

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

## Магнитопластичность и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу?

А.Л. Бучаченко

*Обсуждены причины запасаания упругой энергии в литосферном макрореакторе — очаге землетрясения. Анализируется нелинейная кинетика явлений землетрясения, цепного химического взрыва и ядерного взрыва. Переход от стационарного режима к режиму взрыва в этих трёх процессах осуществляется как критическое явление, в котором критическими параметрами являются концентрации дислокаций, активных химических центров и нейтронов. Предложено стимулировать медленную релаксацию упругой энергии деформационного напряжения очага землетрясения низкочастотным микроволновым облучением, которое обеспечивает ускоренное движение дислокаций, снижает предел текучести и увеличивает пластичность. Это явление, известное в физике твёрдого тела как магнитопластичность, можно использовать для удержания очага землетрясения вдали от критического режима катастрофы, искусственно вызывая его медленную релаксацию. Наблюдаемые признаки влияния магнитных бурь на динамику землетрясений в принципе согласуются с концепцией стимулированной магнитопластичности очага как средства избежания катастрофы.*

PACS numbers: 61.72.-y, 62.20.-x, 91.30.Px

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201401e.0101

## Содержание

1. Введение. Смысл проблемы: предсказать или предотвратить? (101).
  2. Можно ли предсказать землетрясение? (102).
  3. Почему упругая энергия накапливается? (103).
  4. Можно ли избежать катастрофы? (104).
  5. Магнитопластичность диамагнитных кристаллов (106).
  6. Микроволновое стимулирование пластичности очага (107).
  7. Заключение (107).
- Список литературы (107).

### 1. Введение. Смысл проблемы: предсказать или предотвратить?

Землетрясение — явление импульсной релаксации, сброса упругой энергии, запасаённой в участке земной коры, называемом очагом. Очаг землетрясения — гигантский физико-механический и механохимический макрореактор, "жизнь" и события в котором определяются двумя конкурирующими процессами: накоплением энергии за счёт деформирующих сил (деформационная энергетическая накачка) и релаксацией этой энергии через катастрофический сдвиг, скольжение одних участков земной коры относительно других;

именно этот сдвиг приносит неисчислимые бедствия. Оба процесса неизбежны и естественны для живой, динамичной системы, какой является Земля; интригует другое обстоятельство — несоизмеримость временных и пространственных шкал этих двух процессов. Тектонические скорости, обеспечивающие энергетическую накачку очага, составляют сантиметры или даже миллиметры в год, а сброс энергии происходит при движении земных участков со скоростями, достигающими метра в секунду; различие в скоростях составляет более десяти порядков. Это обстоятельство проявляется и в периодичности землетрясений, генерируемых одним и тем же очагом: обычно время аккумуляции энергии — период подготовки, "молчания" очага — длится годы, а иногда десятилетия и даже столетия, тогда как высвобождение энергии происходит за секунды (максимум — за минуты).

Проблема землетрясений — глобальная, общечеловеческая; существуют две точки зрения на эту проблему. Первая подразумевает, что воздействовать на землетрясение, как на монументальное явление, невозможно и потому нужно искать признаки его приближения — предвестники землетрясения, предсказывать время этой катастрофы, чтобы принять меры безопасности. Такая точка зрения преобладала многие десятилетия. Другая, осторожная, точка зрения предполагает, что очаг землетрясения является чувствительной, уязвимой по отношению к внешним воздействиям системой, и на него можно влиять и даже искать пути стимулирования сброса энергии малыми дозами, не доводя очаг до катастрофы.

Цель данной статьи — сопоставить и оценить эти две позиции, исходя из того что проблема землетрясения — это проблема мостов между механическим напряжением

А.Л. Бучаченко. Институт химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, ул. Косыгина 4, 119991 Москва, Российская Федерация  
Тел. (495) 939-13-16, (495) 939-71-28  
E-mail: abuchach@chph.ras.ru

Статья поступила 3 апреля 2013 г.

и его следствием — деформацией, что это часть общей проблемы физики и механики твёрдого тела. Мы не будем обсуждать здесь происхождение и источники упругой энергии в очаге — это проблема динамики геосферы и тектонических плит [1–3].

## 2. Можно ли предсказать землетрясение?

В очаге землетрясения, как в механохимическом макро-реакторе, представлена вся механохимия. Она начинается с разрывов химических связей, ковалентных или ионных, далее следуют рождение и движение дислокаций, генерация и размножение трещин, сдвиговые микросмещения. Раскрытие микротрещин может генерировать электрические разряды между бортами трещины как обкладками микроконденсатора. Растущая микротрещина, как показано прямыми измерениями с помощью антенны Роговского [4], также переносит заряды — от  $10^{-7}$  до  $10^{-5}$  Кл на единичную трещину; движущаяся трещина генерирует электромагнитное поле мощностью  $10^{-20}$ – $10^{-17}$  Вт [4]. Микросдвиги генерируют акустическую эмиссию. Система микротрещин изменяет диффузию газовых компонентов и проницаемость пород, поэтому очаг является источником химической эмиссии, а также источником акустического и электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне — от инфразвука к радиочастотам и до рентгена. Имеется ясное понимание, что все события в очаге, всё "творчество" этого литосферного макро-реактора прямо или косвенно можно детектировать. Более того, поведение литосферного реактора отдаётся эхом в другом гигантском реакторе — ионосфере. Связь двух макро-реакторов уже отчётливо осознана, и это дало новый импульс для поисков признаков и предвестников землетрясений, созревающих в очаге [5, 6].

