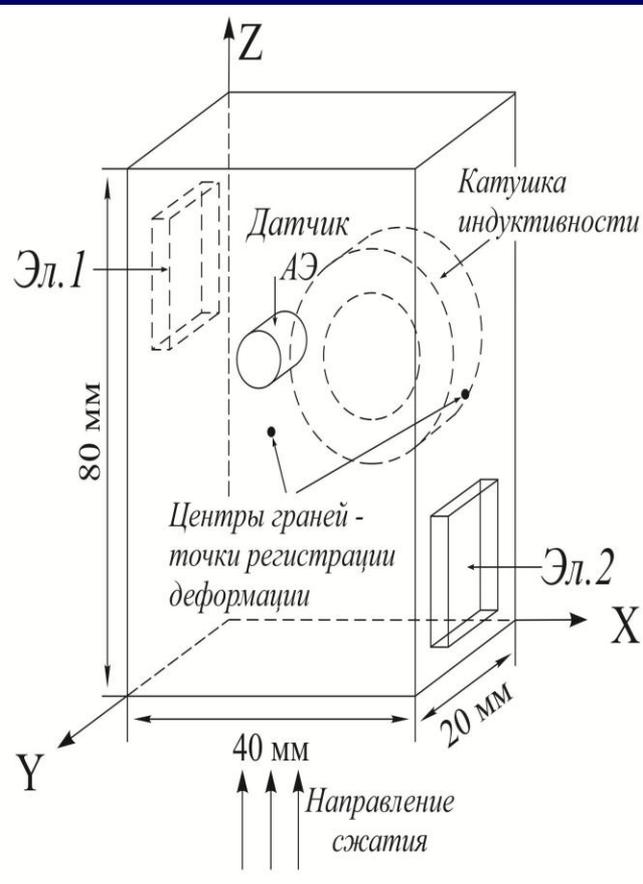
Для приростов σ и ε применимы те же формулы.

$$\delta\sigma_{xx} = \delta\sigma_{zz} \nu / (1-\nu) + E (\delta\varepsilon_{xx} + \nu \delta\varepsilon_{yy}) / (1-\nu^2)$$

$$\delta\sigma_{yy} = \delta\sigma_{zz} \nu / (1-\nu) + E (\nu \delta\varepsilon_{xx} + \delta\varepsilon_{yy}) / (1-\nu^2)$$

Если считать литостатическое давление неизменным (глубины – первые км), $\delta\sigma_{zz} \sim 0$ и $\delta\sigma_{xx} \sim 10^{-8} E \sim 30-100$ Па – заниженное значение

