

УДК: 550.343; 534.222

**Е.М. Кудрявцев, Е.Ф. Макляев, С.Д. Зотов**

**МЕДЛЕННЫЕ УЕДИНЁННЫЕ УПРУГИЕ ВОЛНЫ  
КАК ВОЗМОЖНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ГИПОТЕТИЧЕСКИХ  
D-ВОЛН Ш.А. ГУБЕРМАНА, ОБУСЛАВЛИВАЮЩИХ  
ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ЕГО МОДЕЛИ**

*Обнаруженные в ФИАНе медленные уединённые упругие волны (МУУВ) рассмотрены как аналог гипотетических D-волн Губермана, провоцирующих сильнейшие землетрясения в его модели. Если наше предположение и модель Губермана верны, необходимо изучение МУУВ в геологических средах как возможного агента, инициирующего разрушения в критически напряжённых структурах.*

*Ключевые слова: магнитуда, цепочки землетрясений, кристаллический кварц, плавленый кварц, природный опал.*

**Х**орошо известны многообразные медленные (по сравнению, например, со скоростью звука) уединённые волны в природных средах, вызванные разными причинами: волна Рассела в узком канале после резкого торможения судна, цунами в океанах от землетрясений, циклоны и торнадо в атмосфере, приливные волны в морях и на материках от притяжения Луны и Солнца, связанные с вращением Земли и т.п.

Однако, указанные волны, из-за различия в скоростях, не могут служить прототипом гипотетических D-волн в литосфере, с воздействием которых в качестве спускового механизма связаны сильнейшие землетрясения в модели, предложенной Ш.А. Губерманом в 1975 г. [1]. С другой стороны, обнаруженные недавно (1992) в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН в лабораторных условиях в разных конденсированных средах долгоживущие медленные уединённые упругие волны (МУУВ) с дискретными скоростями, лежащими в очень широком

диапазоне [2, 3], могут быть рассмотрены как возможный реальный аналог-прототип указанных гипотетических D-волн. Т. к. по существенным свойствам указанные волны схожи, то аналогичные процессы могут возникать **и при локальных техногенных воздействиях на геологическую среду**, для контроля состояния которой становится необходимым изучение этих волн.

Свойства МУУВ как последовательности из многих волн (импульсов) с дискретными скоростями, достаточно подробно изложены в предыдущей работе этого сборника [3].

**Для МУУВ в разных твердых и жидких средах** (импульсно возбуждаемых в опытах при локальном подведении к поверхности образца энергии с плотностью порядка  $100 \text{ Дж/см}^2$ ) характерны следующие общие черты:

- устойчивая форма волны типа солитона в виде однополярного (одногорбого) импульса сжатия или разрежения, наблюдаемая для каждого из импульсов МУУВ;

- *изменение длительности импульса в широких пределах* (от микросекунд до минут и более (в зависимости от скорости));

- *дискретный спектр наблюдаемых скоростей  $U_i$* , (где  $i = 0, 1, 2, 3, \dots$ ) в большом диапазоне — от км/с до микрон/с (от скорости  $U_0$ , равной скорости продольной звуковой волны  $v_l$ , до величин, во много раз меньших  $U_0$ );

- *возможность* (при некоторой конкретной схеме возбуждения и регистрации) *одновременного наблюдения* в избранном поддиапазоне скоростей *нескольких* совместно возбужденных волн (компонентов одной серии МУУВ), отношение скоростей которых  $U_i/U_{i+n}$  близко к  $2^n$ , где  $n = 1, 2, 3, \dots$ ;

- *малое затухание* и относительно *большая дальность распространения* (например, более десятков метров в кварцевом волокне);

- *способность отражаться от границ* образца с малыми изменениями параметров волны (десятки отражений);

- *«долгоживучесть»* при малых скоростях и амплитудах (до нескольких часов и более);

- *способность воздействия на самые разные датчики для измерения:* давления, температуры, проводимости, изменения отражения или преломления света и др. с генерацией регистрируемых сигналов.