Многолетние крупномасштабные наблюдения за очагами землетрясений и исследование особенностей их функционирования выявили ряд ключевых признаков, наиболее динамично связанных с очагом и определяемых с высочайшим метрологическим качеством (точностью и чувствительностью):

- движение участков коры, относительные (взаимные) смещения и абсолютные смещения (относительно уровня моря);
- скорость распространения сейсмических волн, продольных и поперечных, и отношение скоростей;
- электропроводность, электрические поля и их градиенты;
- геомагнетизм и сила тяжести (константа земного ускорения  $g$ );
- уровень воды в колодцах и скважинах;
- химические признаки: содержание радона и других газов (He, Kr, Ar, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>) в воде; содержание ионов (HSO<sub>4</sub><sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> и др.) и микроэлементов (Si, Ge, Hg, F); изотопные соотношения (<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C, <sup>36</sup>Ar/<sup>40</sup>Ar и др.) [7].

В этой области сложились блестящие научные школы Садовского, Кейлис-Борок, Страхова и других [8–10]; огромная ценность этих работ для общего мониторинга Земли и, в частности, диагностики очагов бесспорна. Более того, успехи в диагностике очага породили ощущение, что на базе предвестников можно строить прогнозы и предсказания места и сроков землетрясения [11–18]. К сожалению и разочарованию, надежды эти оказались иллюзорными.

Многочисленные прогнозы последних 100 лет оказались безуспешными, ошибочными; ещё Рихтер, именем которого названа шкала землетрясений, говорил, что ему "не нравится патологический интерес к прогнозу". Дело тут, однако, не во вкусе — слишком велика цена проблемы: ошибочный прогноз страшнее самого землетрясения. Вся история наблюдений землетрясений знает лишь один случай предсказания, сбывшегося с точностью до нескольких часов, но и там цена ожидания оказалась выше цены самого землетрясения [3].

Международная ассоциация по сейсмологии и физике Земли с участием физиков всех стран выполнила фундаментальную работу по анализу всех признаков, именуемых предвестниками, и всех прогнозов. Её итог: ни один из признаков не удовлетворителен по надёжности; часто они противоречат друг другу; ни один из них не действителен [19, 20]. Заявления о прорывах в этой области не выдерживают критики, часто оказываются просто честными заблуждениями. Сами признаки характеризуются столь низким уровнем параметров, что они тонут в шумах от климатических и техногенных "помех" [21]. "Удачные" предсказания обнаруживаются лишь ретроспективно, после того как катастрофа случилась; это предсказания "задним числом", для которых в англоязычной литературе появился даже термин *retrodiction*, по контрасту с *prediction* [22]. Делается вывод, что надёжные предвестники не только трудно (точнее, невозможно) идентифицировать, но их просто не существует [20]. Есть даже точка зрения, что всё связанное с сейсмологией землетрясений не является в строгом смысле наукой, ибо наука начинается там, где она умеет предсказывать (заметим, кстати, что там же она и кончается).

Для таких суждений есть физические основания. Очаг землетрясения — открытая динамическая система, где граница между квазистационарным и нестационарным (взрывным) режимами определяется критическими условиями — непредсказуемыми, неконтролируемыми и потому неуправляемыми. Из-за сильной нелинейности системы она неконтролируема по координате "воздействие–ответ"; бесконечно малые нестабильности могут стимулировать крупные. Невозможно учесть все случайные возмущения — так же как "нельзя жить подробно" (Л.Н. Толстой).

Очаг землетрясения — не единственная система такого рода. Непредсказуем момент разлома стеклянной пластинки с закреплёнными концами и нагруженной посередине; невозможно предугадать момент взрыва колбы с гремучей смесью H<sub>2</sub> + O<sub>2</sub>, хотя все реакции и их скорости в этой системе известны с высокой точностью; неконтролируем переход от ламинарного течения к турбулентному, а также социальный взрыв (революция) и т.д.

Добавим, что разработано множество моделей явления [23–28], включая "квантовую" модель [29], однако среди них нет ни одной надёжной, совершенной и непротиворечивой [26]. Причина, конечно, в сложности явления и в крайней ограниченности знаний об очаге. Более того, если бы даже удалось найти "хорошую" модель, вряд ли это помогло бы решить главный вопрос: как угадать момент катастрофы? Для сравнения: модель химического взрыва водорода с кислородом надёжна и однозначна, в ней всё известно, однако она совершенно бесполезна, если мы хотим предсказать момент взрыва.

### 3. Почему упругая энергия накапливается?

Конечно, при деформации твёрдого тела запасается разная энергия, но для землетрясения как события важна упругая часть запасённой энергии: именно она провоцирует макроскопические сдвиги и "встряхивание" участков земной коры в окрестности очага землетрясения. Ключевой вопрос, в котором заключена вся интрига землетрясения, — почему при огромном избытии механизмов и каналов релаксации энергии, вносимой деформацией (через генерацию дефектов и вакансий, дислокаций, микро- и макроскопических трещин и т.д.), всё-таки деформационная накачка энергии превосходит утечку, сброс энергии.

Попробуем сначала ответить на наивный вопрос: возможно ли было бы землетрясение, если бы земная кора была идеально пластическим телом? Отрицательный ответ абсолютно очевиден: вся энергия деформационной накачки уходила бы в пластическое течение — преодоление барьеров атомных смещений, движение атомных групп, преодоление межатомных и межмолекулярных потенциалов, разрывы химических (ковалентных и ионных) связей и т.д.

Теперь поставим другой, ещё более наивный вопрос: возможно ли было бы землетрясение, если бы земная кора была идеально упругим телом (например, алмазом)? Отрицательный ответ тоже находится, хотя и не сразу: в этом случае вся упругая энергия расходовалась бы на образование микротрещин, на разрыв химических или межмолекулярных связей. Микротрещины зарождаются на структурных дефектах и растут до тех пор, пока упругая энергия не перекачается в энергию образования трещин. В идеально упругом теле трещина есть структурный элемент стока упругой энергии; динамика генерации, распространения и размножения трещин есть динамика энергетической релаксации. Это хорошо известный и очень эффективный механизм релаксации энергии в упругих телах — механизм Гриффитса; наука о трещинах Гриффитса настолько хорошо разработана и надёжна, что мы её здесь не будем воспроизводить [30].

