

ЭФФЕКТЫ СВЕРХИЗЛУЧЕНИЯ И САМООРГАНИЗОВАННОЙ КРИТИЧНОСТИ В АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

SUPER-RADIATION AND SELF-ORGANIZED CRITICALITY EFFECTS IN ACOUSTIC EMISSION

В.В. Кузнецов¹, И.В. Кузнецов²

¹*Институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН*

²*Институт гидродинамики им. Лаврентьева СО РАН*

In numerous laboratory experiments on granite failure and in microtremor observations of lithosphere, including IKIR observations, the transient Acoustic Emission (AE) during microcrack opening was observed. It is well known that, under stationary loading, the AE count rate spontaneously starts to grow and keeps increasing until the critical value is reached. Then the system of microcracks reaches the equilibrium and the AE count rate is equal or less than initial one.

This phenomenon still remains unexplained, but is similar to well-known super-radiance effect in optics and is likely be a microcrack system with self-organizing criticality property.

Two problems are treated simultaneously: the wave-crack-wave interaction (wave amplification on opening crack) problem and the wave attenuation problem. The proposed system of partial differential equations is similar to Focker-Plank equations. The numerical calculations are compared with experimental results.

Введение

В многочисленных лабораторных экспериментах, а так же при полевых, натуральных наблюдениях, проводимых, в частности, и в ИКИРе, неоднократно регистрировался нестационарный характер акустической эмиссии раскрывающихся микротрещин. Суть явления состоит в том, что во время сжатия образца горной породы на прессе, или изменения тензора напряжений в литосфере, поток звуковых импульсов, образующихся в момент раскрытия трещин, резко изменяет свою интенсивность и возрастает на порядок. После этого поток так же резко уменьшается до величины, равной, или даже меньшей, чем в начале наблюдений. Это хорошо известное явление так и не получило адекватного объяснения.

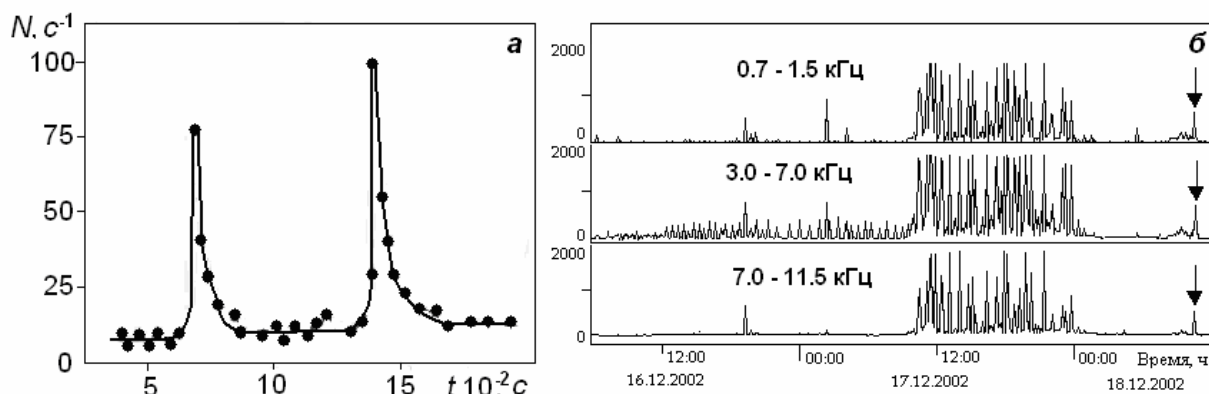


Рис.1. *а)* Скорость образования трещин в диабазе при действии на образец постоянного одноосного сжимающего напряжения [2]. *б)* Геоакустические сигналы, зарегистрированные перед землетрясением 18.12.2002 ($K = 12.1$). Время события отмечено стрелкой [6].