### **Суть гипотезы Ш. А. Губермана о D-волнах.**

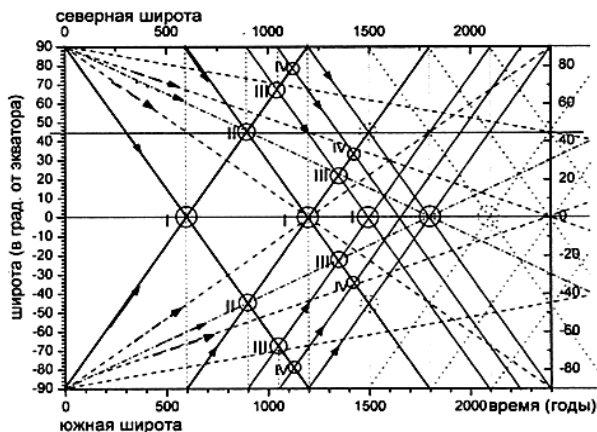
1. О задаче прогнозирования землетрясений. С ростом населения Земли и его плотности всё больший ущерб общество испытывает от различных природных катаклизмов и техногенных аварий, также часто связанных с *воздействиями окружающей среды*. Наиболее катастрофичны по числу человеческих жертв и масштабам разрушений сильные землетрясения с магнитудой  $M=6$  и более. (Магнитуда логарифмически зависит от суммарной энергии

*излученных сейсмических волн.*) Поэтому всё более важными и срочными задачами становятся выяснение механизмов возникновения и развития этих явлений, а также разработка методов их надежного прогнозирования.

По современным представлениям тепловые конвективные процессы в слое магмы, а также гравитационные воздействия Солнца и Луны с учетом вращения Земли, приводят к относительному смещению крупных блоков литосферы. Это вызывает в них механические напряжения и постепенное накопление в их объеме энергии упругой деформации, которая затем может импульсно выделяться в очагах землетрясений за счет быстрого волнового переноса её в зону начинающихся разрушений. Собрано достаточно много геофизических данных, указывающих на волновой характер также и медленных движений, возникающих при тектонических процессах. Для интерпретации накопленного массива наблюдений разными авторами разработан ряд моделей, в которых показана возможность существования *уединенных волн напряжений*, распространяющихся вдоль литосферной плиты со скоростями  $0,1 — 1000$  км/год ( $3$  мкм/с —  $3$  см/с) при амплитуде деформации порядка  $10^{-6} — 10^{-5}$  [4].

Целью данной работы, как уже указано выше, является обсуждение возможного наличия в земной коре и горных породах *долгоживущих очень медленных уединенных упругих волн (МУУВ) и их предполагаемой роли в provoшировании* мощных кратковременных деструктивных процессов, таких как *землетрясения, горные удары, обрушения, оползни и т. п.*

2. Гипотеза Ш.А. Губермана. В качестве примера рассмотрим приведенную в обзоре [4] модель D-волн [1,8-12]. В ряде работ [5-7] были выявлены



**Рис. 1. Схема D-волн Ш.А. Губермана [11] с добавлением траекторий МУУВ**

цепочки землетрясений, монотонно смещающихся вдоль разломов земной коры (границ литосферных блоков) со своей примерно постоянной в каждой цепочке скоростью от 20 до 100 км/год. Анализ широтно-временного распределения очагов самых мощных сейсмических катастроф, проведенный сотрудником ИПМ им. М.В. Келдыша Ш.А. Губерманом с учётом данных о цепочках землетрясений, показал, что в ряде разломов проекция этой скорости на направление меридиана, т. е. локальная скорость изменения широты сильных землетрясений на разных материках оказалась практически одинаковой — около 16,6 км/год или 15 градусов широты за 100 лет. Это позволило ему предположить, что спусковым механизмом землетрясения служит приход в зону, где напряжения приблизились к пределу прочности пород, некоего возмущения в виде общего для планеты широтного кольца, распространяющегося вдоль земной коры в виде медленной уединенной волны, названной им D-волной [1]. Её фронт в каждый момент времени располагается на определенной параллели, смещаясь без существенного затухания вдоль ме-

