

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

**Микроволновое стимулирование дислокаций
и магнитный контроль очага землетрясения**

А.Л. Бучаченко

Микроволновое облучение преобразует упругость твёрдых тел в пластичность, управляя подвижностью дислокаций через магнитные взаимодействия в электронно-спиновых парах на дислокациях. В ионных кристаллах микроволны приводят к увеличению скорости движения дислокаций и длины их пробега, обеспечивая высвобождение упругой энергии; в ковалентных кристаллах они закрепляют дислокации, аккумулируя упругую энергию и увеличивая прочность кристаллов. Эффекты микроволновой накачки на резонансных зеемановских частотах (в режиме магнитных резонансов) являются твёрдым доказательством физики электронно-спиновых пар и самого явления магнитоупругости. Однако главный вклад в макроскопическое преобразование упругой энергии в пластическое течение вносят нерезонансные поля. Именно их можно использовать для управления механикой диамагнитных твёрдых тел, включая очаг землетрясения. Наблюдаемые корреляции между магнитными событиями (магнитные бури, мощные магнитные импульсы магнитогидродинамических генераторов) и их сейсмотектоническими следствиями (частота и амплитуда землетрясений и деформаций) указывают на то, что магнитный контроль очага землетрясений реален и может использоваться для предотвращения катастроф и преобразования крупномасштабных землетрясений в слабые, маломасштабные.

Ключевые слова: магнитоупругость, дислокации, магнитные эффекты, землетрясения, микроволновое стимулирование дислокаций, магнитный контроль землетрясений

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

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.03.038301>

Содержание

1. Введение (47).
 2. Магнитный катализ движения дислокаций (48).
 3. Микроволновый приём: резонансные частоты (48).
 - 3.1. Ионные кристаллы.
 - 3.2. Ковалентные кристаллы.
 4. Микроволновый приём: нерезонансные частоты (50).
 5. Магнитно-сейсмическая физика очага землетрясений (51).
 - 5.1. Магнитные возмущения и землетрясения.
 - 5.2. Магнитные возмущения и сейсмотектонические деформации.
 - 5.3. Физическая механика дислокаций в очаге.
 6. Заключение (53).
- Список литературы (54).

А.Л. Бучаченко. Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН, ул. Косыгина 4, 119991 Москва, Российская Федерация; Институт проблем химической физики РАН, просп. академика Семёнова 1, 142432 Черноголовка, Московская обл., Российская Федерация; Научный центр РАН в Черноголовке, ул. Лесная 9, 142432 Черноголовка, Московская обл., Российская Федерация; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы 1, 119991 Москва, Российская Федерация; Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, ул. Советская 14, 150003 Ярославль, Российская Федерация
E-mail: abuchach@chph.ras.ru, alb9397128@yandex.ru

Статья поступила 19 декабря 2017 г.,
после доработки 20 февраля 2018 г.

1. Введение

Механика диамагнитных кристаллов зависит от магнитного поля; загадочность этого явления, названного магнитоупругостью, определяется тем, что в кристаллах, обнаруживающих это свойство, нет магнитных компонентов. Надёжно установлено, что источником магнитоупругости являются дислокации; именно скорость их движения зависит от магнитного поля [1, 2] и эта зависимость является ключом к магнитоупругой механике. Конечно, было ясно, что при движении дислокаций в диамагнитном кристалле появляются какие-то парамагнитные состояния, на которые воздействует магнитное поле, но их природа и механизм появления оставались загадочными. Экспериментально доказано, что источником магнитоупругости является система дислокация + стопор. Поскольку о каком-либо вкладе магнитного поля в энергетику этой системы говорить неуместно, следует признать, что в этой системе каким-то образом работает спин (угловой момент) электронов и что в системе дислокация + стопор существуют спиновые запреты, контролируемые магнитным полем. Однако ни свободная дислокация, ни диамагнитный стопор (типа Ca^{2+}) не несут спина. Даже если стопор парамагнитен (например, Ni^{3+} или Cu^{2+}), система дислокация + стопор не становится спин-селективной: в ней нет спиновых запретов, так как спин исходного состояния (плёнчатая стопором дислокация) и спин конечного состояния (откреплённая, ушедшая дислокация и остав-

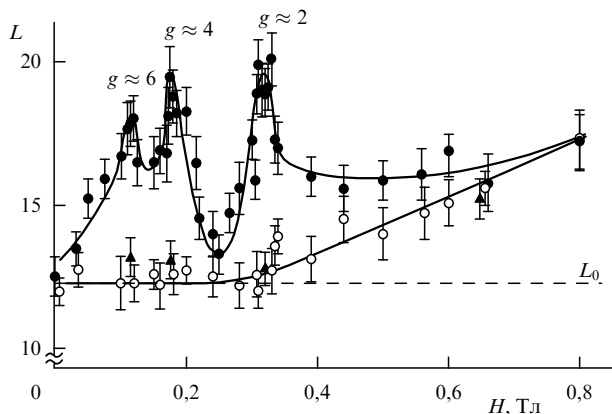


Рис. 4. Увеличение пробега дислокаций в резонансных полях при частотах $g_1\beta H$ ($g \approx 6$), $g_2\beta H$ ($g \approx 4$) и $g_3\beta H$ ($g \approx 2$). Пустые точки обозначают пробег дислокаций в отсутствие микроволнового поля (нижняя кривая). L_0 обозначает стартовый пробег в отсутствие поля.