Результаты лабораторных экспериментов [2] (рис. 1-а) и натуральных наблюдений [6] (рис.1-б) показывают, что на фоне постоянного акустического фона (количества импульсов акустической эмиссии в единицу времени - dN/dt), излучаемого нагруженным образцом горной породы, возникает взрывоподобное нарастание (типа цепной реакции) количества раскрывающихся трещин N (акустических импульсов) в единицу времени t :

$$dN/dt = S + (f - g) N,$$

здесь S – скорость спонтанного зарождения трещин; $j = f - g$ – разность между факторами, определяющими разветвление и обрыва цепей, причем, если $j > 0$, $dN/dt \sim N$, – происходит лавинообразное нарастание количества трещин N . В некоторых случаях интенсивность звуковых волн (акустических импульсов) становится пропорциональной: $I \sim N^2$ (см. рис. 1-а). То же самое относится и к горной породе, находящейся в сейсмоактивном регионе (рис. 1-б).

Модель

Интенсивность звуковой волны I , иначе, вектор плотности потока энергии (U – вектор Умова) определяется следующим образом:

$$I = |U| = 1/T \int p v dt,$$

где p – давление на фронте волны, v – скорость её распространения.

Аналогичным образом запишем I_λ – интенсивность λ -ой звуковой волны (звукового импульса), излучаемой μ -ой трещиной:

$$I_\lambda = 1/\tau_\lambda \times \int \sigma_\lambda v_\lambda dt,$$

где σ_λ – напряжение в волне, v_λ – скорость ее распространения, τ – длительность звукового импульса.

Если раскрывается N трещин, суммарная интенсивность звуковой волны: $I = N I_\lambda$, или: $I \sim N/T$, T – время процесса. В стационарном состоянии, при неизменной нагрузке на геологическую среду, $dN/dt = S$, (S – скорость спонтанного зарождения и раскрытия трещин), величина постоянная. Трещины раскрываются из микротрещин – своеобразных «зародышей». В нашей задаче характерные размеры трещины ≈ 100 мкм, а микротрещины ≈ 1 мкм [4], концентрация микротрещин $n \gg N$.

Дилатансия

Образование N трещин в объеме V приводит к некоторому расширению образца массой m . Предположим, трещины толщиной d и длиной l раскрываются в объеме V , что приводит к уменьшению удельного веса среды $\rho_0 = m/V$: $\rho = m/(V + N d^2 l) < \rho_0$. Это явление – дилатансия D : $D = 1 - \rho/\rho_0$. Экспериментально зарегистрировать изменение величины D меньше 1 % – в лабораторном образце или в природе – маловероятно. Однако, если, к примеру, допустить возможность регистрации такой величины, то это условие позволяет оценить концентрацию трещин (размером $d = 10^{-4}$, $l = 10^{-2}$ см) N , которые при одновременном раскрытии могли бы обеспечить эффект дилатансии порядка 1 %. Концентрация трещин оказывается равной: $N \approx 10^8$ см⁻³, что, по-видимому, не очень реально, т.к. расстояние между трещинами должно было бы быть $\approx (N)^{1/3}$, что больше l .

Сверхизлучение

Эффект лавинообразного нарастания количества трещин N , приводящий к тому, что интенсивность акустических импульсов становится пропорциональной: $I \sim N^2$, по-видимому, идентична по физике известному в оптике, открытому Дикке в 1954 г. ещё до изобретения лазеров [12], явлению сверхизлучения. Дике предсказал, что система, состоящая из двух энергетических уровней, аналогичная лазеру, может спонтанно когерентно перейти в основное состояние за время, обратно пропорциональное числу возбужденных излучателей N : $\tau \sim N^{-1}$. Тогда полная энергия системы $I \sim N h \omega_0 / t \sim N^2$.

В нашей модели зависимость $I \sim N^2$ может быть получена следующим образом. Представим себе, что каждая из N трещин при раскрытии излучила акустическую волну, которая, при дифракции на микротрещинах, способствовала их раскрытию. На длине L акустически активной среды одновременно раскрывалось N трещин длиной l : $L = Nl$. Время раскрытия трещины определяется её длиной и скоростью раскрытия: $t_0 = l/u$, тогда, полагая: $T = t_0$, подставляя l , получаем: $T \sim 1/N$. Отсюда следует: $I \sim N/T$, или: $I \sim N^2$ – акустическое сверхизлучение. Возможно, именно это явление представлено на рис. 1.