ридиана со скоростью  $0,15^\circ$  в год (0,53 мм/с). Дальнейший анализ показал, что этих волн — две, и движутся они от полюсов к экватору. В качестве причины их образования он допустил (с приведением доказательств), что две мощные D-волны могут одновременно порождаться на полюсах Земли в моменты сильнейших землетрясений из-за изменения скорости вращения Земли (от смещения больших масс). Таким образом, он замкнул в единый цикл в своей модели процессы, формирую-

щие систему D-волн (единую для Земли), с инициирующими воздействиями последних на потенциальные очаги разрушений [8-10]. На рис. 1 представлена принципиальная схема D-волн Ш. А. Губермана, взятая нами из популярной статьи [11] и поясняющая саму идею его гипотезы (образование на этом рисунке первой пары D-волн на полюсах в момент, соответствующий началу координат, никак не связано с реальными землетрясениями).

Схема на рис. 1 представляет собой так называемую (x-t)-диаграмму, которая используется (в том числе в работах, перечисленных в [2, 3]), для отображения волновых процессов в образце исследуемого вещества. В данном случае, у Ш.А. Губермана, «образцом» является кора Земли. Синхронное перемещение пары D-волн вдоль некоторого меридиана от полюсов к экватору отображается на рис. 1 движением слева направо по двум сплошным наклонным прямым (пересекающимся на нулевой широте) двух точек, расположенных на одной вертикали, которые в каждый момент времени (на оси абсцисс) определяют широты положения волн на меридиане (на оси орди-

нат). Модуль тангенса угла наклона этих прямых к оси абсцисс определяет скорость волн (в случае модели Ш.А. Губермана — она постоянная,  $0,15^\circ$  в год или 16,6 км/год).

В случае, если бы роль D-волн играли волны типа МУУВ, то согласно их свойствам, — из полюсов выходили бы, по крайней мере, несколько пар компонентов. При этом, если скорость первой пары компонентов близка к 16,6 км/год (что вполне допустимо, см. ниже), то они совпадают с первой парой (жирные прямые) на схеме Губермана, рис. 1. Скорости последующих отличаются, для каждой пары, примерно, вдвое. На рис. 1 — это 3 пары штриховых линий, которых нет на схеме Губермана.

Полыми кружками уменьшающегося радиуса с увеличивающимися римскими числами, обозначающими порядок пересечения от I до IV (более высокого порядка пересечения — не учитываются), на схеме рис 1 показаны пересечения траекторий D-волн [11], которые могут с некоторой вероятностью привести к возникновению мощного землетрясения в потенциальном очаге где-то на протяжении данной широты. (Для уточнения этих областей автор модели вводит на D-широтах соответствующие D-центры аналогичных порядков). Каждому такому кружку, если на его широте произошло в этот момент мощное землетрясение, соответствует момент образования новой пары D-волн на обоих полюсах и начало их движения к экватору и далее, — сплошные тонкие линии, — с одинаковой скоростью, указанной выше (16,6 км/год).

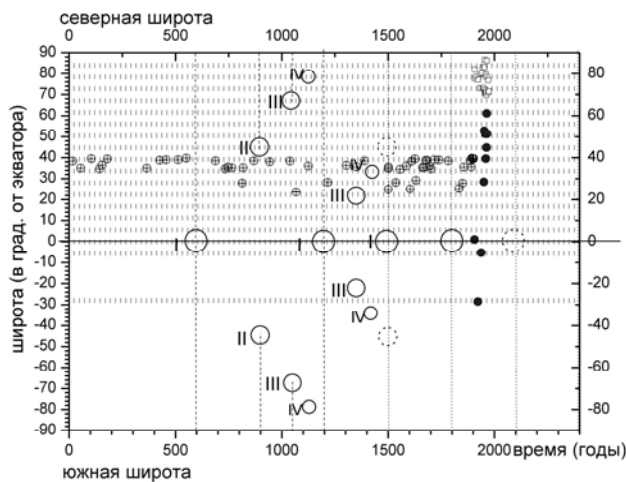
На схеме рис. 1 показана только часть первых пар D-волн. Полное число таких волн уточнялось автором гипотезы позднее [11] и на 01.01.1900 г он установил их число как 21 волну,двигающуюся к северному, и столько же волн,двигающихся к южному полю-