Электромагнитное воздействие

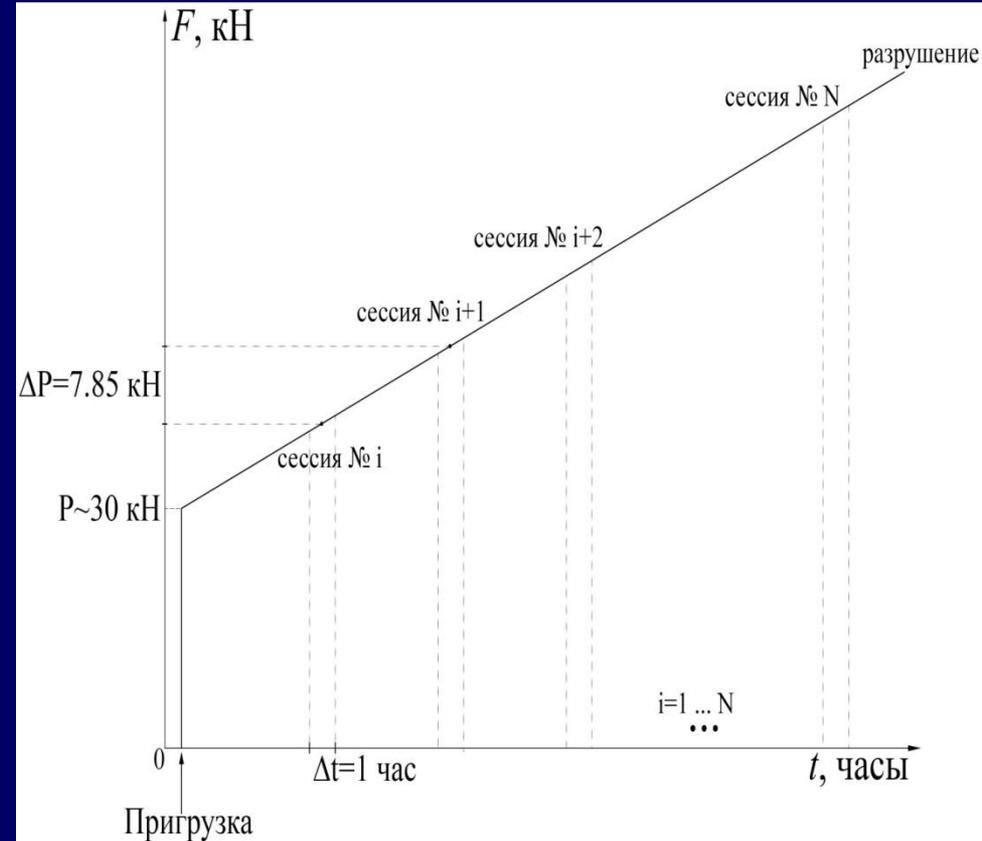
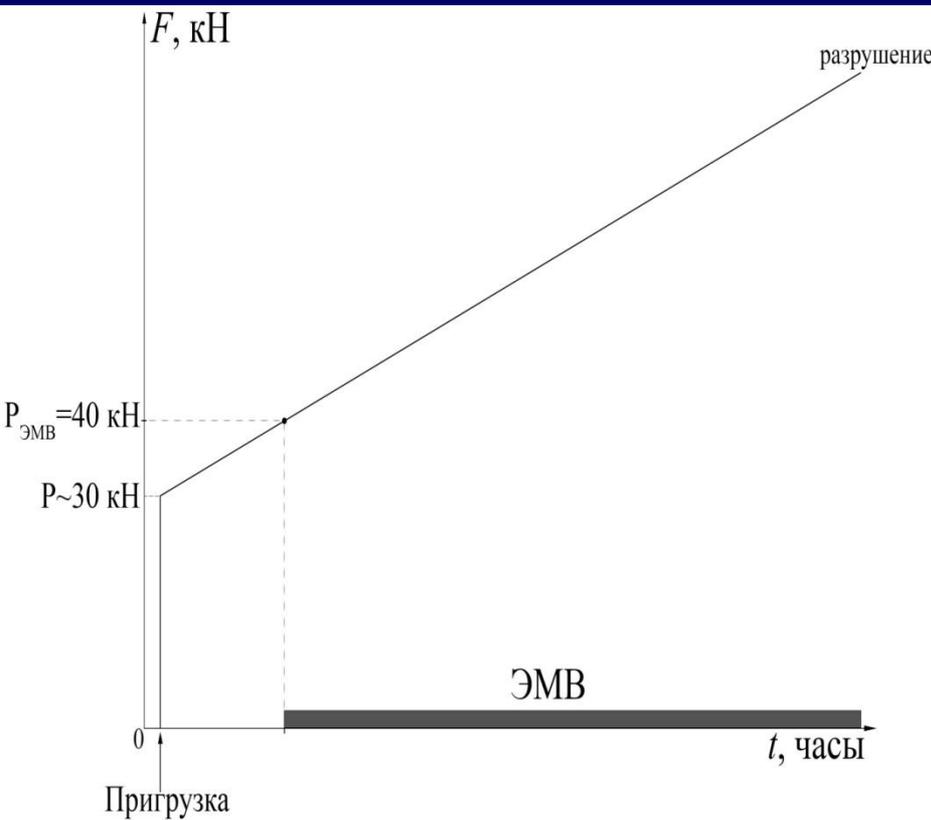


Параметры импульсов электрич.поля : 15-20 В, 3 кГц, 110 мкс, скважность 75%, крутизна фронтов 0.15 мкс, Напряженность: 500 В/м.

Параметры источника магн поля (ГЗ-33): 6 кГц, 20 В.

Индукция магнитного поля у оси катушки ~ 0.004 Т.