Рассмотрим ситуацию, когда в образце породы имеется много микротрещин, а спонтанно раскрывается под нагрузкой только малая их часть. На рисунке 2 показано, что при наличии одной трещины (стрелка) длиной l в образце горной породы толщиной L время распространения акустического сигнала T складывается из времени раскрытия одной трещины t_0 и времени прохождения через образец акустической волны ($T - t_0$). Если в образце имеется несколько микротрещин (стрелки вдоль координаты x), способных раскрыться при приходе спусковой волны, то время акустического «ответа» образца оказывается равным t_0 , которое значительно меньше времени T .

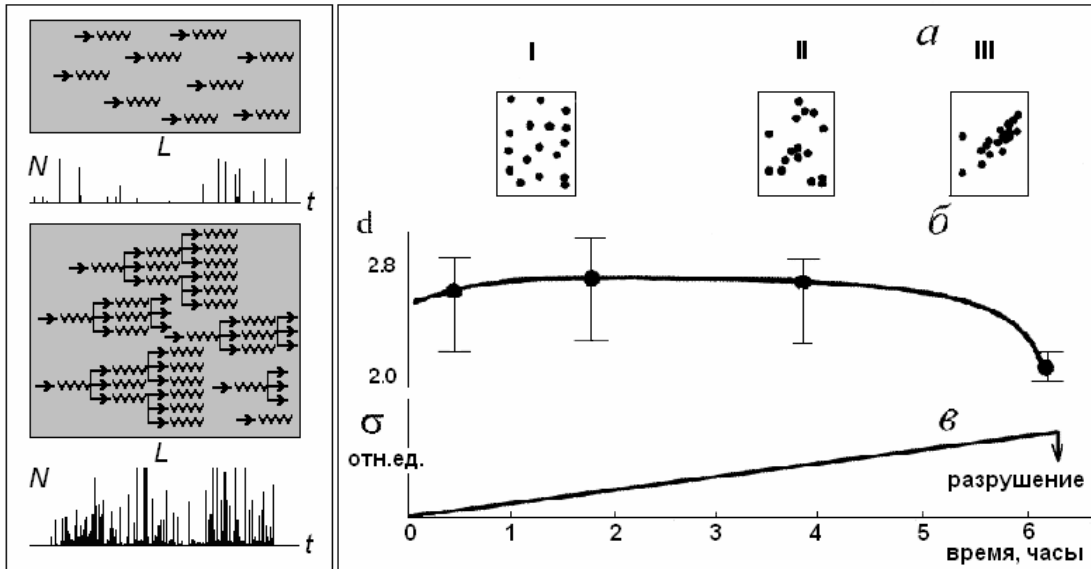


Рис.2. (слева). Акустическая эмиссия: спонтанное излучение (трещина – волна в образце) вверху, внизу - акустическое сверхизлучение. Рис.3. (справа) Очаги акустической эмиссии в образце (а), фрактальная размерность АЭ - d (б), увеличение нагрузки σ (в) [13].

Рассмотрим более подробно физику явлений, происходящих в акустически активной среде, и приводящих, в конечном счете, к эффекту сверхизлучения (в акустике). Воспользуемся известным критерием Гриффитса, согласно которому:

$$u = dl/dt = B (E/\rho)^{1/2} \times [1 - (\Delta\gamma/\Delta w)]^{1/2},$$

здесь B - константа, E - модуль Юнга, ρ - плотность среды, $\Delta\gamma$ - увеличение поверхностной энергии среды при росте трещины, Δw - энергия увеличения ее длины. Из экспериментов, скорость раскрытия трещин при литостатических нагрузках находится в пределах $10^4 - 10^5$ см/с. При размере трещины порядка 100 мкм, «частота» излучения акустической волны ~ 1 МГц, длина пробега волны в среде при такой частоте ≈ 1 см [8].

Акустическая волна оказывает влияние на раскрытие трещины. Волна, распространяясь по среде, в которой находятся микротрещины, рассеивается на одной из них и «передает» ей часть энергии $d\sigma/dt$, которая способствует ее раскрытию и дальнейшему росту [7]:

$$d\sigma/dt = 2\mu_0 u / (2\pi x)^{1/2} \times (w/v_s)^{1/2} \times \sin\theta_\lambda / 2 \times \exp[-i(\omega t + \pi/4)],$$

где μ_0 - модуль сдвига, $v_s = (\mu_0/\rho)^{1/2}$, θ_λ - угол падения волны на трещину.