Итак, в абсолютно пластическом и в абсолютно упругом теле между деформационной накачкой энергии и релаксацией, высвобождением или преобразованием энергии нет никакого запаздывания. Земная кора не является ни абсолютно упругим, ни абсолютно пластическим телом — и в ней запасается упругая энергия, в ней запаздывание между деформационной накачкой энергии и её катастрофическим высвобождением (землетрясением) достигает нескольких лет, а иногда и столетий. Почему земная кора и слагающие её деформируемые породы аккумулируют упругую энергию, почему они удерживают её достаточно долго — весь период подготовки землетрясения? Более того, имеется чёткая связь: чем больше период подготовки, "молчания" очага, тем больше создаётся запас упругой энергии и тем мощнее катастрофа (в баллах по шкале Рихтера) [31–33]. Ответ надо искать в физической механике твёрдых тел, в физической природе пластичности и прочности кристаллов, в функциональных зависимостях между напряжением и деформацией [34, 35].

Пластическая деформация кристаллов (и, конечно, пород, составляющих очаг землетрясения) есть результат движения дислокаций, а скорость деформации определяется плотностью и скоростью движения дислокаций.

В свою очередь, и плотность подвижных дислокаций, и скорость их движения (трение) управляются совокупностью процессов генерации дислокаций, их размножения на препятствиях и на дислокациях "леса" (по механизму Франка–Рида), их иммобилизации и превращения в неподвижные, "пленённые" дислокации ("спаривание" в краевые диполи, захват краевыми диполями, примесями и упругими полями других дислокаций). Именно взаимодействия дислокаций с примесными и/или структурными дефектами и с другими дислокациями считаются главными факторами, определяющими механику кристаллов и функциональную зависимость напряжения – деформация [35, 36].

Главный вклад в упрочнение даёт контактное взаимодействие дислокаций. Кинетика (временная эволюция) дислокационных ансамблей напоминает кинетику поведения активных центров (атомов и радикалов) в цепных разветвлённых химических реакциях (типа воспламенения водорода с кислородом). В эволюции дислокаций и активных центров главные стадии кинетически почти тождественны: есть акты зарождения и тех и других; есть процессы размножения дислокаций, эквивалентные разветвлению кинетических цепей и размножению активных центров; есть квадратичная аннигиляция дислокаций и эквивалентная ей квадратичная рекомбинация активных центров, т.е. квадратичный обрыв кинетических цепей; наконец, есть линейный обрыв дислокаций (захват, пленение подвижных дислокаций примесными центрами, краевыми диполями и упругими полями других дислокаций, которые "выключают" их из участия в пластической деформации) и есть линейный обрыв, гибель активных центров (на стенках сосуда или на добавках ингибитора), которые выключают активные центры из реакции. Линейный обрыв дислокаций приводит к снижению пластичности и деформационному упрочнению; линейный обрыв активных центров в цепной реакции сопровождается эквивалентным снижением её скорости и уменьшением выхода продуктов реакции.

Скорость пластической деформации кинетически тождественна скорости химической реакции, а сама пластическая деформация тождественна продукту, производимому химической реакцией. Кинетика дислокаций (обстоятельный анализ её дан в прекрасной статье [35]) описывается такими же уравнениями, как и кинетика цепных реакций. Более того, и эволюция дислокаций при медленной деформации (именно этот режим важен в очаге землетрясения на стадии его подготовки), и кинетика активных центров в медленных цепных реакциях (на стадии, предшествующей взрыву) описываются квазистационарными уравнениями, когда скорости изменения концентраций подвижных дислокаций и активных центров бесконечно малы и могут быть приравнены нулю. Конечно, это условие резко нарушается в момент катастрофы (землетрясения или цепного взрыва), когда плотности дислокаций и концентрации активных центров сильно нестационарны и изменяются в катастрофических масштабах.

Из анализа кинетики дислокаций получено выражение для коэффициента деформационного упрочнения  $\theta = d\sigma/d\varepsilon$ :

$$\theta = \theta_m(Q_0\sigma^{-3} - Q\sigma^{-1} + 1 - \sigma). \quad (1)$$

Здесь  $\sigma$  — безразмерное, приведённое к  $\sigma_\infty$  напряжение,  $\theta_m$  — параметр, включающий модуль сдвига. Важное

место в упрочнении занимают параметры  $Q_0$  и  $Q$ : первый из них определяется отношением скоростей зарождения дислокаций и их квадратичной аннигиляции, второй включает конкуренцию и баланс скоростей размножения дислокаций и их иммобилизации (линейного обрыва, пленения на дефектах, краевых диполях и других дислокациях). Из анализа выражения (1) следует, что упрочнение осуществляется в несколько стадий [35], однако для глобального процесса "созревания" землетрясения эти детали не слишком важны. Отметим лишь, что из уравнения (1) можно получить значение  $\sigma$ , при котором коэффициент упрочнения  $\theta$  имеет максимальное значение [35]:

$$\sigma = \left(\frac{Q}{2}\right)^{1/2} [1 + (1 - g)^{1/2}]^{1/2}. \quad (2)$$

Здесь

$$Q = \frac{k_{\text{im}} - k_{\text{m}}}{k_{\text{a}} \rho_{\infty}},$$

где  $k_{\text{im}}$  и  $k_{\text{m}}$  — константы скоростей иммобилизации и размножения дислокаций соответственно,  $\rho_{\infty}$  — предельная плотность дислокаций;

$$g = \frac{12nk_{\text{a}}}{b(k_{\text{im}} - k_{\text{m}})^2}, \quad (3)$$

где  $n$  — скорость зарождения дислокаций,  $k_{\text{a}}$  — константа скорости их аннигиляции,  $b$  — модуль вектора Бюргерса.