ЭКСПЕРИМЕНТ с НЕПРЕРЫВНЫМ и СЕАНСОВЫМИ ЭМВ



Первоначальная пригрузка ~ 30 кН

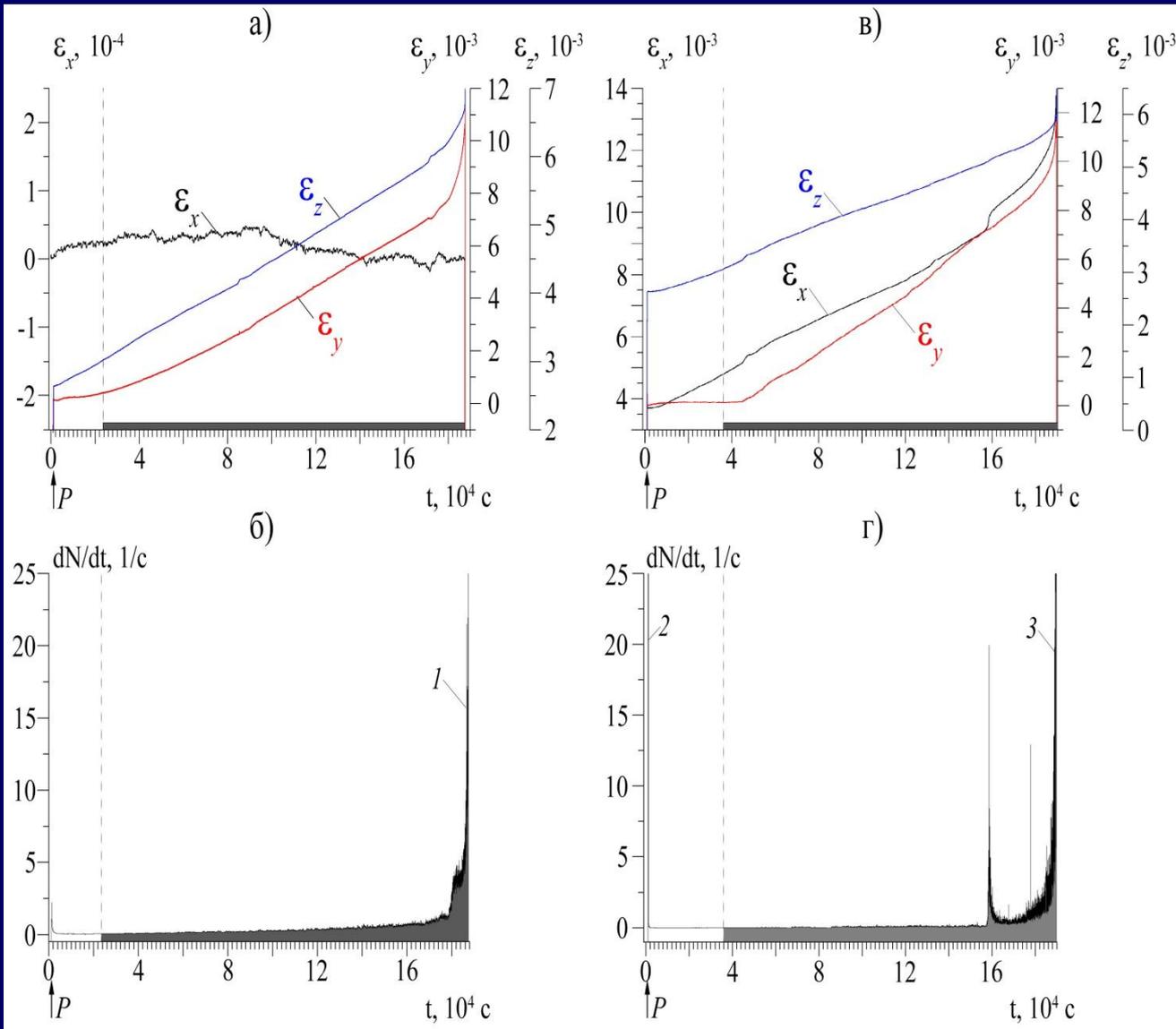
Далее: скорость нагружения 2.3 кН/час

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭМ ПОЛЕМ - в течение всего эксперимента вплоть до разрушения образца

Сеансы воздействия проводятся через каждые **7.85 кН**.
Длительность воздействия - **1 час**

ПРИМЕР РАЗЛИЧИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ОБРАЗЦА,

Эксперимент с непрерывным ЭМ воздействием, согласно [Деформация и разрушение материалов, 2017, №7, С. 20-27]



а), в) поперечные деформации:

ϵ_x - черный график,
 ϵ_y - **красный** график,
продольная деформация:

ϵ_z - синий график.

б), г) активность АЭ.

Серая заливка и линии – интервалы ЭМВ, P – пригрузка.