су. Интересно, что представленные штриховыми линиями траектории МУУВ проходят *через* многие отмеченные полыми кружками на схеме рис. 1 пересечения D-волн (или *вблизи* от них). Особенно много пересечений с кружками у одной пары траекторий, обозначенных штрих-пунктирными линиями. Однако, скорости этой пары волн отличаются не в 2, а в 1,5 раза (что требует дальнейших выяснений).

3. Дискретный характер широт, подверженных землетрясениям. Одним из явных следствий гипотезы Губермана является дискретный характер широтных областей, в которых происходят пересечения разных порядков траекторий D-волн (как это видно на схеме рис. 1), и, соответственно, в которых происходят сильнейшие землетрясения. Для наглядности, на рис. 2 с той же сеткой координат, что и для рис. 1, мы привели выделенные штриховкой указанные дискретные области по широте (в работах Ш.А. Губермана эти данные приведены в виде таблиц). Их ширина составляет  $\pm 1$  градус, а положение  $Z_m$  определяется как [9]  $Z_m = 5,6m$ , где  $0 < m < 16$ , так что  $Z_m = 0; 5,6^0; 11,25^0; \dots$

Из этой же работы Ш. А. Губермана [9] на рис. 2 приводятся экспериментальные точки, соответствующие зарегистрированным землетрясениям.

Сплошными кружками отмечены сильнейшие землетрясения 20-го века; кружками с крестом — известные менее точно аналогичные землетрясения за всю историю человечества; квадратами — приполярные землетрясения 20-го века. Как видно, все они достаточно хорошо укладываются на обозначенных дискретных широтных областях, что подтверждает рассматриваемую гипотезу. (Образование многих полезных ископаемых связано с теми же дискретными D — широтами, как установлено в 10)).



**Рис. 2. Дискретные D-широты Губермана**

4. Прогноз землетрясений. Ш. А. Губерман не ограничился лишь статистической проверкой соответствия своей модели известным за всю историю наблюдений данным о мощных землетрясениях. Разработанный им на основе описанного выше подхода с учетом еще ряда существенных обстоятельств, *прогноз сильных землетрясений на 10 лет вперед для 17 сейсмоопасных регионов планеты (D-центров) оказался весьма эффективным.* Из 12 сильных землетрясений за период с 1978 г. по 1987 г. — 10 совпали с предсказанными регионами и датами (с отклонениями менее полугода) [12], подтверждая *важную роль представлений о медленных уединённых волнах в описании природных явлений.*

При этом у автора гипотезы, как он пишет, «...никаких доказательств реальности этих волн ... пока нет...» [1]. Возвращаясь к схеме рис.1, можно предположить, что в районе полюсов Земли при сильнейших сейсмических толчках образуются не гипотетические D-волны, а реальные мощные серии МУУВ, первая пара компонентов которых имеет ту же скорость (16,6 км/год) и ту же траекторию, что и D-

волна. Следующие три пары компонентов — должны иметь скорости в 2, 4 и 8 раз меньше. Некоторым подтверждением справедливости нашего предположения является то, что траектории компонентов МУУВ проходят через многие области встречи D-волн, отмеченные на схеме рис.1, или вблизи от них. Особенно много землетрясений приходится на дополнительную пару траекторий (обозначенных штрих-пунктирными линиями). Как уже отмечалось, скорости соответствующих ей волн отличаются не в 2, а в 1,5 раза. Возможно, что это является «подсказкой» схемы Ш.А. Губермана (анализировавшего корреляции землетрясений) исследователям волн типа МУУВ — провести дополнительный поиск возможности таких соотношений.