Одно из необходимых условий возникновения акустической среды состоит в выполнении требования на размер трещины для её дальнейшего роста и уровнем энергии, приводящей к росту трещины. Рассмотрим трещину диаметром d в безграничном линейно-упругом напряженном теле. Обозначим σ напряжение, приводящее к раскрытию трещины. При раскрытии трещины, на единицу приращения её площади выделяется энергия $e = \sigma^2 d / E$, где E - модуль упругости. Если размер трещины d недостаточно велик, выделяющаяся энергия окажется меньше требуемой и, следовательно, трещина расти не будет. В такой ситуации добавление в систему небольшой части энергии, например, переносимой акустической волной, может привести к началу раскрытия трещины и, в дальнейшем, она будет раскрываться самостоятельно, под действием внешней нагрузки.

Акустическая волна в системе микротрещин может возникнуть при раскрытии одной из трещин. Она может запустить не одну из микротрещин, а сразу несколько. Они при этом генерируют ещё несколько акустических волн, которые так же приводят к раскрытию микротрещин и т.д. Процесс генерации волн и раскрытия трещин становится лавинообразным. Возникает акустически активная среда, величина dN/dt резко возрастает. После того, как все микротрещины будут активированы и раскроются, величина dN/dt будет уменьшаться, и может быть даже меньше, чем в начале процесса – до начала лавинного образования.

Запишем уравнение эволюции концентрации раскрывающихся трещин и возникающих при этом акустических импульсов аналогично тому, как это сделано для концентрации дефектов при разрушении металлов [1]:

$$\partial N/\partial t = \Phi(N, d\sigma/dt, \sigma, t) [dN/dt + \partial/\partial r\{D \partial N/\partial r - KN\}],$$

где $\Phi(N, d\sigma/dt, \sigma, t) = \partial\varepsilon/\partial t$ – связь деформации ε с внешним воздействием и параметрами материала, σ – напряжение, как и деформация – тензор, \mathbf{r} – пространственная координата, D – коэффициент диффузии акустического излучения ($D \approx \lambda c$, λ – длина пробега акустической волны в среде, c – скорость звука), K – параметр дрейфа, имеет смысл скорости распространения (раскрытия) трещины u .

Приведенное выше уравнение по смыслу и форме, это уравнение Фоккера-Планка, т.е. уравнение, описывающее процесс самоорганизации акустически активной среды [11].

Оценим характерное время накачки акустически активной среды t_n . Для этого привлечём кинетическую теорию прочности [9]. Положим, что это время есть ни что иное, как долговечность образца при его разрушении τ :

$$t_n = \tau = \tau^* \times \exp[(U_n - \gamma\sigma)/kT],$$

здесь τ^* – период тепловых флуктуационных колебаний атома в конденсированном теле (τ^* порядка 10^{-13} с), U_n – предел прочности среды (численно равен теплоте испарения ее вещества), $\gamma\sigma$ – работа внешних сил при разрушении, kT – тепловая энергия.

Если это время: $t < t_n$, где t_n – характерное время “накачки” (по аналогии с оптикой) образца упругой энергией, то реализуется режим сверхизлучения. Если имеет место обратное неравенство: $t > t_n$, то происходит сверхлюминесценция. В случае примерного равенства: $t \approx t_n$, генерируются волны в виде отдельных коротких импульсов. (Заметим, что практическая сейсмология «располагает» почти полным набором этих вариантов).

Обсуждение

Принципиальным моментом механизма взаимодействия между трещинами является то, насколько эффективно рассеиваются сейсмические волны на трещине и микротрещине. Приведем несколько очевидных соображений, касающихся особенностей рассеяния волны на микротрещине [3], которые будем использовать в дальнейшем.

1. Рассеянные волны образуются в результате взаимодействия между первичными волнами и неоднородностями среды – трещинами и микротрещинами.

2. Первичная Р-волна в направлении своего распространения не создает поля рассеянных S-волн дальней зоны.

3. В направлении распространения S-волны рассеянные Р-волны не излучаются.

4. Мощность, уносимая рассеянными волнами, определяется тремя основными параметрами: линейным размером объема неоднородной области X , характерным размером неоднородности a (размером трещины или микротрещины) и длиной волны сейсмической волны L .