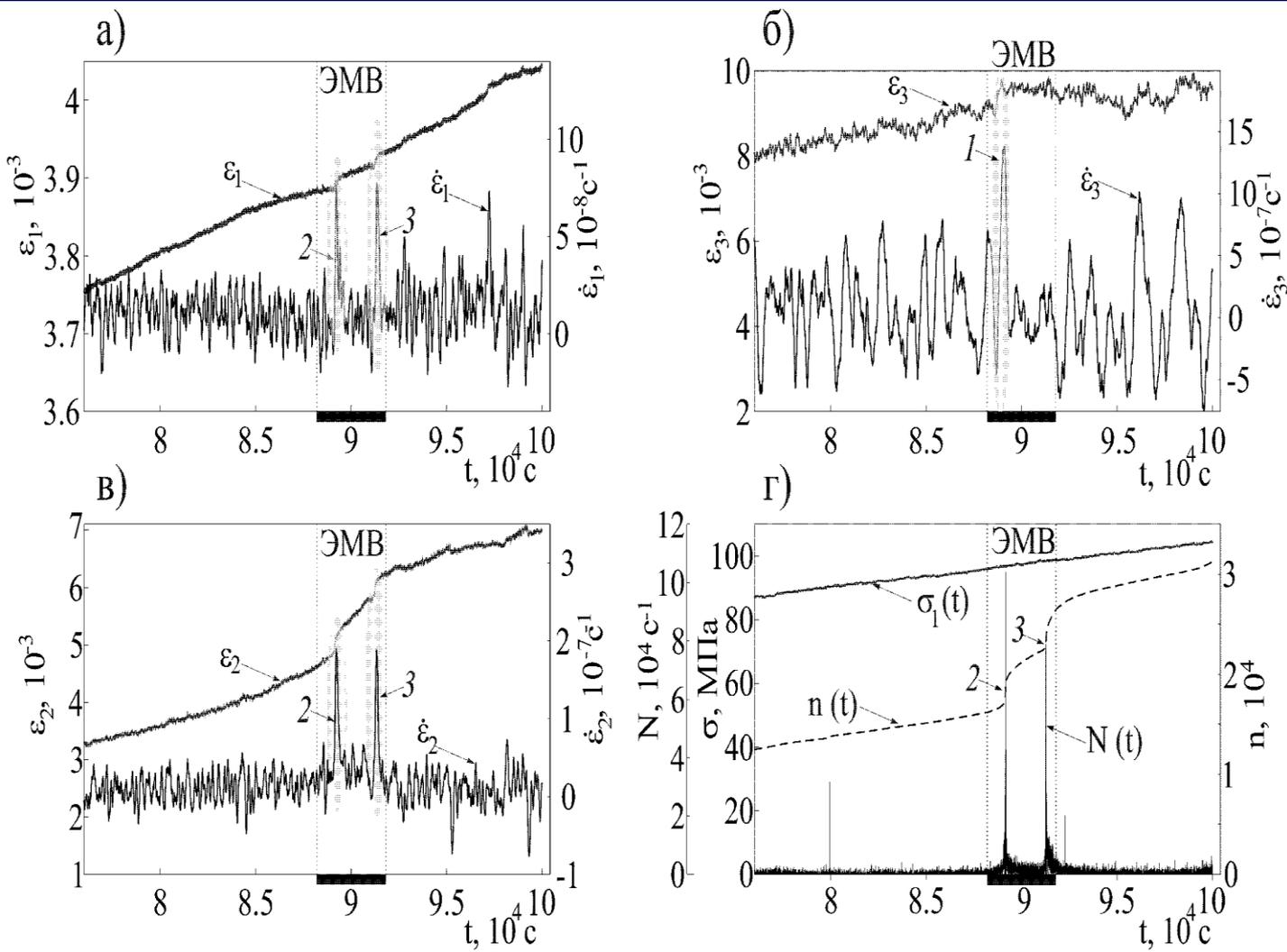
1 – макс. значение активности АЭ – 134 с^{-1} ;

2 – макс. значение активности АЭ – 58 с^{-1} ;

3 – макс. значение активности АЭ – 149 с^{-1} ;