#### **Краткая информация о результатах исследования волн типа МУУВ в средах, близких по составу к коре Земли**

Приведенная ниже информация поможет не только представить сегодняшнюю ситуацию с наблюдением волн типа МУУВ в средах, близких по составу к коре Земли, но и поставить вопрос об инструментальном обнаружении, — в избранных участках поверхности планеты, — обсуждаемых D-волн, если они действительно являются аналогами МУУВ.

1. Кристаллический кварц. Наиболее интересным веществом с точки зрения темы, обсуждаемой в настоящей работе, является кристаллический кварц, так как он является самым распространенным соединением литосферы Земли (55,2 %, [13]). Нами (в коо-

перации с ФТИ РАН, Санкт-Петербург) проведен большой цикл исследований по механолюминесценции (МЛ) кварца [14]. МЛ возникала при воздействии удара острия по оптически обработанному образцу прозрачного высококачественного синтетического кварца. (Предварительные опыты с грубо обработанными образцами природного кварца, дали качественно те же результаты). Регистрация свечения велась с помощью фотоумножителя. МЛ в виде серии отдельных вспышек света с разными амплитудами позволила надёжно обнаружить 4 самых быстрых компонента МУУВ ( $i=0,1,2,3$ ) (скорость первого совпадает со скоростью  $v_1$  продольного звука в кварце, остальных — отличается от него, примерно, в 2,4, 8 раза). Эта работа продолжается в настоящее время.

2. Плавный кварц. Ряд интересных исследований по доставке мощного лазерного излучения на расстояние в десятки метров — (например, для демонтажа аварийных блоков атомных станций [15]) или на километровые расстояния — для разработки гидратметановых залежей на дне океана или бурения нефтяных или газовых скважин [16, 17] были опубликованы в последние годы.

Первую работу [15] нам удалось проанализировать, благодаря помощи авторов, предоставивших нам исходные данные ряда опытов [18]. В этих опытах изучалось пропускание мощного (6÷11) кВт непрерывного излучения кислород-йодного лазера с длиной волны 1,315 мкм. Оказалось, что три 8-секундные записи эволюции пропускания волокна диаметром 1 мм<sup>2</sup> повторимым образом демонстрируют распространение со многими отражениями от обоих торцов — четырёх компонентов ( $i=6,7,8,9$ ) МУУВ. Эти импульсы — уединённые волны возникают на облучённом торце с вдвое падающими

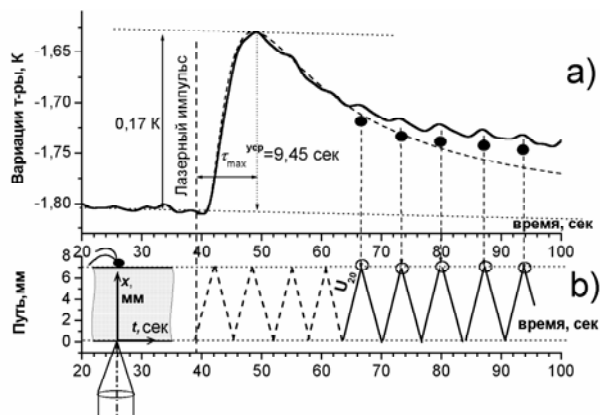
скоростями, начиная от 76 м/сек. Потери на отражения от торцов (2,5 % скорости) оказались постоянными для всех компонентов.

3. Природный опал [19,20]. Как выяснилось, волны типа МУУВ особенно надёжно регистрируются в образцах *природного опала*.