Ясно, что максимальные значения  $\sigma$  и  $\theta$  определяются балансом скоростей иммобилизации (пленения) и размножения дислокаций, — точно так же как и скорость цепной реакции зависит от разности скоростей размножения и обрыва кинетических цепей. Если скорость иммобилизации достаточно велика (когда  $g \geq 1$ ), то зависимость  $\sigma(\varepsilon)$  имеет вид

$$\sigma = 1 - \exp\left(-\frac{k_{\text{a}}}{2} \varepsilon\right). \quad (4)$$

Если же преобладает скорость размножения дислокаций и их накопления (например, для поликристаллических и высокозернистых твёрдых тел), то зависимость  $\sigma(\varepsilon)$  описывается следующим выражением:

$$\sigma = [1 - \exp(-k_{\text{a}} \varepsilon)]^{1/2}. \quad (5)$$

Из уравнений (1)–(5) следует также, что деформационное упрочнение сильно зависит не только от баланса скоростей иммобилизации и размножения дислокаций, но и от абсолютной скорости их квадратичной аннигиляции  $k_{\text{a}}$ .

Итак, две пары конкурирующих процессов — зарождение и аннигиляция, иммобилизация и размножение — определяют судьбу и кинетику дислокаций, каналы их превращений. Деформационное упрочнение — прямой результат влияния иммобилизационного канала. Бесспорно, что все эти процессы сосуществуют в очаге землетрясения, и с высокой степенью достоверности можно полагать, что они ответственны за накопление, запасание упругой энергии деформации в очаге.

Дислокационно упрочнённый материал — это уже другой, новый материал; химически он тождествен исходному, но по прочности он может превосходить исходный на несколько порядков, предел его разрушения превосходит теоретический предел прочности стартового материала. Ясно также, что деформационно-дислокационное упрочнение не может быть бесконечным; далее из скоплений иммобилизованных дислокаций формируется ячеистая структура, появляются линии и полосы скольжения, деформационные мезоструктуры и другие возмущения твёрдого тела [37–39]. В местах конденсации дислокаций нарушается структурная регулярность межатомных контактов, зарождаются и растут трещины уже в дислокационно упрочнённом материале, происходит множественное растрескивание, появляется лидерная трещина и геоморфологический разлом как финальный итог катастрофы. Другими словами, резерв упрочнения исчерпывается; при достижении критического порога даже малые дополнительные нагрузки индуцируют катастрофическую деформацию — землетрясение. О высокой энергоёмкости глубоко залегающих пород свидетельствуют данные, полученные при бурении Кольской сверхглубокой скважины: самовзрывание кернов, выбуренных из массива породы и освобождённых от сжатия горного давления, саморасширение ствола скважины, возникающее при саморазрушении стенок после прохождения бура [40].

Срыв режима медленной деформации в режим катастрофы подобен смене режима медленной реакции в режим взрыва в цепных процессах; он происходит даже при бесконечно малом изменении концентрации активных центров. По тем же причинам происходит смена режима в ядерном реакторе — от медленной реакции к ядерному взрыву при нарушении баланса захвата и размножения нейтронов. В этом смысле все три нелинейных процесса: землетрясение, цепной химический взрыв и ядерный взрыв — имеют общие кинетические закономерности; смена режимов происходит как критическое явление, в котором критическим параметром служит концентрация дислокаций, активных химических центров и нейтронов. Именно по причине сильной нелинейности явлений невозможно надёжно предсказать момент смены режима, даже при условии, что кинетика и механизм процессов известны с высокой точностью и надёжностью (как, например, в реакциях водорода с кислородом или в ядерных реакциях, где известны константы скорости элементарных химических реакций, сечения захвата нейтронов и т.д.).

Управление химическим или ядерным взрывом означает не более чем удержание этих процессов в стационарном режиме, достаточно удалённом от критической границы (добавками ингибиторов-флегматизаторов в случае химического процесса или введением поглотителей нейтронов в ядерной реакции). Можно ли сделать что-либо кинетически подобное, чтобы удержать очаг землетрясения вдали от критической границы, за которой неизбежна катастрофа? Можно ли заставить его функционировать в стационарном режиме?

#### 4. Можно ли избежать катастрофы?

Пластическая деформация обеспечивается подвижными дислокациями; когда они "замораживаются" упругими полями дефектов или других дислокаций и сами создают

упругие локальные поля, тогда они становятся источником дислокационного упрочнения очага землетрясения. Другой источник упрочнения — остановка микротрещин; в идеально упругом теле трещина Гриффитса растёт беспрепятственно, пока не исчерпается запас упругой энергии. В реальных твёрдых телах и в породах очага трещины останавливаются задолго до исчерпания запаса упругой энергии, потому что в устьях трещин, радиус которых имеет порядок межатомного расстояния, пластическая деформация создаёт дислокации и дислокационное упрочнение; они-то и останавливают, запирают трещины.

Высокие плотности пленённых дислокаций и микротрещин, энергетически "вмороженных" в упругие ловушки, составляют барьер на пути высвобождения запасённой упругой энергии через пластическую деформацию. Когда пленённые, "дремлющие" дислокации оживают, они становятся подвижными; тогда происходит катастрофа — импульсная пластическая деформация очага, импульсная релаксация упругой энергии.

Избежать катастрофы — значит избежать иммобилизации подвижных дислокаций и дислокационного упрочнения, стимулировать движение дислокаций и деформационную пластичность, снизить барьеры, запирающие упругую энергию очага. Конечно, сделать это в полном объёме невозможно, однако можно понизить уровень плотности дремлющих дислокаций и трещин, подавить хотя бы частично дислокационное упрочнение, снизить уровень запасённой упругой энергии — тогда можно ожидать снижения уровня катастрофы. Конечно, невозможно изменить масштаб упругой энергии, создаваемой тектоническими процессами, но высвобождение, релаксацию этой энергии хотелось бы регулировать, а именно стимулировать высвобождение энергии малыми долями, чтобы "разменять" крупную катастрофу на мелкие, менее опасные и более безобидные. Другими словами, надо искусственно стимулировать мелкие землетрясения, не дожидаясь, пока созреет крупное.