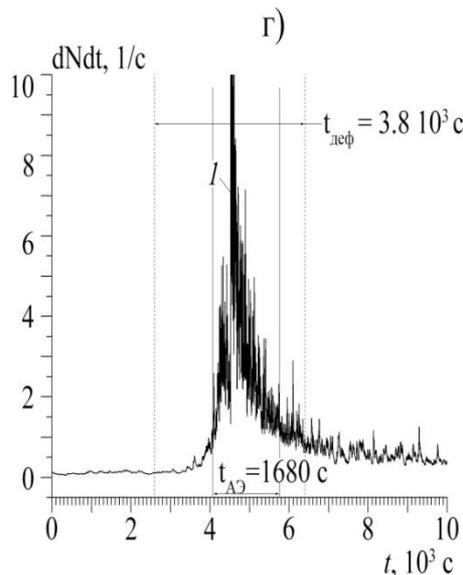
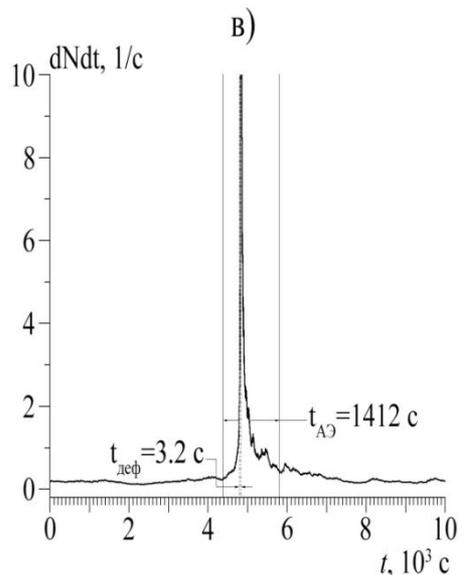
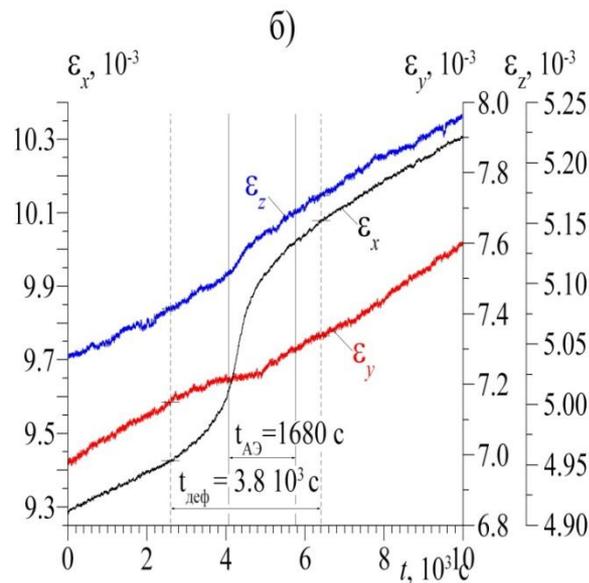
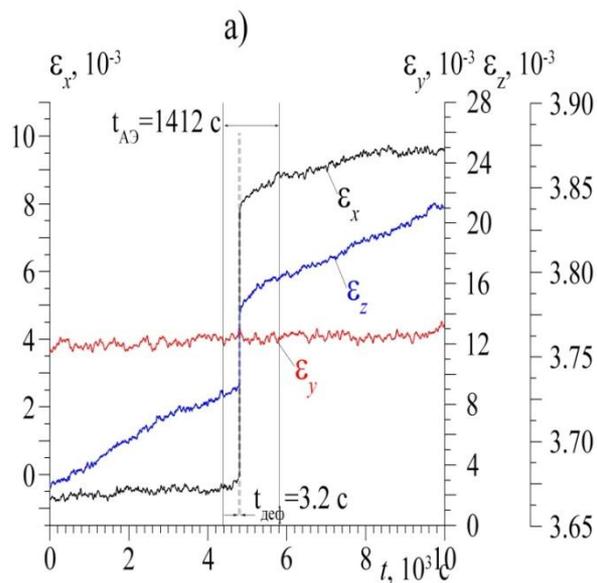
РЕЗУЛЬТАТ “ТИПОВОГО” ЭКСПЕРИМЕНТА

согласно [Мубассарова,2018, автореф . дисс. к.ф.-м.н.]



Фрагмент эксперимента с сеансом ЭМВ: а-в – изменения трех компонент деформации и их скоростей, г – изменение главного напряжения σ_1 , активности АЭ, N и накопления сигналов АЭ, n образца мрамора. Овалами выделены синхронные изменения скоростей компонент деформаций.

СОПОСТАВЛЕНИЕ НАРАСТАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ РАЗНЫХ ЭМ ВОЗДЕЙСТВИЯХ



а), в) – скачки деформации в эксперименте с сеансовыми ЭМВ;

б), г) – медленное течение в испытаниях с непрерывным (в течение всего эксперимента) действием ЭМ поля а), б) поперечные деформ:

ε_x - черный, ε_y - красный, продольная деформ:

ε_z - синий.

в), г) активность АЭ.

Резюме

Уточнение, что ЭМ поле может оказывать влияние на сдвиговую составляющую деформации образцов мрамора, испытываемых на одноосное сжатие. Интерпретация ЭМ воздействий на пластичность – взаимодействие заряженных дислокаций с ЭМ полем может проявляться при меньших напряженностях полей (по сравнению с известными эффектами физич.материаловедения), если достаточно велико напряжение сжатия.

Возможны новые подходы к обработке данных тензометрии

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

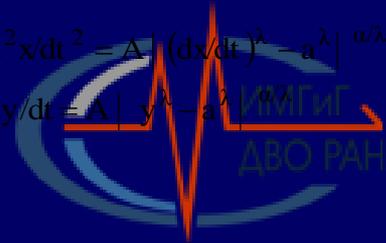


К вопросу о модели саморазвивающихся процессов и ее применении для прогноза времени землетрясений на Сахалине

Л.М. Богомолов, А.С. Закупин, П.А. Каменев, Н.В. Богинская.