5. Отношение первой зоны Френеля к характерному размеру неоднородности определяется волновым параметром $4X/ka^2$.

6. Рассеяние становится пренебрежимо малым, когда размер неоднородности оказывается много меньше длины волны.

7. Применимость различных методов анализа рассеяния определяется соотношением ka и kX ;

Модель Слепяна

Изложенные выше соображения базируются на континуальной теории разрушения. Развитие аналитической теории можно строить на модели Слепяна, в которой рассматриваются решетки единичных масс, каждая из которых взаимодействует с соседними массами при помощи безынерционных линейно-упругих связей единичной длины и единичной жесткости. Для антиплоской задачи о распространении трещины (mode III) используются решетки с квадратными ячейками (см. рис. 4), а в задачах растяжения и сдвига (mode I, II) используются решетки с треугольными ячейками (см. рис. 5).

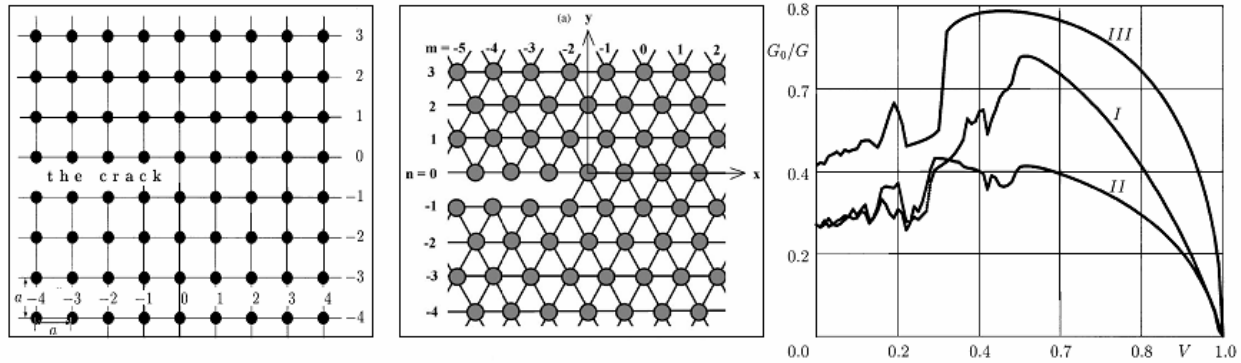


Рис.4. Решетка с квадратными ячейками. Рис. 5. Решетка с треугольными ячейками. Рис 6. Аналитическая зависимость G_0/G от V и от типа разрушения G_0/G .

Пусть V – скорость раскрытия трещины, G поток энергии к краю трещины, энергия G_0 тратится на разрушение связей, пересекаемых трещиной, энергия $G-G_0$ оттекает от края трещины при излучении осциллирующих волн - колебаний решетки (рис. 6).

Уравнение Фоккера - Планка

Стационарное решение уравнения Фоккера - Планка:

$$\partial f(q, t)/\partial t = - \partial j/\partial q, \quad j = d(\gamma q f)/dq + 1/2 Q d^2(f)/dq^2,$$

где $K = \eta q$ - коэффициент дрейфа; Q - коэффициент диффузии; η - скорость затухания волнового пакета в системе, для одномерного случая имеет вид [11]:

$$f(q) = P \exp(-2V(q)/Q),$$

где $V(q) = - \int K(q) dq$ - потенциал, P - нормировочный множитель.

Функция плотности вероятности имеет экспоненциальный вид, причем в показателе степени имеется “силовой” параметр, характеризующий потенциал, энергию и т.п. Физический смысл решения уравнения Фоккера - Планка можно представить как зависимость вероятности появления функции с определенным потенциалом от величины этого потенциала. Чем выше потенциал, тем меньше вероятность появления этого решения.