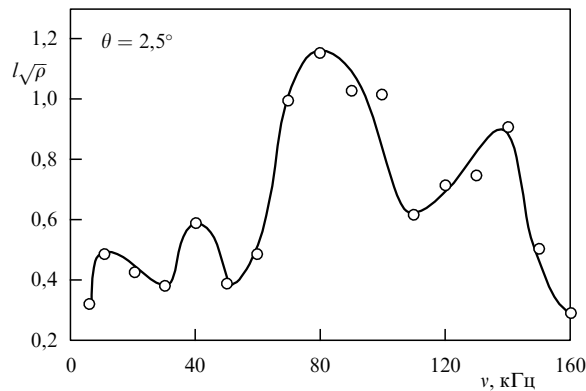


Рис. 6. Нормированный магнитно-резонансный спектр движения дислокаций в NaCl [13].

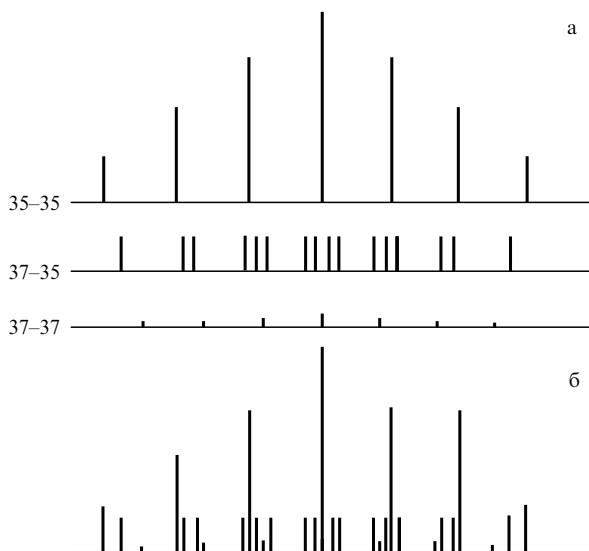


Рис. 5. Схема ЭПР-спектра радикала Cl_2^- как суперпозиция его 16 магнитно-изотопных резонансов: (а) три изотопные пары, (б) полный спектр.

аниону Cl^- [8], образуя новую спиновую пару ($Ca^+ Cl_2^-$); именно она является приёмником микроволн, именно она обеспечивает магнитопластичность. Изотопы ^{35}Cl (76 %) и ^{37}Cl (24 %) имеют близкие магнитные моменты (0,82 мВ и 0,68 мВ) и одинаковый спин 3/2. В радикале Cl_2^- имеется 16 электронно-ядерных резонансов ($(2I_{35} + 1)(2I_{37} + 1) = 16$), и он представлен в кристалле суперпозицией $(^{35}Cl^{35}Cl)^-$, $(^{35}Cl^{37}Cl)^-$ и $(^{37}Cl^{37}Cl)^-$ в относительных долях 9/16, 6/16 и 1/16 [8].

Электронно-ядерный микроволновый спектр (ЭПР-спектр) схематически представлен на рис. 5; он точно соответствует экспериментальному спектру ЭПР [8, 9], а расстояния между линиями ЭПР определяют изотропные константы сверхтонкого (СТВ) электронно-ядерного взаимодействия. Однако и g -фактор, и сверхтонкое взаимодействие B в радикале Cl_2^- сильно анизотропны и аксиально симметричны. Компоненты g -фактора имеют значения $g_{xx} = g_{yy} \approx 2,044$, $g_{zz} = 2,001$; компоненты СТВ также известны: $B_{xx} = B_{yy} = -25,8$ Гс, $B_{zz} = +51,7$ Гс [9].

В кристалле NaCl радикал Cl_2^- существует в разных положениях, так что его молекулярные оси имеют различные ориентации по отношению к кристаллографическим осям. Из-за анизотропии тензоров G и B радикал Cl_2^- обнаруживает множество электронно-ядерных резонансов. Часть их малоинтенсивна и не проявляется в спектрах дислокационных пробегов, но многие почти совпадают по частоте и их суперпозиция даёт суммарный вклад в ускорение дислокаций. Именно такие множественные резонансы наблюдались экспериментально в многочисленных и фундаментальных работах Альшица с сотрудниками (обзор этих работ см. в [1]).

Множественные резонансы наблюдались также в поле Земли; они попадают в радиочастотный диапазон ~ 1 МГц и сопровождаются ускорением дислокаций и снижением микротвёрдости кристаллов ZnO, LiF, триглицинсульфата и гидрофталата калия [10, 11]. Один из примеров множественных резонансов показан на рис. 6. При угле $\theta = 2,5^\circ$ между ребром a монокристалла NaCl и направлением магнитного поля Земли детектируется лишь четыре значимых резонанса; здесь линейный пробег дислокаций l нормирован к безразмерному пробегу $l\sqrt{\rho}$ (ρ — плотность дислокаций), т.е. к отношению длины пробега к среднему расстоянию между дислокациями. Часто наблюдается значительно большее число резонансов [12, 13]. Из низкочастотного резонанса оценено время жизни двухспиновой пары $\tau \approx 5 \times 10^{-7}$ с [1].