3.1. *Схема эксперимента и исследованные образцы*. Применялся непрерывного действия СО<sub>2</sub>-лазер с длиной волны излучения 10,6 микрон и с мощностью 4÷7 Вт. Для облучения образцов фотозатвор формировал импульс излучения с передним фронтом около 15 мсек и длительностью плоской вершины 30 мсек. Излучение фокусировалось ИК-линзой  $f = 600$  мм на поверхность образца. В качестве тепловых датчиков применялись отечественные миниатюрные (0,5x0,5 мм) кремниевые транзисторные устройства с временем разрешения около 20 мсек. Они приклеивались к образцам тонким слоем лака.

Встречающийся в природе минерал — коллоидный опал представляет собой гидратированный кремнезем SiO<sub>2</sub> xH<sub>2</sub>O. Содержание воды в нём колеблется от 1 до 34 %. Кроме воды, опал, как коллоид, поглощает и другие соединения. Образец натурального опала (из уральского Халиловского месторождения), на вид не отличающийся большой однородностью, после обработки имел форму, близкую к диску диаметром 24 мм, толщиной 6,4 мм. Два тепловых датчика были помещены на нём — один, В, под эпицентром, другой, С, — на боковой поверхности диска.

3.2. *Результаты измерения температурного хода образца и выводы по МУУВ*. Для примера, на рис. 3, а, б для образца природного опала представлена запись вариаций температуры Т, полученная с помощью датчика В (расположенного под эпицентром, как это



**Рис. 3.** а — запись для природного опала вариаций температуры  $T$ , полученная с помощью датчика В (сглаживание по 100 точкам); б — схема измерений и предлагаемая  $(x-t)$ -диаграмма волнового процесса (с траекторией 20-го компонента МУУВ). Штриховой вертикальной линией показано положение лазерного импульса на шкале времени

видно из схемы, встроенной слева в рис. 1, б).

Приводимые здесь записи наглядно и убедительно демонстрируют наличие важной особенности экспериментальных зависимостей  $T(t)$ . Очевидно, что гораздо раньше, чем диффузионное тепло, к датчику приходят упругие единённые волны, компоненты МУУВ, которые в рассматриваемых здесь опытах с натуральным опалом также вызывают небольшой нагрев материала. Для других материалов МУУВ могут вызывать локальное охлаждение; как это можно видеть в работе [21], выполненной аналогичным методом для кремния. Эти волны хорошо видны на рис. 3, а), где представлена (со сглаживанием по 100 точкам) 60-секундная эволюция температуры на датчике В прямо под эпицентром. Следы МУУВ проявляются на спаде температуры в виде периодических максимумов (величиной около 10 мК).

Оценить надёжность такого отождествления можно из сравнения с шумовой кривой, регистрируемой на том же

рисунке перед подачей лазерного импульса. Величина отдельных максимумов шума ( $\pm 5$  мК) вдвое ниже по величине. Однако, главное в том, что шумовые сигналы, как им и положено, не имеют той строгой периодичности, которую мы видим на спаде  $T$ -кривой через  $\sim 20$  сек после лазерного импульса. С другой стороны, указанные периодические максимумы хорошо соответствуют движению 20-го компонента МУУВ поперёк образца (см.  $(x-t)$ -диаграмму на рис 3 б) с началом при  $t=0$ ). Величина его усреднённой по 17 прохождениям скорости  $U_{20} = 0,20$  см/сек совпадает

с расчётным значением по формуле (1) [2]. (Точное совпадение может носить случайный характер, так как в формуле (1) для скорости звука взята величина, соответствующая синтетическому опалу, а не опалу естественному, для которого скорость звука нам неизвестна).

В этих же работах [19, 20] с помощью двух тепловых датчиков (сглаживание по 400 точкам) по аналогичной схеме измерений получены записи, расшифровка  $(x-t)$ -диаграмм волнового процесса которых показывает участие в процессе ещё и 21, 22, 23, 24-го компонентов МУУВ. Скорости их уменьшаются каждый раз примерно вдвое. Вместе с вышеприведенным 20-м компонентом, они лежат в интервале от 0,20 см/сек до 0,012 см/сек. При этом повторимся, что компоненты МУУВ в натуральном опале имеют характер волн сжатия (а не разрежения).