В одномерном виде решение нестационарного (зависящего от времени) уравнения Фоккера - Планка записывается следующим образом:

$$f(q, t) = (\pi a(t))^{-1/2} \exp\{-(q - b(t))^2/a(t)\},$$

где $a(t) = Q/\alpha(1 - \exp(-2\alpha t)) + a_0 \exp(-2\alpha t)$; $b(t) = b_0 \exp(-\alpha t)$. При $a \rightarrow 0$ ($a_0 = 0$), решение сводится к δ -функции. Из решения следует, что при выполнении определенных условий в диссипативной самоорганизующейся системе может возникнуть нестационарное решение, например (при соответствующей интерпретации входящих в уравнение Фоккера-Планка параметров), в виде уединенной волны. Решение (в виде волны или δ -функции), как показано в [11], при перемещении во времени и пространстве может постепенно расплываться и ослабевать, или, наоборот, усиливаться и сжиматься. Полученное решение дает объяснение внезапного усиления АЭ при неизменной нагрузке на образец горной породы.

Из решения линеаризованного уравнения Фоккера – Планка следует:

$$dq/dt = -\alpha q + \eta \Delta q + F.$$

Здесь α - внешний параметр (имеет физический смысл плотности потока).

Корреляционная функция $\langle q(x', t') q(x, t) \rangle$ для одномерного случая при $t' = t$ имеет вид

$$\langle q(x', t) q(x, t) \rangle = Q/(\alpha\eta)^{1/2} \times \exp(-(\alpha/\eta)^{1/2} |x' - x|).$$

Множитель при $|x' - x|$ в показателе экспоненты имеет размерность, обратную размерности длины. Обозначим через $l_k = (\alpha/\eta)^{-1/2}$ длину корреляции. Очевидно, что $l_k \rightarrow \infty$ при $\alpha \rightarrow 0$ и, наоборот, при увеличении плотности потока длина корреляции уменьшается.

Параметр $d = (\alpha/\eta)^{1/2} l_k$ - представляет собой размерность фрактала (кластера). В [14] d меняется от 2,8 до 2,2 (см. рисунок 3).

Как можно оценить из экспериментальных данных [13], $l_k \approx 1$ см. Плотность потока импульсов акустической эмиссии $\alpha \approx 10 - 100 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, следовательно, $\eta \approx 1-10 \text{ с}^{-1}$. На основе имеющихся экспериментальных данных параметр η , который характеризует затухание акустической волны, оценить невозможно, поэтому трудно сказать, насколько полученная выше оценка соответствует реальной величине.

Полученное решение уравнения Фоккера - Планка указывает на возможность образования фрактальной структуры излучающих трещин. Заметим, что в эксперименте [13] обнаружено явление пространственной кластеризации трещин, которые “стягивались” из всего объема образца в некоторую плоскость, расположенную под углом примерно 45° к оси нагрузки на образец.

Заключение

Самоорганизация в диссипативных (неконсервативных) многопараметрических структурах - весьма распространенный процесс. Он проявляется в степенной зависимости вероятности возникновения того или иного события от его параметра. Для таких явлений как землетрясения, вспышки на Солнце, космические лучи, этим параметром может быть энергия. Таким параметром является частота образования трещин. Когерентное сложение трещин в пространстве может привести к резкому локальному разрыву сплошности среды и возникновению ударной волны, выход которой на поверхность Земли - собственно и является землетрясением [3].

Список литературы

1. Градов О.М., Попов Е.А. Структурная устойчивость и иерархия квазистационарных состояний при разрушении // Сб. «Синергетика и усталостное разрушение металлов». - М.: Наука, 1989. С.138-152.
2. Журков С.Н., Куксенко В.С., Петров В.А. и др. Концентрационный критерий объемного разрушения твердых тел // Физические процессы в очагах землетрясений. - М.: Наука, 1980.
3. Кузнецов В.В. Физика земных катастрофических явлений. - Новосибирск: Наука, 1992; Ударно-волновая модель очага землетрясения // Науки о Земле. М.: Вузовская книга. 2001. С.47-62. Физика Земли. Разработка и обоснование модели горячей Земли. - М.: Наука, 2007.
4. Кузнецов В.В. Модель самоорганизации ансамбля излучающих звук трещин // ПМТФ. 2001. Т. 42, № 4. С. 184-189.
5. Кулахметова Ш. А., Сарайкин В. А., Слепян Л. И. Плоская задача о трещине в решетке // Изв. АН СССР. МТТ. 1984. № 3. С. 112-118
6. Купцов А.В. Особенности высокочастотной геоакустической эмиссии на заключительной стадии подготовки землетрясения. Кандидатская диссертация. ИКИР. 2006
7. Либовиц Г. Математическая теория хрупкого разрушения // Разрушение. Сб. науч. тр. под ред. Либовиц Г. -М.: Мир, 1975. Выпуск 2. С. 83-203.
8. Пузырев Н.Н. Методы и объекты сейсмических исследований. - Новосибирск: НИЦ ОИГГМ. 1997. - 302 с.
9. Регель В.Р., Слуцкер А.И. Кинетическая теория прочности // Физика сегодня и завтра. - Л.: Наука. 1973. С. 90-175.