Резонансно-индуцированные крупномасштабные смещения дислокаций в NaCl обнаруживаются в режиме импульсной микроволновой накачки [13]: при импульсном резонансе в течение 0,5 мкс и амплитуде накачки 0,176 Гс дислокации смещаются на расстояние около 10^2 мкм. В том же кристалле в режиме стационарной накачки с амплитудой 0,025 Гс для перемещения дислокаций на такое расстояние требуется около 5 мин. Ясно, что импульс рождает взрывную, почти когерентную лавину бегущих дислокаций. Такой режим фактически обеспечивает истощение кристалла дислокациями. Отметим, что импульсное микроволновое облучение очага землетрясений также производит значимые эффекты (см. раздел 5).

Яркий эффект обнаружен также в кристаллах NaCl с ионами Eu^{2+} [14]. Здесь найдено семь резонансных частот, при которых происходит резкое уменьшение микротвёрдости кристалла (рис. 7); возможно, они возникают из-за того, что ядерный спин европия 5/2 про-

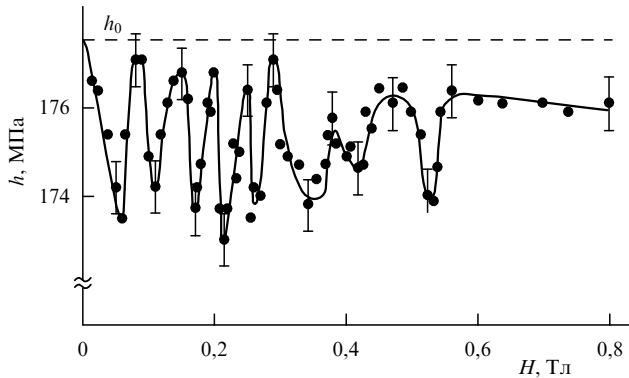


Рис. 7. Микротвёрдость кристалла $\text{NaCl}(\text{Eu}^{2+})$ как функция постоянного магнитного поля в условиях микроволновой накачки. Отчётливо видны 8 резонансных провалов в микротвёрдости. h_0 — микротвёрдость в нулевом поле (штриховая линия).

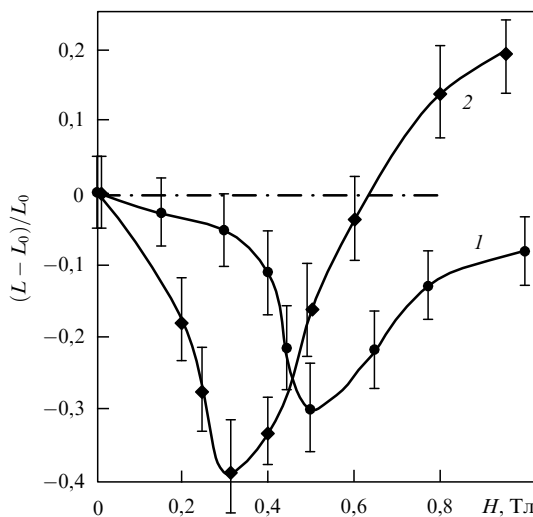


Рис. 8. Пробег дислокаций L в монокристалле кремния как функция магнитного поля в условиях микроволновой накачки. Магнитно-полевой эффект обнаруживает анизотропию зеемановского взаимодействия: кривая 1 относится к случаю, когда микроволновое поле направлено вдоль плоскости $[100]$, кривая 2 — вдоль $[011]$. L_0 — пробег дислокаций в отсутствие магнитного поля.

изводит сверхтонкое расщепление зеемановских уровней и "умножает" число электронно-спиновых резонансов. И здесь микроволновая накачка управляет спиновой эволюцией пар и через неё контролирует движение дислокаций и микротвёрдость.

3.2. Ковалентные кристаллы

В ковалентных кристаллах дислокация — это цепочка атомов с частично оборванными химическими связями, т.е. со свободными валентностями и неспаренными электронами на некоторых атомах цепочки (подробнее см. в работе [4]). При встрече дислокаций может создаваться спиновая пара в одном из четырёх спиновых состояний: S , T_0 , T_+ , T_- , каждое со статистическим весом $1/4$. В синглетном состоянии S происходит рекомбинация валентностей и дислокации останавливаются, сцепившись химической связью. Рекомбинация в триплетных состояниях T_+ и T_- запрещена по спину полнотью (если нет сверхтонкого взаимодействия), а для

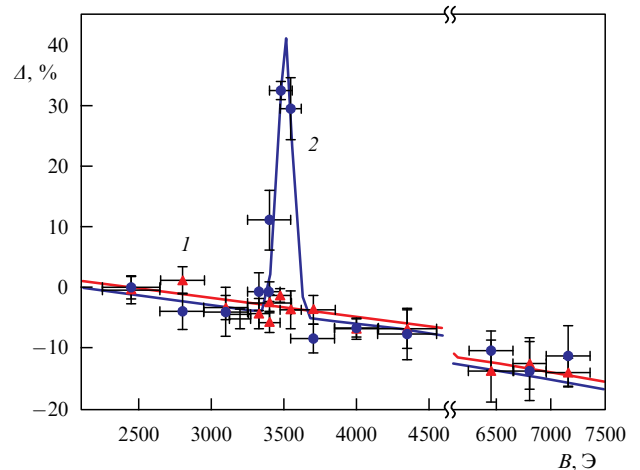


Рис. 9. (В цвете онлайн.) Изменение напряжения сдвига Δ как функция магнитного поля B . Кривая 1 показывает Δ в отсутствие микроволнового облучения, кривая 2 — в его присутствии. Резонансное увеличение Δ соответствует частоте ЭПР, закрепляющей дислокацию [16].