**По материалам презентации на V Международной конференции
Триггерные эффекты в геосистемах, Москва 2019**

САМОРАЗВИВАЮЩИЕСЯ ПРОЦЕССЫ


$$\frac{d^2x}{dt^2} = A \left| \left(\frac{dx}{dt} \right)^\lambda - a^\lambda \right|^{\alpha/\lambda}$$
$$\frac{dy}{dt} = A \left| y^\lambda - a^\lambda \right|^{\alpha/\lambda}$$

Основа среднесрочного (краткосрочного) прогноза-модельное уравнение СРП или по терминологии синергетики “режима с обострением”

$$\frac{d^2x}{dt^2} = A \left| \left(\frac{dx}{dt} \right)^\lambda - a^\lambda \right|^{\alpha/\lambda}$$

где A , α , λ , a – неопределенные положительные константы, причем при $t=0$ $dx/dt > a$.

Упрощенное уравнение (Малышев, Тихонов, подход СРП)

$$\frac{dy}{dt} = A y^\alpha, \quad y = dx/dt$$

Сопоставление **x - N накопление событий,**
 y - n – активность

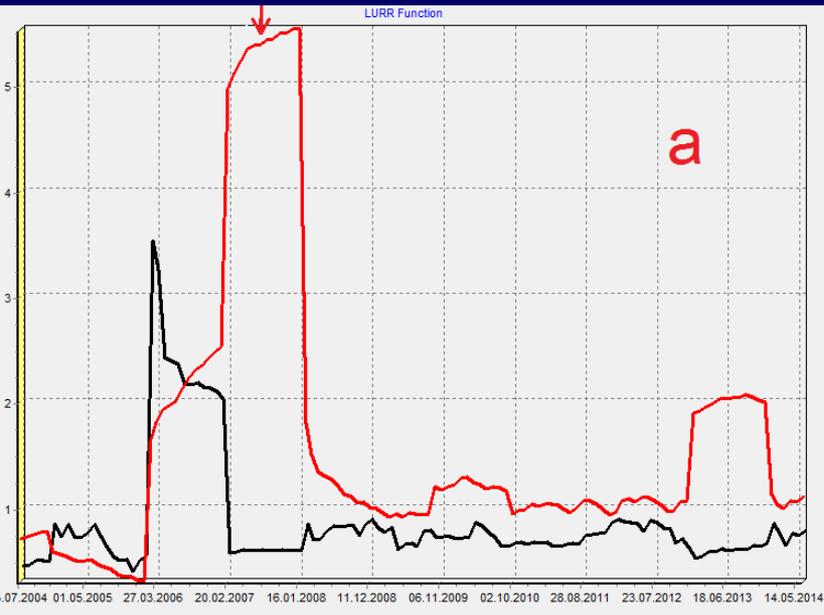
При $\alpha > 1$ уравнение описывает сингулярность. Но если $\alpha > 2$ решение остается конечным, но есть особенность в производной dx/dt

При $\alpha = 2$ это уравнение отличается лишь знаком от уравнения афтершоковых последовательностей $dn/dt = -A n^\alpha$

с решением в форме закона Омори. Уже отсюда подсказка, что непосредственно перед главным событием коэфф. A уменьшается

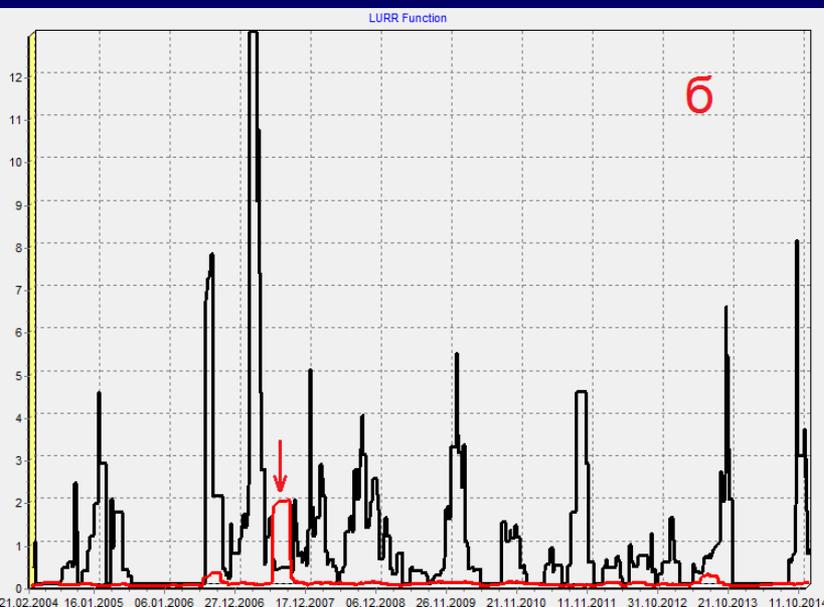


Сравнение с данными по активности, перед Невельским ЗЛТ 2.08.2007, $M=6.2$



Активность = Усредненное среднесуточное число событий (красная линия) Предвестник (черная линия) – по методике LURR (модуляция приливными возмущениями)

а – усреднение за год , б – за 90 сут



Рост активности (слабых событий) тормозится ПЕРЕД ГЛАВНЫМ СОБЫТИЕМ

Расчет по программе ASZ-seis
Каталог ЗЛТ южной части
Сахалина СФ ЕГС РАН.