10. Слепьян Л. И. Динамика трещины в решетке // Докл. АН СССР. 1981. Т. 253, №3. С. 561-564.
11. Хакен Г. Синергетика. М.: Мир. 1980. – 404 с. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. – М.: URSS. 2005. – 245 с.
12. Dicke R.H. Coherence in spontaneous radiation processes // Phys. Rev. 1954. V. 93, № 1. P. 99-110.
13. Lei X., Nishizawa O., Kuzunose K., Satoh T. J. Fractal structure of the hypocenter distributions and focal mechanism solutions of acoustic emission in two granites of different grain sizes // J. Phys. Earth. 1992. V. 40. P. 617-634.
14. Slepyan L.I. Feeding and dissipative waves in fracture and phase transition I. Some 1D structures and a square-cell lattice // J. Mech. Phys. Solids. 2001. V. 49. P. 469-511.
15. Slepyan L.I. Feeding and dissipative waves in fracture and phase transition. III. Triangular-cell lattice // J. Mech. Phys. Solids. 2001. V. 49. P. 2839 – 2875.

**ИССЛЕДОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТИ МАГНИТНЫХ ОБСЕРВАТОРИЙ ИКИР ДВО РАН**

**THE INVESTIGATIONS OF THE GEOMAGNETIC VARIATIONS USING THE
MAGNETIC OBSERVATORY NETWORK OF THE IKIR FEB RAS**

В.В. Кузнецов¹, С.Ю. Хомутов²

*¹Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН
²Геофизическая обсерватория "Ключи" АСФ ГС СО РАН*

The magnetic field monitoring is performed by magnetic observatory (MO) of IKIR FEB RAS: "Paratunka", "Cape Schmidt", "Magadan", "Khabarovsk" and "Yuzhno-Sakhalinsk". These observatories cover the wide region of Russian Far East and North and display the wide range of magnetic field values (see Figure). Simultaneous use and processing of the MO data allows to solve various applied and scientific problems, such as the on-line control of the local magnetospheric disturbance motion, the investigation of the long-period magnetic variations (similar to magnetic pole drift or jerks), the estimation of the potentiality of the Earth's magnetic field and its spatial-temporal variations. Practical steps towards of realization of this project are (i) the full check of the old data of these MO and the creation of the convenient data base, (ii) the installation of modern digital magnetometers and the maintenance the real-time data exchange between MO and (iii) the simulation of the spatial configuration of IKIR magnetic observatories network and its technical possibilities.

1. Введение

Любая стационарная магнитная обсерватория (МО), работающая в соответствии с принятыми международными стандартами, предоставляет уникальную информацию о вариациях магнитного поля Земли на различных временных масштабах. Но на порядок более ценные данные могут быть получены распределенной сетью МО, выполняющих измерения по согласованной программе. Примером глобальной сети является мировая сеть МО, работающая по стандартам IAGA, или сеть следующего поколения – INTERMAGNET.

Прекрасным примером эффективности измерений сетью МО может служить проект университета Кюсю (Япония) "210° Magnetic Meridian Network Project", начатый в рамках программы STEP в 1990 г. [7]. В проекте был задействован ряд российских обсерваторий, включая две МО ИКИР: "Паратунка" и "Магадан". Основной задачей проекта было исследование процессов в магнитосфере, в т.ч. разделение пространственных и временных вариаций, изучение распространения магнитосферных возмущений от высоких широт к экватору, понимание глобальных механизмов генерации солнечно-земных явлений, используя магнитные измерения (с разрешением в 1 секунду). В 1996 г. этот проект был расширен за счет включения в единую сеть ряда МО,