рекомбинации в состоянии T_0 требуется спиновая конверсия из T_0 в S (см. рис. 3). Микроволновое резонансное поле индуцирует переходы из T_+ и T_- в состояние T_0 (см. рис. 2), которое затем уходит в состояние S , где происходит рекомбинация дислокаций. Таким образом, спиновая конверсия в паре происходит в направлении, обратном тому, которое имеет место в ионных кристаллах. Микроволновое поле стимулирует зацепление, иммобилизацию дислокаций, т.е. индуцирует дислокационное упрочнение ковалентно-атомных кристаллов.

Такое упрочнение в кремнии наблюдалось в работах [15, 16]; сокращение пробега дислокаций, индуцированное микроволновым полем, достигает 30–40 % и имеет резонансный характер (рис. 8).

Прочное связывание дислокаций в кремнии микроволновым облучением надёжно подтверждается значительным увеличением напряжения, необходимого для того, чтобы сдвинуть закреплённую дислокацию [17]. Рисунок 9 ярко демонстрирует, что при частоте ЭПР дислокация закрепляется и для её освобождения требуется значительное добавочное сдвиговое напряжение.

4. Микроволновый приём: нерезонансные частоты

Множественные резонансы надёжно доказывают и двухспиновые пары, и всю физику магнитопластичности. Надо, однако, осознать, что резонансные эффекты — лишь способ исследования и понимания физики дислокаций; даже множество резонансов вряд ли обеспечивает значительное перемещение дислокаций и макроскопическое преобразование упругой энергии в пластическое течение. Для этой цели гораздо эффективнее служат нерезонансные поля.

Частота прецессии электронного спина первого партнёра спиновой пары определяется уравнением

$$\omega_1 = g_1 \beta H + \sum a_i m_i. \quad (1)$$

Здесь первый член в правой части характеризует вклад зеемановского взаимодействия в прецессию, второй —

вклад сверхтонкого взаимодействия; a_i — константы сверхтонкого взаимодействия, m_i — проекции спинов магнитных ядер первого партнёра; сумма берётся по всем i ядрам. Частота прецессии электронного спина второго партнёра с ядрами j определяется аналогичным уравнением:

$$\omega_2 = g_2\beta H + \sum a_j m_j. \quad (2)$$

Спиновая конверсия происходит за счёт прецессии электронов пары; разность частот прецессии $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ создаёт расфазирование спинов, т.е. спиновую конверсию:

$$\Delta\omega = [(g_1 - g_2)\beta H] + \left(\sum a_i m_i - \sum a_j m_j \right). \quad (3)$$

Время изменения спина в электронно-спиновой паре, т.е. время τ_S спиновой конверсии — это время полного расфазирования (разворот спинов пары на угол π); оно определяется соотношением

$$\tau_S = \left\{ [(g_1 - g_2)\beta H] + \left(\sum a_i m_i - \sum a_j m_j \right) \right\}^{-1}. \quad (4)$$

Полная и наглядная схема спиновой конверсии изображена на рис. 10. Спиновая конверсия T_0-S производится обоими взаимодействиями — и зеемановским, и сверхтонким, но переходы T_+-S и T_--S стимулируются только сверхтонким взаимодействием; в этом случае электрон и ядро обмениваются угловыми моментами, совершая совместную прецессию, показанную пунктиром на рис. 10б, в.

Влияние микроволнового, осциллирующего магнитного поля на электронные спины пары зависит от частоты этого поля ω , т.е. от периода осцилляций $\tau_0 = \omega^{-1}$. Низкочастотные поля (такие что $\tau_0 > \tau_S$) вызывают только расфазирование спинов; они действуют как

постоянные поля, потому что период осцилляции поля гораздо длиннее, чем время спиновой $S-T$ конверсии. Другими словами, электронно-спиновая пара "видит" любое низкочастотное поле, осциллирующее с частотой $\tau_0^{-1} < \tau_S^{-1}$, как постоянное, которое производит конверсию $S-T$ через расфазирование.

На резонансных частотах, когда частота осциллирующего поля совпадает с зеемановской частотой, конверсия $S-T$ происходит через переворот (переориентацию) спинов. Плотность таких резонансных полей мала даже в условиях множественных резонансов (они обсуждались в разделе 3), поэтому влиянием резонансных полей можно уверенно пренебречь (за исключением экзотических случаев, когда частоты специально настраиваются в резонанс). Практически это означает, что все осциллирующие магнитные поля с частотами меньше ≈ 100 МГц можно считать постоянными по отношению к короткоживущему приёмнику — электронно-спиновой паре. Магнитные поля, осциллирующие с частотами выше 100 МГц (если они нерезонансные), неэффективны, потому что медленная спиновая система слабо реагирует на высокочастотные колебания.

5. Магнитно-сейсмическая физика очага землетрясений

Теперь обратимся к интригующему вопросу: можно ли перенести физику магнитоупругости — и в постоянных, и в переменных полях — на физику землетрясений? Другими словами, можно ли магнитный контроль дислокаций использовать как средство сброса упругих напряжений в очаге землетрясений, как средство избежать катастрофы, преобразовав крупномagnitude землетрясение в мелкое, маломagnitude? Ответ на этот вопрос нужно искать в корреляциях явлений магнитного и сейсмического происхождения, в их совпадениях или несовпадениях; другого пути просто нет. В случае совпадений такой поиск даёт смысл поставленному выше вопросу; несовпадения дают основание этот вопрос игнорировать.