Есть ли средства воздействия на гигантский энергетический резервуар, каким является очаг землетрясения? Можно ли заставить его отдавать энергию небольшими порциями? Огромный опыт наблюдения и изучения землетрясений подсказывает положительный, хотя и очень осторожный ответ.

Во-первых, давно замечено, что в сейсмоопасных зонах создание крупных водохранилищ снижает уровень (частоту и мощность) крупных землетрясений. Малые землетрясения, однако, сохраняются [41]. Считается (и не без основания), что высокая насыщенность сейсмоопасных пород влагой увеличивает их пластичность и, следовательно, снижает запас хранимой в них упругой энергии. Один из наиболее реалистичных механизмов этого явления — активация остановленных, пленённых трещин. Вода, проникшая в них, реагирует с напряжёнными, сильно деформированными химическими связями в устьях трещин (через окислительно-восстановительные или гидролитические реакции); в результате происходит "разгрузка" дислокационного упрочнения, дислокации начинают двигаться, трещины приобретают маневренность и акцептируют упругую энергию, снижая её запас в очаге.

Другой реалистичный механизм — расклинивающее давление на борта трещины (по Ребиндеру), создаваемое водой; это дополнительное давление стимулирует рост

трещин и ускоряет сброс упругой энергии. (Мрамор можно сделать деформируемым с помощью влажной губки — это хорошо известно каменщикам и скульпторам.)

Конечно, было бы наивно исходя из этих наблюдений давать рекомендации по строительству плотин в сейсмоопасных зонах (что само по себе рискованно); из этого лишь следует, что процессы в очаге поддаются воздействию на атомно-молекулярном и дислокационном уровне, т.е. на уровне микромеханики.

Во-вторых, замечательные результаты были получены при глубинном электромагнитном мониторинге сейсмоопасных зон с помощью мощных электрических разрядов, генерируемых магнитогидродинамическим (МГД) генератором [42, 43]. При напряжениях порядка киловольта и токах около 3 кА (мощность около 3 МВт) вводимая в электрический диполь (с базой 3–4 км и длительностью 1–10 с) энергия от МГД-генератора составляла порядка  $10^7$  Дж [42].

Статистика многолетнего анализа землетрясений в районе испытаний этой импульсной электромагнитной технологии обнаружила влияние электромагнитных МГД-импульсов на режимы сейсмичности. Увеличивается отношение числа землетрясений, произошедших за одно и то же время после зондирования МГД-импульсами и до него; землетрясения перераспределяются в пространстве и по энергетической шкале — крупномасштабные события заменяются серией более мелких, менее разрушительных; выделенная энергия землетрясений, стимулированных МГД-импульсами, на несколько порядков превосходит энергию самих импульсов [44]. Всё это — вполне достоверные свидетельства взаимодействия МГД-импульсов с очагом землетрясений.

Физическая природа этих взаимодействий не вполне ясна и однозначна. Можно полагать, что импульсное электрическое поле  $E$  высокой напряжённости действует на заряженные пленённые дислокации с силой  $F = EQ$ , где  $Q$  — заряд дислокации. Если эта сила превосходит упругую силу, удерживающую дислокацию в иммобилизованном состоянии, то она "сгоняет" дислокацию, придавая ей подвижность и стимулируя пластичность. То же относится и к остановленным трещинам: прямые измерения заряда, переносимого в вершине единичной трещины, дают значения  $Q$  порядка  $10^{-7} - 10^{-5}$  Кл и дипольного момента порядка  $10^{-14}$  Кл м [4].

Вряд ли можно однозначно оценить, насколько этот механизм эффективен, — слишком много неопределённостей в параметрах очага. Не исключено, что наблюдаемые эффекты можно отнести и к ударной волне, сопровождающей мощный МГД-импульс и распространяющейся в очаге.

В-третьих, крупномасштабные бомбардировки в Югославии и Афганистане (особенно с использованием мощных глубинных бомб в Афганистане) стимулировали, как заметили сейсмологи, ряд "внеочередных", "неожиданных" землетрясений (хотя все землетрясения неожиданны). Это обстоятельство есть свидетельство уязвимости энергонасыщенного очага даже к слабым воздействиям, которые стимулируют критический переход из квазистационарного состояния очага в нестационарный, катастрофический режим. Ударные волны, сопровождающие взрывы, проходя очаг, могут "оживлять" дремлющие дислокации, частично снимать дислокационное упрочнение и высвобождать упругую энер-

гию. Кстати, по-видимому, по тем же причинам обнаруживается прямая связь сейсмичности с испытательными ядерными взрывами [42, 45].

В-четвёртых, можно предложить стратегию физического регулирования очага землетрясения путём его систематического ударного "встряхивания". Можно создать систему точек в окрестности очага (например, в виде совокупности неглубоких шурфов или скважин) и производить в этих точках "микровзрывы"; тогда исходящие от них ударные волны, создавая динамические зоны сжатия разгрузки, будут высвобождать, "оживлять" пленённые дислокации и микротрещины, стимулировать пластическую деформацию и релаксацию упругой энергии. Конечно, такое воздействие может провоцировать катастрофу, если очаг "созрел", если в нём сосредоточена огромная упругая энергия. Но если такое ударное "микровстряхивание" осуществлять постоянно, систематически, контролируемо, то можно дозированно избавлять очаг от накапливающейся в нём упругой энергии. Конечно, создание такой системы потребует затрат, однако масштаб их несравнимо меньше тех, которые сейчас тратит человечество на создание и поддержание системы глобального мониторинга землетрясений. Такая система с точки зрения спасения от катастроф в конечном счёте абсолютно бесполезна. И, конечно, создание такой "службы спасения" — дело не только учёных, но и правительств.