4. Вода [22,23] и пористые среды [24]. Как показано в [22,23], ИК — лазерный импульс ( $\sim 0,3$  сек,  $\sim 1$  Дж) возбуждает в воде серию волн типа

МУУВ. Вызванные им звуковые колебания в сосуде с водой затухают за 1 секунду, поверхностные волны — за 5 секунд (по наблюдению за отражением луча гелий-неонового лазера от поверхности воды). С помощью термодатчиков регистрировалось распространение тепла и повторяющиеся в течение более 500 секунд обратимые неперриодические изменения  $T$  (на 0,01-0,1 градуса), которые позволяют восстановить картину волнового процесса.

В [22] опыты производились в плоском круглом сосуде (диаметром 10 см, слой воды ~1 см). Регистрация волн велась с помощью либо 4 термопар на дне в центре сосуда, либо 50 термопар на его боковой стенке. В случае узкого вертикального канала с водой (диаметром ~0,5 см и длиной ~12 см) [23], судя по 10-секундной записи, две уединённых волны друг за другом двигались вниз по каналу от облученного участка на поверхности и отражались от конца трубки. Скорость первой волны ~ 4 см/сек, второй — ~ 2 см/сек.

Поскольку волны типа МУУВ наблюдаются как в твёрдых телах, так и в жидкостях, становится ясным, почему согласие с экспериментом для расчётов по выражению (1) получается только, если пользоваться продольной скоростью звука. Дело в том, что в жидкостях поперечной скорости звука нет.

Измерения скоростей компонентов МУУВ в воде в совокупности обоих работ [22, 23] дали значения от 4,0 и 2,0 см/сек до 0,014 см/сек (соответствующие значения  $i = 15, 16, 19, 20, 21, 22$ ).

Общие соображения, справедливые для распространения волн типа МУУВ в пористых средах, заполненных жидкостями, с которыми имеют дело при бурениях нефтяных сква-

жин, были сформулированы в [24]. На этой конференции обсуждались также возможности воздействия на нефтеносные пласты, в том числе и волн типа МУУВ.

### **Заключение**

Из приведенных примеров видно, что в различных веществах — типичных компонентах пород, составляющих земную кору, могут распространяться МУУВ с разными скоростями, иногда на порядки меньшими звуковой. Даже при малой амплитуде они могут вносить регистрируемые изменения в параметры среды, локально меняя её температуру, давление и плотность. На основании рассмотренного сравнения гипотетических D-волн, обуславливающих мощные землетрясения в модели Губермана, с волнами типа МУУВ по-видимому, нельзя исключить возможность существования в природных структурах большой протяженности также и мощных МУУВ. Это — весомые аргументы для расширения проводимых в последние годы исследований свойств МУУВ в различных твердых и жидких средах и разработки методов их использования, в частности, для надёжного предсказания землетрясений, а также диагностики и прогноза состояния горных пород. В таких исследованиях надо от лабораторных экспериментов переходить к натурным опытам, разработав соответствующие способы регистрации обсуждаемых волн.

Авторы благодарят Ш. А. Губермана за проявленный интерес к физическим экспериментам с МУУВ; коллег из ФРГ, сотрудников Германского аэрокосмического центра К. Грюневальде и В. Бонна, за предоставление исходных данных по исследованию пропускания мощного лазерного излучения через кварцевое волокно [14].