Поиск корреляций можно вести двумя различными путями, и это делает его заслуживающим доверия. Во-первых, речь пойдёт о связи землетрясений с магнитными возмущениями — естественными (магнитные бури) и искусственными (электромагнитное облучение очага разрядами магнитогидродинамического генератора); во-вторых, будет дан анализ влияния электромагнитных полей на величину и скорость сейсмотектонических деформаций.

Сразу укажем, что магнитный контроль работает на атомно-молекулярном уровне (рождение и движение дислокаций). Он стимулирует сброс упругой энергии, т.е. стимулирует то, что предшествует разрушению. Его предназначение — исключить или предотвратить разрушение. Образование микротрещин, их объединение и макроскопическое разрушение — это процессы, не подверженные магнитному влиянию.

Следует заметить, что известны два типа магнитных явлений в сейсмических процессах: одни предшествуют землетрясениям — стимулируют или подавляют их, другие сопровождают землетрясения как их следствия. Первые разумно назвать магнитно-сейсмическими (именно им посвящена данная статья), другие можно именовать как сейсмо-магнитные явления. Последние возникают

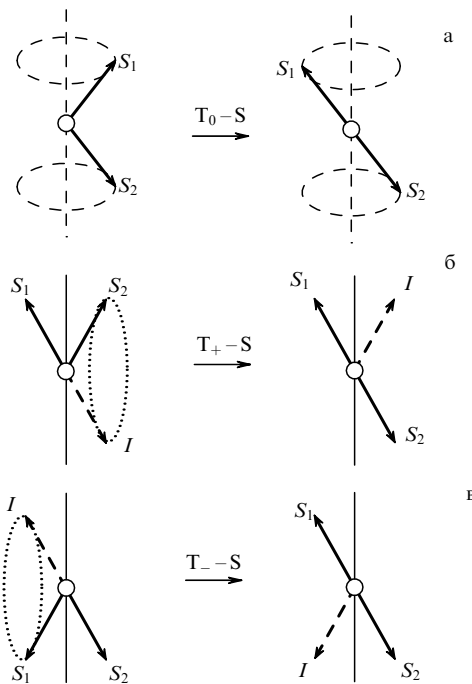


Рис. 10. Векторное представление конверсии T_0-S (а), T_+-S (б) и T_--S (в). S_1 и S_2 — электронные спины партнёров, I — ядерный спин.

как отражение, следствие процессов разрушения: образование трещин и генерация электромагнитной эмиссии при электрическом разряде между их берегами.

5.1. Магнитные возмущения и землетрясения

Блестящий анализ этих двух событий (магнитного возмущения и землетрясения) выполнен в работе [17]. Возмущением избраны магнитные бури (1973–2010 гг.); момент начала бури принят за нулевой отсчёт времени, затем определялось число крупно-магнитудных землетрясений ($M \geq 5$), имевших место за 60 мин до внезапного начала бури и через 60 мин после её начала (рис. 11). Если бы эти события были независимы, то 405 анализируемых землетрясений должны были быть распределены почти поровну. Это ожидание не подтверждается: до бури произошло 230 землетрясений, после неё — только 173. Отсюда следует заключение, что частота сильных ($M \geq 5$) землетрясений снижается после бури более чем на 30 %, т.е. очаги частично сбрасывают свою упругую энергию. Это снижение на 30 % означает, что магнитная буря ликвидирует каждое третье крупномagnitude землетрясение, преобразуя его в маломagnitude. На рисунке 11 жирная горизонтальная линия проведена для землетрясений с $M = 6,6$; видно, что до бури было 8 землетрясений с $M > 6,6$, а после неё — только 2. Рисунок 12 показывает, как частота крупных землетрясений уменьшается после бури, а распределение частот смещается в сторону их снижения. Авторы работы [17] делают статистически надёжный вывод: магнитное возмущение в виде бурь подавляет крупные землетрясения; как увидим далее, здесь ключевое слово — крупные. Эффекты магнитных бурь обсуждались также в статье [18].

Искусственные магнитные возмущения от МГД-генератора, как показал обширный многолетний эксперимент, также доказывают связь магнитных и сейсмических явлений [19–21]. Так, анализ числа землетрясений до МГД-импульса за 30 суток (m) и после импульса тоже за 30 суток (n) показал, что $m/n > 1$ (около 1,15–1,45) для крупномagnitude землетрясений, но $m/n < 1$ (около 0,8–0,9) для слабых землетрясений [19].

Общий итог множественных наблюдений магнитно-сейсмических корреляций (независимо от магнитного возмущения, природного или искусственного) однозначен: магнитные возмущения подавляют крупномagnitude землетрясения, но стимулируют, индуцируют слабые, низкомagnitude; частота первых уменьшается, частота вторых возрастает. Есть ещё загадочное

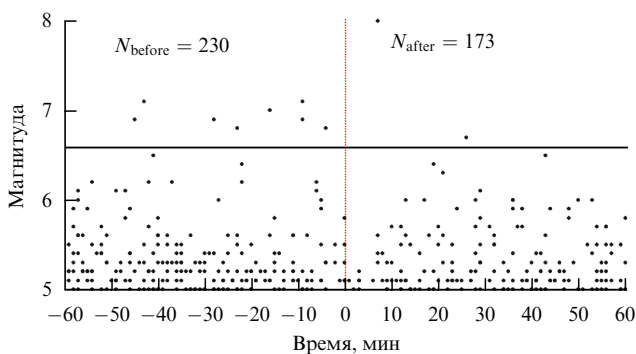


Рис. 11. Землетрясения с магнитудами $M \geq 5$ на интервалах времени ± 60 мин относительно момента начала бури ($t = 0$).