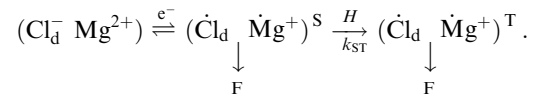
Наконец, можно стимулировать пластичность очага землетрясения микроволновым облучением.

## 5. Магнитопластичность диамагнитных кристаллов

Известно, что в магнитном поле снижаются твёрдость, предел текучести, пластичность и другие, родственные механические свойства диамагнитных кристаллов (NaCl, PbS, LiF, Si и др.); это замечательное явление названо магнитопластичностью [46–52]. Источник его заключён в поведении дислокаций: в магнитном поле увеличивается доля свободных дислокаций и возрастает их пробег. Энергия взаимодействия диамагнитного кристалла с магнитным полем пренебрежимо мала, поэтому она не может влиять на высокоэнергетические процессы перемещения дислокаций, ответственных за пластичность. Ясно, что дело тут не в энергии, а в угловом моменте электрона — его спине, которым управляет магнитное поле.

Физика магнитопластичности основана на следующей идее. Когда дислокация встречает стопор (например, примесный ион или другую дислокацию), она останавливается. Чтобы оторваться от стопора и двинуться дальше (этот процесс называется депиннингом), необходимо ждать флуктуации энергии или флуктуации энергетического барьера в системе стопор + пленённая дислокация. Есть, однако, другой, химический низкоэнергетический механизм депиннинга — перенос электрона от захваченной стопором дислокации к стопору [53, 54]. Он рождает спин-селективный и потому магниточувствительный нанореактор — пару неспаренных электронов, один из которых "сидит" на дислокации, другой — на стопоре [53, 55]. Кулоновский потенциал, удерживающий пленённую дислокацию на стопоре, выключается в нанореакторе; его выключение сопровождается откреплением, освобождением дислокации.

Совокупность этих простых процессов легко представить схематически на примере простейшего диамагнитного кристалла NaCl с ионами  $Mg^{2+}$  как стопорами:



Здесь  $(Cl_d^- Mg^{2+})$  — исходное состояние дислокации, пленённой ионом  $Mg^{2+}$  ( $Cl_d^-$  обозначает ионный элемент дислокации, а точки — неспаренные электроны). Прямой перенос электрона  $\epsilon^-$  рождает спиновый нанореактор в синглетном состоянии S; F обозначает освобождённые дислокации, покидающие нанореактор.

Освобождение дислокации ограничивается тем обстоятельством, что в спиновом нанореакторе (а он рождается именно в синглетном спиновом состоянии из-за сохранения нулевого спина при переносе электрона) происходит быстрый обратный, разрешённый по спину перенос электрона, возвращающий дислокацию в исходное пленённое состояние. Магнитное поле производит спиновую конверсию нанореактора из короткоживущего синглетного состояния в триплетное долгоживущее состояние T, из которого обратный перенос электрона запрещён по спину. Это означает, что магнитное поле освобождает дислокацию от кулоновского притяжения и увеличивает время жизни состояния с "выключенным кулоном", т.е. увеличивает вероятность депиннинга.

Магнитоиндуцированная скорость освобождения дислокаций пропорциональна населённости нанореактора в T-состоянии. Оно заселяется с константой скорости  $k_{ST}$  спиновой конверсии синглета S в триплет T:  $k_{ST} = |\Delta g \beta H|$ . Здесь  $\Delta g$  есть разность  $g$ -факторов партнёров в спиновом нанореакторе ( $\Delta g = g_1 - g_2$ ),  $\beta$  — магнетон Бора,  $H$  — магнитное поле. При обычном значении  $\Delta g \approx 10^{-2}$  в поле  $H = 500$  мТл величина  $k_{ST}$  составляет  $\approx 1,5 \times 10^8$  с<sup>-1</sup>. Отметим, что спиновый нанореактор рождается в чисто диамагнитном кристалле, без всяких парамагнитных примесей; это обстоятельство значительно расширяет границы магнитопластичности как универсального явления.

Спиновое происхождение магнитопластичности и существование спиновых нанореакторов надёжно доказаны экспериментально. И теоретически, и экспериментально убедительно показано, что подвижность дислокаций, механика и пластичность диамагнитных кристаллов зависят не только от статических магнитных полей, но и от микроволновых электромагнитных полей [54, 55].

Резонансные микроволновые поля с частотами  $g_1 \beta H$  и  $g_2 \beta H$  производят переориентацию электронных спинов нанореактора, переводя его из состояния S в триплетное долгоживущее состояние. Другими словами, резонансная микроволновая накачка зеэмановских переходов увеличивает время жизни нанореактора с выключенным кулоном, увеличивая вероятность депиннинга дислокации. В результате на этих частотах накачки возрастают и пробег дислокаций, и пластичность; это явление надёжно доказано экспериментально [56, 57].

Время жизни спинового нанореактора в системе стопор + пленённая дислокация определяется скоростями двух конкурирующих процессов — обратного переноса электрона и депиннинга; как правило, оно составляет  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  с. Этому временному интервалу соответствуют скорости (частоты) спиновых переходов в нанореакторе в области  $10$ – $10^2$  МГц, поэтому все нерезо-

нансные микроволновые поля, осциллирующие с меньшими частотами, воспринимаются нанореактором как поля статические, медленно меняющиеся, а их воздействие оказывается таким же, как и влияние постоянного, не осциллирующего магнитного поля.