График сейсмической активности в 2016-2017 гг



Перед
Крильонским
ЗЛТ был
выделен режим
нарастания
согласно модели
СРП.

И активность, и
число событий
перед гл
событием
должно быть
конечным !

НОВЫЙ ПОДХОД

Наводящее соображение:

-параметры A, A_1 зависят от напряжения (работы Макарову П.В.),

$$\frac{dN}{dt} = a(\sigma, \lambda) N^\alpha$$

$$D = \int_0^{t^*} \frac{(\sigma - \sigma_0)^2 D^\alpha dt}{(\sigma^* (1 + \lambda))^2}$$

здесь λ - параметр Лоде-Надаи,

$$0 \leq D \leq 1$$

Для описания уменьшения и смены знака dy/dt предлагается ввести зависимость от накопления числа событий

$$dy/dt = A_1 (1 - y/y_1 - x/x_s) y^\alpha$$

Фактически это переход к уравнению 2-го порядка

$$d^2x/dt^2 = A [1 - x/x_s - (dx/dt)/y_1] (dx/dt)^\alpha$$

Сюрприз от математики – если пренебречь “логистической” поправкой, уравнение интегрируется. Есть решение в квадратурах даже более общего уравнения

$$d^2x/dt^2 = A (1 - x/x_s)^\beta (dx/dt)^\alpha$$

Основная проблема – определить коэффициенты A, α, β, x_s в начале режима СРП. Далее $\beta=1, \alpha=2,3\dots$

Пример решения

Частный случай: $\alpha = 3, \beta=1$ Для наглядности заменено $x \rightarrow N, y \rightarrow n, N_s$ - число событий до главного (вместо сингулярности, n_0 – активность в начальный момент времени)

$$t \frac{n_0}{N_s} = \frac{N}{N_s} (1 - A N_s n_0/3) + \frac{N}{N_s} (A N_s n_0/6) (1 - N/N_s) (2 - N/N_s)$$

Зависимость $N(t)$ такова, что обратная зависимость описывается кубической параболой. Зависимость описывает точку перегиба $d^2N/dt^2 = 0$, “излом” активности, т.е максимум кривизны графика. В точке максимума активности при $t = t_s$ (связываемой с главным событием) выполняются соотношения