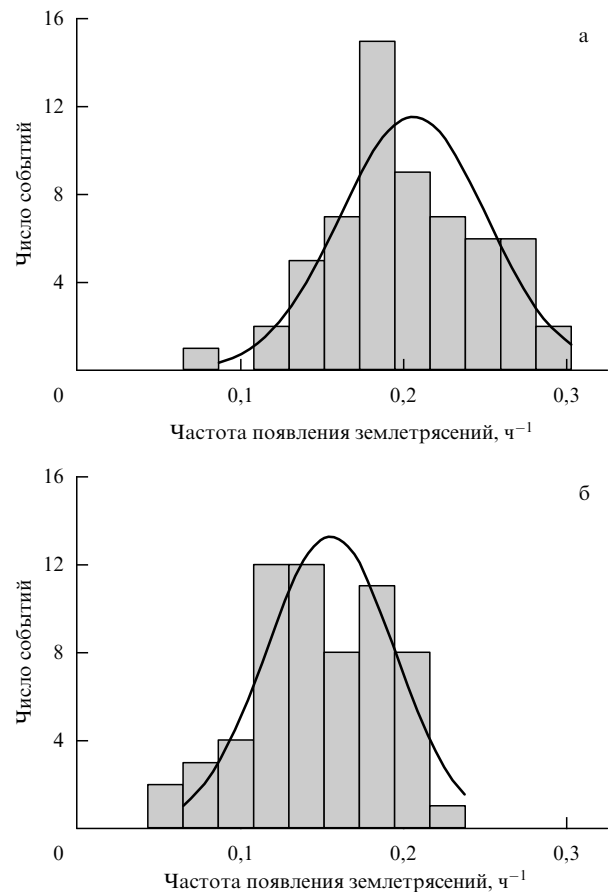


Рис. 12. Распределение землетрясений по частоте появления в часовых интервалах до магнитной бури (а) и после неё (б). Гладкие кривые — нормальные распределения, аппроксимирующие наблюдаемые землетрясения.

свойство: запаздывание сейсмического ответа на электромагнитный сигнал на 5–6 суток [20].

На первый взгляд, эти эффекты кажутся интригующе противоречивыми. Общепринято рассматривать их как два независимых явления, и эта точка зрения делает их необъяснимыми. Но это не два явления, это единое явление: подавление крупномagnitude сейсмического события означает его преобразование в слабое, маломagnitude. Рост числа слабых землетрясений является прямым следствием уменьшения числа крупных землетрясений. Такая синхронность подавления сильных землетрясений и стимулирования слабых — свидетельство того, что магнитные возмущения стимулируют частичный сброс упругой энергии, пленённой в очаге землетрясения, снижая её запас и понижая магнитуду опасных землетрясений. Конечно, землетрясение нельзя ликвидировать, его можно лишь преобразовать в слабое и менее опасное.

5.2. Магнитные возмущения и сеймотектонические деформации

Стимулирование слабых землетрясений за счёт ликвидации напряжённых очагов должно неизбежно обнаруживаться в сеймотектонических деформациях. Действительно, в блестящих работах Тарасова с сотрудниками [21–24] этот прогноз надёжно подтверждён прямыми измерениями деформаций при облучении очагов землетрясений импульсами МГД-генератора. И в Гармском

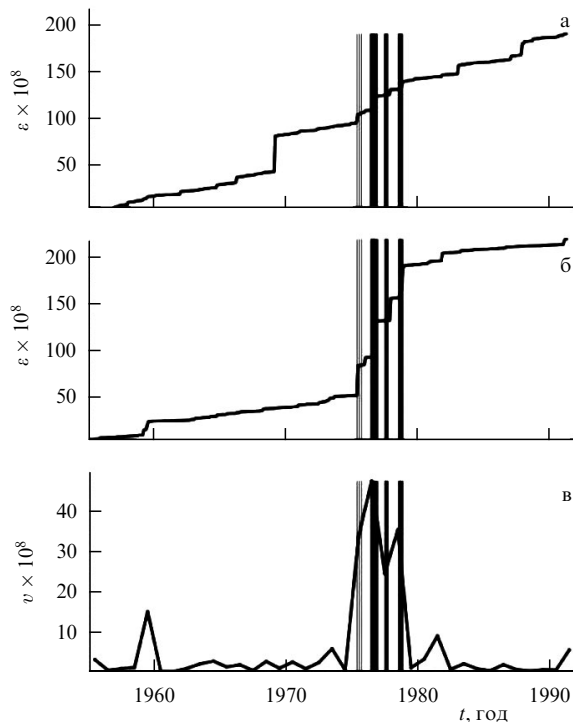


Рис. 13. Тектонические деформации ε Гармского района (а) и его верхнего слоя (б) до обработки электромагнитными импульсами МГД-генераторов (моменты импульсов показаны вертикальными линиями) и после неё. На рисунке в показана скорость деформации v ; она максимальна в моменты импульсов.