## 6. Микроволновое стимулирование пластичности очага

Уменьшение времени жизни пленённых дислокаций и ускорение их депиннинга и в постоянном магнитном поле (300–500 мТл), и в микроволновых полях (резонансных и нерезонансных) убедительно доказаны экспериментально [57]. Заметим, что микроволновый депиннинг дислокаций существует и в земном поле [58], т.е. в очаге землетрясения. Деформация пород в очаге генерирует дислокации разнообразной химической структуры. В сочетании с химическим разнообразием стопоров это создаёт огромный химический ансамбль систем стопор + пленённая дислокация и, следовательно, огромный набор спиновых нанореакторов с широким распределением  $g$ -факторов и зеемановских частот. Воздействуя на очаг землетрясения низкоамплитудным (маломощным) микроволновым облучением с широким спектром частот в области мегагерц (технически это сделать нетрудно), можно стимулировать одновременно и резонансный, и нерезонансный депиннинг дислокаций. Их ускорение повышает пластичность и обеспечивает энергетическую релаксацию очага. Медленная релаксация энергии напряжения в медленную пластическую деформацию удерживает очаг в докритическом режиме, предотвращая катастрофу. Количественный расчёт эффекта — задача особая, она потребует построения физических моделей, которые могли бы перебросить мост от микроскопического уровня (стимулирование движения дислокаций) к макроскопическим эффектам.

Магнитоиндуцированный депиннинг дислокаций феноменологически может приводить к двум противоположным эффектам. Микроволновое облучение слабо напряжённого очага делает его ещё более безопасным. Напротив, для перегруженного очага, который находится в критическом режиме, стимулированный депиннинг может сыграть роль спускового механизма, триггера катастрофического сброса энергии через деформацию. Это тот случай, когда микроволновое облучение может индуцировать землетрясение.

Действительно, суммированные в прекрасной монографии [15] исследования вариаций сейсмичности в сейсмоактивных регионах Казахстана и Киргизии в периоды до и после магнитных бурь (а они, как известно, генерируют микроволновые поля) установили, что в отдельных районах количество землетрясений после бурь увеличивается (положительный эффект), а в других — уменьшается (отрицательный эффект). Отмечено [15], что обнаруженное влияние магнитных бурь на сейсмичность носит триггерный, пороговый характер. Эти наблюдения в принципе согласуются с предсказаниями идеи магнитоиндуцированного депиннинга дислокаций.

## 7. Заключение

Автор понимает, что предложенная здесь концепция может быть принята неоднозначно (или вообще не принята). Надо, однако, осознавать, что другого пути

нет, если мы действительно хотим снизить риск опасных землетрясений. В рамках предложенной здесь физически реалистичной концепции существующая и хорошо развитая система мониторинга находит своё логическое место: она нацелена на то, чтобы обнаружить и очертить контуры очага, а также осуществлять хотя бы приблизительный контроль его эволюции (по тем признакам, которые называют предвестниками). Следующий этап — воздействовать на очаг системой микроволновых источников, оптимизированных по мощности и направленности. Для этого достаточно использовать маломощные и низкочастотные источники, постоянно функционирующие и стимулирующие магнитопластичность очага.

## Список литературы

1. Kasahara K *Earthquake Mechanics* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1981) [Касахара К *Механика землетрясений* (М.: Мир, 1985)]
2. Иванов В В *УФН* **161** (3) 31 (1991) [Ivanov V V *Sov. Phys. Usp.* **34** 230 (1991)]
3. Gere J M, Shah H C *Terra Non Firma: Understanding and Preparing for Earthquakes* (New York: W.H. Freeman, 1984) [Гир Дж, Шах Х *Зыбкая твердь: Что такое землетрясение и как к нему подготовиться* (М.: Мир, 1988)]
4. Рожной А А "Модельные исследования источников электромагнитных предвестников землетрясений", Дисс. ... канд. физ.-мат. наук (М.: ОИФЗ, 1998)
5. Oraevsky V et al. *J. Atmos. Terr. Phys.* **56** 423 (1994)
6. Бучаченко А Л и др. *УФН* **166** 1023 (1996) [Buchachenko A L et al. *Phys. Usp.* **39** 959 (1996)]
7. Барсуков В Л и др. *Геохимические методы прогноза землетрясений* (Отв. ред. В Л Барсуков) (М.: Наука, 1992)
8. Садовский М А, Болховитинов Л Г, Писаренко В Ф *Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс* (М.: Наука, 1987)
9. Садовский М А, Писаренко В Ф *Сейсмический процесс в блоковой среде* (М.: Наука, 1991)
10. Кейлис-Борок В И (Ред.) *Математическое моделирование сейсмотектонических процессов в литосфере, ориентированное на проблему прогноза землетрясений* Вып. 1 (М.: МИТП РАН, 1993)
11. Rikitake T *Earthquake Prediction* (Amsterdam: Elsevier, 1976) [Рикитакэ Т *Предсказание землетрясений* (М.: Мир, 1979)]
12. Mogi K *Earthquake Prediction* (Tokyo: Academic Press, 1985) [Моги К *Предсказание землетрясений* (М.: Мир, 1988)]
13. Geller R J *Nature* **352** 275 (1991)
14. Соболев Г А *Основы прогноза землетрясений* (М.: Наука, 1993)
15. Соболев Г А, Пономарев А В *Физика землетрясений и предвестники* (М.: Наука, 2003)
16. Гуфельд И Л, Гусев Г А, Похотелов О А *Докл. РАН* **338** 814 (1994)
17. Гусев Г А, Гуфельд И Л *Докл. РАН* **349** 100 (1996) [Gusev G A, Gufel'd I L *Dokl. Russ. Acad. Sci. Earth Sci.* **349** 862 (1996)]
18. Гуфельд И Л, Маренко В Ф *Докл. РАН* **323** 1064 (1992)
19. Wyss M, Both D C *Geophys. J. Int.* **131** 423 (1997)
20. Leary P C *Geophys. J. Int.* **131** 451 (1997)
21. Geller R J *Geophys. J. Int.* **131** 425 (1997)
22. Kagan Y Y *Geophys. J. Int.* **131** 505 (1997)
23. Гуфельд И Л и др. *Докл. РАН* **362** 677 (1998)
24. Gufel'd I L et al. *J. Earthquake Predict. Res.* **6** 333 (1997)
25. Гусев А А *Вулканология и сейсмология* **41** 125 (1988)
26. Родкин М В *Физика Земли* (9) 29 (2006) [Rodkin M V *Izv. Phys. Solid Earth* **42** 745 (2006)]
27. Rodkin M V *Phys. Chem. Earth* **21** 257 (1996)
28. Chen P, Duda S J *Phys. Earth Planet. Interiors* **93** 299 (1996)
29. Гусев А А, Гуфельд И Л, Препринт № 3 (М.: ОИФЗ, 1998)
30. Liebowitz H (Ed.) *Fracture, an Advanced Treatise* Vol. 3 (New York: Academic Press, 1971) [Либовиц Г (Ред.) *Разрушение* Т. 3 (М.: Мир, 1976)]
31. Scholz C H, Aviles C A, Wesnousky S G *Bull. Seism. Soc. Am.* **76** 65 (1986)