Образец натурального опала был любезно предоставлен нам сотрудниками Минералогического музея РАН. Авторы также благодарят сотрудников

МГГУ за приглашение участвовать в «Неделе горняка –2009», подтолкнувшее нас к анализу ещё одного проявления МУУВ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губерман Ш.А. ДАН СССР (1975) 224, 573-576.
2. Кудрявцев Е.М. Сб. трудов XIII сессии РАО, т.1 Физическая акустика..., 2003) <http://rao.akin.ru/rao/sess13/sect1f.htm> pp.165-168 (PDF, 220К)
3. Кудрявцев Е.М., Зотов С.Д., Лебедев А.А. (предыдущая статья в этом сборнике).
4. Викулин А.В. Мир вихревых движений. Петропав. — Камчатский: КамчатГТУ, 2008.
5. Mogi K., Bull. Earthquake Res. Inst., (1968) v.46, 53.
6. Wood M. D., Allen S. S., Nature, (1973) v.244, 5413.
7. Вилькович Е.В., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И. ДАН СССР (1974) 219, 77—80.
8. Губерман Ш.А. ДАН СССР (1976) 230, 811-814.
9. Губерман Ш.А. Вычислительная сейсмология. (1979), вып. 12, 158-188.
10. Губерман Ш.А. Неформальный анализ данных в геологии и геофизике. М.: Недра, 1987. — 261с.
11. «Наука и жизнь» (1990) № 2, стр. 53-55.
12. Губерман Ш. А. Всес. конф. Катастрофы и человечество. Суздаль.(1991) М., С. 113.
13. Физические величины. Справочник. Табл.44.2. М., Энергоатомиздат, 1991.
14. Kudriavtsev E.M., Zotov S.D., ([http://rao.akin.ru/Proc.of.XIX.Sess.of.the.RAS,Sept.2007Phys.Acoust.\(PDF,144K\)p.77-79](http://rao.akin.ru/Proc.of.XIX.Sess.of.the.RAS,Sept.2007Phys.Acoust.(PDF,144K)p.77-79)).
15. Gruenewald K., Handke J., Schall W. O., Duschek F.(2002) Proc. SPIE 5120, 345-349, Wroclaw; Gruenewald K., Bohn W. L., Duschek F., Handke J., Schall W. O., Preprint: XIth Conference on Laser Optics LO'2003, St. Petersburg, 2003.
16. Ilyin S. P., Buzoveria V. V. et al. (2004), Proc. SPIE 5777, 295-297.
17. Takeuchi N., Tei K., Sugimoto D. et al. (2004) Proc. SPIE 5777, 298-301.
18. Kudriavtsev E.M., Abstracts, P2-20, GCL/HPL-2004, Prague, Czech Republic, 2004.
19. Kudriavtsev E.M., Zotov S.D. ([http://rao.akin.ru/Proc.of.XVI.Sess.of.the.RAS,Nov2005Phys.Acoust.\(PDF,144K\)p.728-731](http://rao.akin.ru/Proc.of.XVI.Sess.of.the.RAS,Nov2005Phys.Acoust.(PDF,144K)p.728-731)).
20. Кудрявцев Е.М., Зотов С.Д. (<http://ellphi.lebedev.ru/13/pdf33/pdf>) Пр. ФИАН, 2005.
21. Кудрявцев Е.М., Зотов С.Д. Электронный журнал «Исследовано в России» (2005) 8, 1550-1561. <http://zhurnal.arelam.ru/articles/2005/148.pdf>
22. Kudriavtsev E.M., Zotov S.D., Kudriavtsev A.I. Intern. Workshop «Solitons, collapses...», Abstracts, p. 20 (Landau Inst. Theor. Phys., Chernogolovka, Russia, 2002).
23. Кудрявцев Е.М., Зотов С.Д. Труды 14-ой сессии РАО и 10-ой школы-семинара «Акустика океана», Москва, 2004 г.
24. Кудрявцев Е.М. Абстракты докладов, Межд. конф. «Воздействие упругих волн на флюиды в пористых средах» Москва, 2002 г.

■ МАБ

#### Коротко об авторах

Кудрявцев Е.М. — доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, e-mail: kudriavt@sci.lebedev.ru  
Макляев Е.Ф. — кандидат физико-математических наук, доцент, Московский инженерно-физический институт (государственный университет), e-mail: emaklyaev@mail.ru  
Зотов С.Д. — Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, e-mail: zotov@sci.lebedev.ru