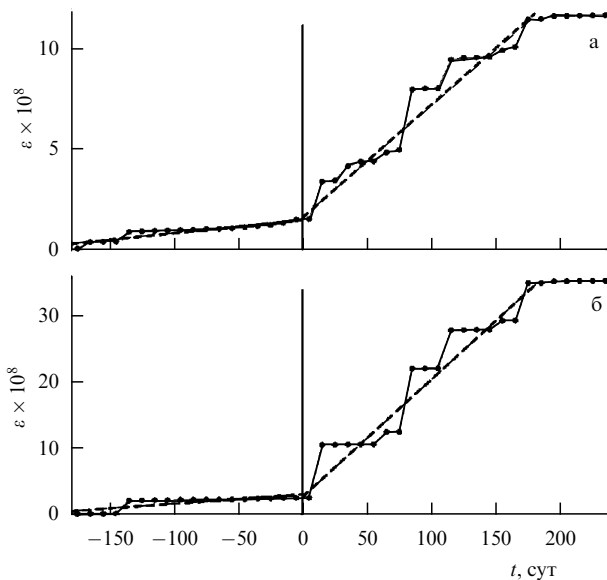


Рис. 14. Тектонические деформации ε Гармского района (а) и его верхнего слоя (б) до обработки электромагнитными импульсами МГД-генераторов ($t < 0$) и после неё ($t > 0$). Момент импульсов соответствует $t = 0$.

районе Таджикистана (1975–1978 гг., 34 запуска МГД-генератора), и в северном Тянь-Шане вблизи Бишкека (1983–1990 гг., 113 запусков) средние скорости деформирования возрастали в 10–20 раз. Рисунки 13 и 14 наглядно демонстрируют этот эффект: и деформации $\varepsilon(t)$, и их скорости $v(t)$ в периоды воздействия электромагнитных полей МГД-генераторов резко возрастают.

Фактически эти наблюдения являются свидетельством медленной пластической деформации очага, стимулированной магнитными импульсами.

Так, в Гарме скорость деформации до импульсов составляла 2,42 (в общепринятых условных единицах), а в режиме импульсов она была почти в 20 раз выше (38,8) [23]. Замечено также, что скорость деформации после импульсов ниже, чем до импульсов; этот эффект разумно объясняется тем, что интенсивный сброс упругой энергии, стимулированный импульсами, истощает очаг избыточной упругой энергии.

5.3. Физическая механика дислокаций в очаге

Магнитно-стимулированное высвобождение упругой энергии очага происходит через дислокации; это явление было бы бесспорным, если бы очаг был монокристаллом [25]. Но он неоднороден и по химическому составу, и по структурной морфологии. Множественные неоднородности создают множественные поверхности — интерфейсы между микрокристаллами, между областями с разной плотностью, сжимаемостью, модулем сдвига. Скольжение по этим плоскостям могло бы быть универсальным механизмом освобождения упругой энергии; в рамках этого механизма землетрясения не должно быть. Ясно, что этот макроскопический механизм работает слабо, вероятно, из-за сильного трения между поверхностями скольжения в сильно сжатом очаге. Отсюда появляется необходимость принять гипотезу, что упругая энергия запасается на атомно-молекулярном уровне и высвобождается в пластическом течении через движение дислокаций.

Тогда ключевой вопрос в понимании магнитно-сейсмических эффектов — это механика дислокаций на интерфейсах. Дислокация на интерфейсе (например, кристаллов NaCl и CaO) может произвести два эффекта: эстафетную передачу и локальное микроскольжение. Выходя (например, из NaCl) в интерфейс, дислокация не может его преодолеть из-за несовместимости атомных структур контактирующих кристаллов и несоответствия их атомных потенциалов. Однако именно по этой же причине дислокация из NaCl может инициировать дислокацию в CaO; это явление можно рассматривать как эстафету дислокаций. Возможен и другой эффект: изменение потенциалов может инициировать микроскопический сдвиг, микроскольжение вдоль интерфейса, которые могут суммироваться, производя локальные микросдвиги вдоль поверхности скольжения. Возможно, по причине микроскольжения имеется запаздывание между электромагнитным импульсом и сейсмическим ответом (см. выше).

Любые касательные напряжения в интерфейсах неизбежно создают сдвиговые деформации и рождают новые дислокации, обеспечивая их эстафету. Можно полагать, что очаг насыщен пленёнными, "спящими" дислокациями: микроволновое магнитное поле индуцирует их "пробуждение", стимулируя их движение и снижая запас упругой энергии. В рамках этих представлений все рассмотренные выше магнитно-сейсмические эффекты приобретают физически осмысленное объяснение.

6. Заключение

Магнитопластичность кристаллов, индуцированная микроволновыми полями, — замечательное явление,

открывающее путь к управлению механикой твёрдых тел магнитными взаимодействиями. Особую значимость имеет механика очага землетрясения; высокая корреляция в ряду магнитно-сейсмических событий указывает, что микроволновый магнитный контроль очага землетрясения можно осуществлять искусственно, обеспечивая частичное высвобождение упругой энергии очага и преобразуя опасное, высокомагнитудное землетрясение в ослабленное, маломagnitude.

Автор благодарен В.И. Альшицу, В.В. Кведеру, Н.Т. Тарасову и А.В. Гульельми за критические комментарии и вдохновляющие дискуссии, а также Российскому научному фонду за финансовую поддержку (грант 14-23-00018). Приняты с благодарностью и учтены критические комментарии трёх анонимных рецензентов.