$$t_s \frac{n_0}{N_s} = 1 - A N_s n_0/3 \text{ – прогноз времени,}$$

$$n_s/n_0 = (3 t_s n_0/N_s - 1/2)^{-1} \text{ прогноз максимальной активности}$$

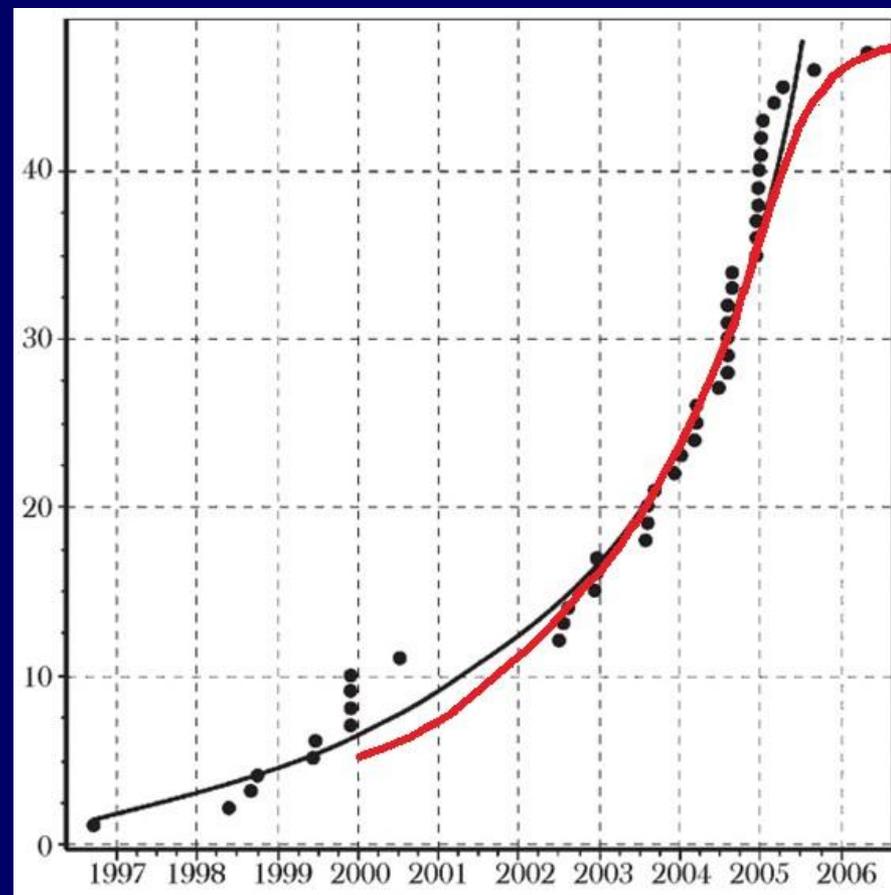
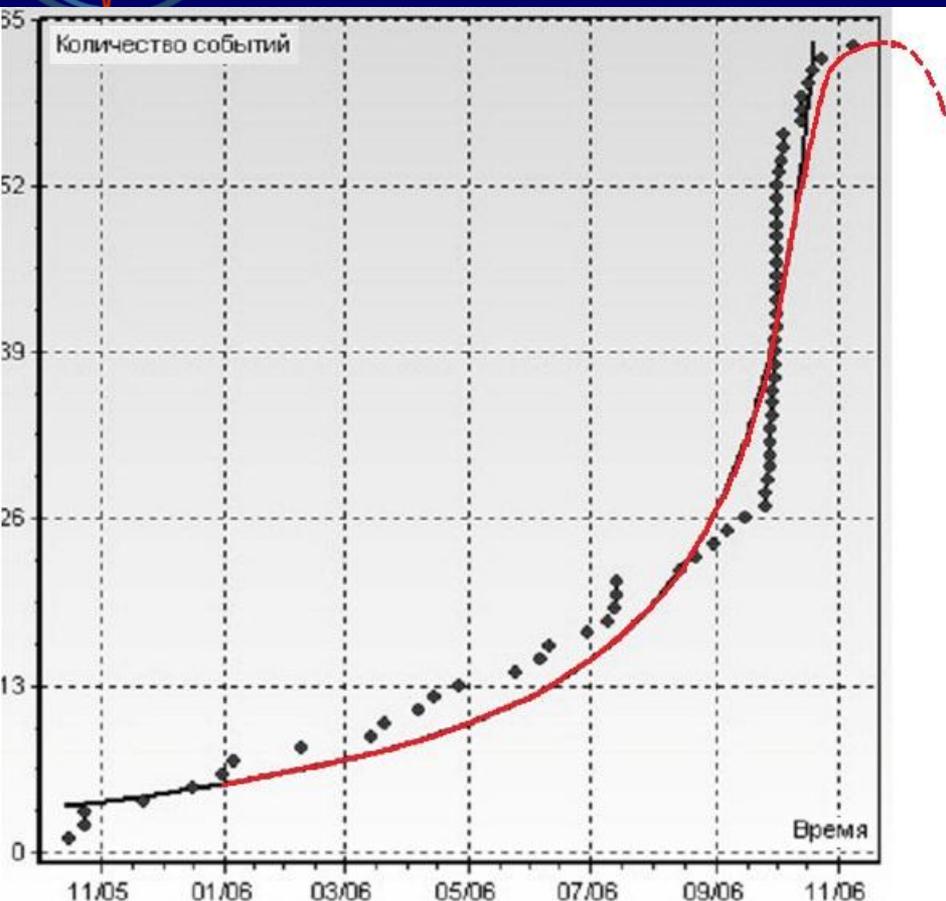
Коэффициент A определяется по начальному участку графика

$$A = (dy/dt)_0 / (y_0)^\alpha$$

Отсюда новые подходы к прогнозам времени- после точки перегиба, или после “излома”. Задачей становится оценить параметры A, α на начальном этапе.



Графики по новой модели



Перед Симуширским ЗЛТ

Теория описывает более крутой спад активности после главного события, чем рост в режиме СРП. Реально это не так отсюда необходимость переопределения коэфф А.

Перед Горнозаводским ЗЛТ



Заключение

Предложена модель для описания сейсмических последовательностей. Характеристика модели с позиций нелинейной динамики – реализуется жесткая релаксация

Модель требуют данных в достаточном объеме, но устраняет противоречие между подходом методики СРП к прогнозу времени землетрясения и некоторыми наблюдениями форшоковых последовательностей