32. Houston H *Geophys. Res. Lett.* **17** 1413 (1990)
33. Sornette D *Phys. Rep.* **313** 237 (1999)
34. Смирнов Б И *Дислокационная структура и упрочнение кристаллов* (Л.: Наука, 1981)
35. Малыгин Г А *УФН* **169** 979 (1999) [Malygin G A *Phys. Usp.* **42** 887 (1999)]
36. Осипьян Ю А *Вест. АН СССР* **32** 319 (1972)
37. Nicolas A *Principles of Rock Deformation* (Dordrecht: D. Reidel Publ. Co., 1987) [Николя А *Основы деформации горных пород* (М.: Мир, 1992)]
38. Панин В Е *Изв. вузов. Физика* **41** (1) 7 (1998) [Panin V E *Russ. Phys. J.* **41** 1 (1998)]
39. Veysière P *Mater. Sci. Eng. A* **309–310** 44 (2001)
40. Козловский Е А *В мире науки* (3) 38 (1984)
41. Николаев А В "Проблемы наведенной сейсмичности", в сб. *Наведенная сейсмичность* (Отв. ред. А В Николаев, И Н Галкин) (М.: Наука, 1994) с. 5
42. Тарасов Н Т, Тарасова Н В *Докл. РАН* **343** 543 (1995)
43. Тарасов Н Т и др. *Вулканонология и сейсмология* (5) 152 (1999)
44. Тарасов Н Т и др. *Двойные технологии* (2) 11 (1999)
45. Николаев А В *Двойные технологии* (2) 6 (1999)
46. Альшиц В И и др. *Кристаллография* **48** 826 (2003) [Alshits V I et al. *Crystallogr. Rep.* **48** 768 (2003)]
47. Урусовская А А и др. *Кристаллография* **48** 855 (2003) [Urusovskaya A A et al. *Crystallogr. Rep.* **48** 796 (2003)]
48. Alshits V I et al., in *Dislocations in Solids* Vol. 14 *A Tribute to F.R.N. Nabarro* (Ed. J Hirth) (Amsterdam: Elsevier, 2008) p. 333
49. Alshits V I et al. *J. Appl. Phys.* **105** 063520 (2009)
50. Моргунов Р Б *УФН* **174** 131 (2004) [Morgunov R B *Phys. Usp.* **47** 125 (2004)]
51. Альшиц В И и др. *ЖЭТФ* **129** 735 (2006) [Alshits V I et al. *JETP* **102** 646 (2006)]
52. Альшиц В И и др. *Письма в ЖЭТФ* **88** 500 (2008) [Al'shits V I et al. *JETP Lett.* **88** 428 (2008)]
53. Бучаченко А Л *ЖЭТФ* **129** 909 (2006) [Buchachenko A L *JETP* **102** 795 (2006)]
54. Бучаченко А Л *ЖЭТФ* **132** 827 (2007) [Buchachenko A L *JETP* **105** 722 (2007)]
55. Бучаченко А Л *ЖЭТФ* **132** 673 (2007) [Buchachenko A L *JETP* **105** 593 (2007)]
56. Kveder V et al. *Phys. Status Solidi A* **202** 901 (2005)
57. Badylevich M V et al. *Phys. Status Solidi C* **2** 1869 (2005)
58. Альшиц В И и др. *Письма в ЖЭТФ* **91** 97 (2010) [Alshits V I et al. *JETP Lett.* **91** 91 (2010)]

## Magnetoplasticity and the physics of earthquakes. Can a catastrophe be prevented?

**A.L. Buchachenko**

*Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences,  
ul. Kosygina 4, 119991 Moscow, Russian Federation  
Tel. +7 (495) 939 13 16, +7 (495) 939 71 28  
E-mail: abuchach@chph.ras.ru*

The reasons for the elastic energy accumulation in a lithospheric macroreactor — a seismic focus — are discussed. The nonlinear kinetics of the phenomena of an earthquake, a chain chemical explosion, and a nuclear explosion are analyzed. The transition from a stationary regime to an explosion in these three processes occurs as a critical phenomenon with critical parameters representing the concentrations of dislocations, active chemical centers, and neutrons, respectively. It is proposed to stimulate the slow relaxation of the elastic energy of the deformation stress of the seismic focus by low-frequency microwaves, which provide the accelerated motion of dislocations, reduce the yield limit, and increase plasticity. This phenomenon, known as magnetoplasticity in solid-state physics, can be used to keep the seismic focus far from a critical catastrophic regime by artificially stimulating its slow relaxation. The observed features of the influence of magnetic storms on the earthquake dynamics are in principle consistent with the concept of the stimulated magnetoplasticity of the seismic focus as a means to avoid a catastrophe.

PACS numbers: **61.72.**–y, **62.20.**–x, 91.30.Px

DOI: 10.3367/UFNr.0184.201401e.0101

Bibliography — 58 references

*Received 3 April 2013*

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **184** (1) 101–108 (2014)

*Physics – Uspekhi* **57** (1) (2014)