Список литературы

1. Альшиц В И и др. *УФН* **187** 327 (2017); Alshits V I et al. *Phys. Usp.* **60** 305 (2017)
2. Моргунов Р Б *УФН* **174** 131 (2004); Morgunov R B *Phys. Usp.* **47** 131 (2004)
3. Бучаченко А Л *ЖЭТФ* **129** 909 (2006); Buchachenko A L *JETP* **102** 795 (2006)
4. Бучаченко А Л *ЖЭТФ* **132** 673 (2007); Buchachenko A L *JETP* **105** 593 (2007)
5. Бучаченко А Л *ЖЭТФ* **132** 827 (2007); Buchachenko A L *JETP* **105** 722 (2007)
6. Головин Ю И и др. *Письма в ЖЭТФ* **68** 400 (1998); Golovin Yu I et al. *JETP Lett.* **68** 426 (1998)
7. Головин Ю И, Моргунов Р Б, Шмурак С З *Докл. РАН* **361** 352 (1998); Golovin Yu I, Morgunov R B, Shmurak S Z *Phys. Dokl.* **43** 340 (1998)
8. Castner T G, Känzig W *J. Phys. Chem. Solids* **3** 178 (1957)
9. Atkins P W, Symons M C R *The Structure of Inorganic Radicals. An Application of Electron Spin Resonance to the Study of Molecular Structure* (Amsterdam: Elsevier, 1967); Пер. на русск. яз.: Эткинс П, Саймонс М *Спектры ЭПР и строение неорганических радикалов* (М.: Мир, 1970)
10. Альшиц В И и др. *ФТТ* **55** 2176 (2013); Alshits V I et al. *Phys. Solid State* **55** 2289 (2013)
11. Альшиц В И и др. *ФТТ* **54** 305 (2012); Alshits V I et al. *Phys. Solid State* **54** 324 (2012)
12. Альшиц В И и др. *Письма в ЖЭТФ* **98** 33 (2013); Alshits V I et al. *JETP Lett.* **98** 28 (2013)
13. Альшиц В И и др. *Письма в ЖЭТФ* **104** 362 (2016); Alshits V I et al. *JETP Lett.* **104** 353 (2016)
14. Golovin Yu, Morgunov R, Baskakov A *Mol. Phys.* **100** 1291 (2002)
15. Осипьян Ю А и др. *Письма в ЖЭТФ* **79** 158 (2004); Osip'yan Yu A et al. *JETP Lett.* **79** 126 (2004)
16. Badylevich M V et al. *Phys. Status Solidi C* **2** 1869 (2005)
17. Гульельми А В, Лавров И П, Собисевич А Л *Солнечно-земная физика* **1** 98 (2015)
18. Закржевская Н А, Соболев Г А *Физика Земли* (4) 3 (2002)
19. Савин М Г, Смагин С И *Вестн. Дальневосточного отд. РАН* (2) 129 (2009)
20. Тарасов Н Т *Докл. РАН* **353** 542 (1997)
21. Тарасов Н Т, Тарасова Н В *Физика Земли* (10) 82 (2011); Tarasov N T, Tarasova N V *Izv. Phys. Solid Earth* **47** 937 (2011)
22. Тарасов Н Т *Докл. РАН* **433** 689 (2010); Tarasov N T *Dokl. Earth Sci.* **433** 1088 (2010)
23. Тарасов Н Т и др. *Вулканонология и сейсмология* (5) 152 (1999)
24. Tarasov N T, Tarasova N V *Ann. Geophys.* **47** 199 (2004)
25. Бучаченко А Л *УФН* **184** 101 (2014); Buchachenko A L *Phys. Usp.* **57** 92 (2014)

Microwave stimulation of dislocations and the magnetic control of the earthquake core

A.L. Buchachenko

Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, ul. Kosygina 4, 119991 Moscow, Russian Federation;
Institute of Problems of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences,
ul. Akademika Semenova 1, 142432 Chernogolovka, Moscow region, Russian Federation;
Scientific Center Chernogolovka, ul. Lesnaya 9, 142432 Chernogolovka, Moscow region, Russian Federation;
Lomonosov Moscow State University, Leninskie gory 1, 119991 Moscow, Russian Federation;
P.G. Demidov Yaroslavl State University, ul. Sovetskaya 14, 150003 Yaroslavl, Russian Federation
E-mail: abuchach@chph.ras.ru, alb9397128@yandex.ru

Microwave irradiation transforms elasticity of solids into plasticity by controlling the dislocation mobility via magnetic interactions in the electron spin pairs on the dislocations. In ionic crystals microwaves cause dislocations to accelerate and increase their mean free path, thus leading to a release of elastic energy; in covalent crystals, microwaves keep dislocations in place, thereby accumulating elastic energy and increasing the crystal strength. Microwave pumping at resonant Zeeman frequencies (in the magnetic resonance regime) is a firm evidence for the physics of electron spin pairs and for the magneto-plasticity phenomenon itself. However, the dominant contribution to the macroscopic transformation of elastic energy into plastic flow comes from nonresonant microwaves. It is these that can be used to control the mechanics of diamagnetic solids including, importantly, the earthquake core. The observed correlation between magnetic events (such as magnetic storms and hydrodynamically generated high power magnetic pulses) and their seismic and tectonic consequences (earthquake frequency and magnitude and deformations) indicates unambiguously that controlling the earthquake core magnetically provides a realistic means for preventing a catastrophe by transforming large magnitude earthquakes into weak, low magnitude events.

Keywords: magnetoplasticity, dislocation, magnetic effects, earthquakes, microwave stimulation, magnetic control of the earthquake

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

Bibliography — 25 references

Received 19 December 2017, revised 20 February 2018

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **189** (1) 47–54 (2019)

Physics–Uspekhi **62** (1) (2019)

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.03.038301>

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.03.038301>