

УДК 550.3;550.8;550.334;534.222

СОПОСТАВЛЕНИЕ ГИПОТЕТИЧЕСКИХ D-ВОЛН ПЛАНЕТАРНОГО МАСШТАБА, ОБУСЛАВЛИВАЮЩИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В МОДЕЛИ Ш. А. ГУБЕРМАНА, С ОБНАРУЖЕННЫМИ ОПЫТНЫМ ПУТЕМ МЕДЛЕННЫМИ УЕДИНЕННЫМИ УПРУГИМИ ВОЛНАМИ (МУУВ)

Е. М. Кудрявцев, Е. Ф. Макляев¹, С. Д. Зотов, А. А. Лебедев

Экспериментально обнаруженные в 1992 г. в ФИАНе медленные уединенные упругие волны (МУУВ) с дискретными скоростями, наблюдавшиеся затем в различных твердых и жидких средах, рассмотрены как аналог гипотетических планетарных D-волн Ш. А. Губермана, провоцирующих землетрясения в его модели. Стодство существенных свойств указанных волн обосновывает необходимость изучения МУУВ также и в геологических средах как возможного агента, инициирующего разрушения в критически напряженных структурах.

Хорошо известны многообразные медленные (по сравнению со скоростью звука) уединенные волны и вихри в природных средах: волна Рассела в узком канале после резкого торможения судна, цунами в океанах, циклоны и торнадо в атмосфере, приливные волны в морях и на суше от притяжения Луны и Солнца, связанные с вращением Земли, и т. п. Обсуждаются также модели медленных сейсмических и тектонических волновых процессов в недрах Земли, см. напр., [1]. В связи с этим интересно сопоставить гипотетические D-волны в литосфере, с воздействием которых связаны сильнейшие землетрясения в модели, предложенной Ш. А. Губерманом [2], с экспериментально

¹Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ (НИЯУ МИФИ).

исследуемыми в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, начиная с 1992 г., долгоживущими медленными уединёнными упругими волнами (МУУВ) в разных твердых и жидких средах с дискретными скоростями, лежащими в очень широком диапазоне от км/с до мкм/с [3, 4]. Эти МУУВ могут быть рассмотрены как возможный реальный аналог-прототип D -волн. Так как по существенным свойствам указанные волны схожи, то можно предположить, что аналогичные процессы могут возникать и при локальных техногенных воздействиях на геологическую среду, вызывая при некоторых условиях разрушения в критически напряженных структурах.

1. *Гипотеза Ш. А. Губермана о D -волнах.* В ряде работ [5–7] были выявлены *цепочки землетрясений*, монотонно смещающихся в течение многих лет вдоль разломов земной коры со своей примерно постоянной в каждой цепочке скоростью. Анализ широтно-временного распределения очагов самых мощных сейсмических катастроф, проведенный Ш. А. Губерманом в ИПМ им. М. В. Келдыша, показал, что в ряде разломов проекция скорости смещения 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 медленной уединенной волны, названной им D -волной [2]. Ее фронт в каждый момент времени располагается на определенной параллели, смещаясь без существенного затухания вдоль меридиана со скоростью 0.15° в год (0.53 мм/с), а геометрическая ширина волны составляет порядка 10 км.

Дальнейший анализ [8–10] показал, что этих волн – две, и движутся они от полюсов к экватору. На рис. 1 представлена схема D -волн Ш. А. Губермана [11], поясняющая идею его гипотезы. Она представляет собой $(x-t)$ -диаграмму, которая используется для отображения волновых процессов в образце. 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 двух точек, расположенных на одной вертикали, которые в каждый момент времени определяют широты положения волн на меридиане.

Полыми кружками уменьшающегося радиуса с увеличивающимися римскими числами, обозначающими порядок пересечения от I до IV, на схеме рис. 1 показаны пересечения траекторий D -волн, которые могут с некоторой вероятностью привести к возникновению мощного землетрясения в потенциальном очаге где-то на данной ши-

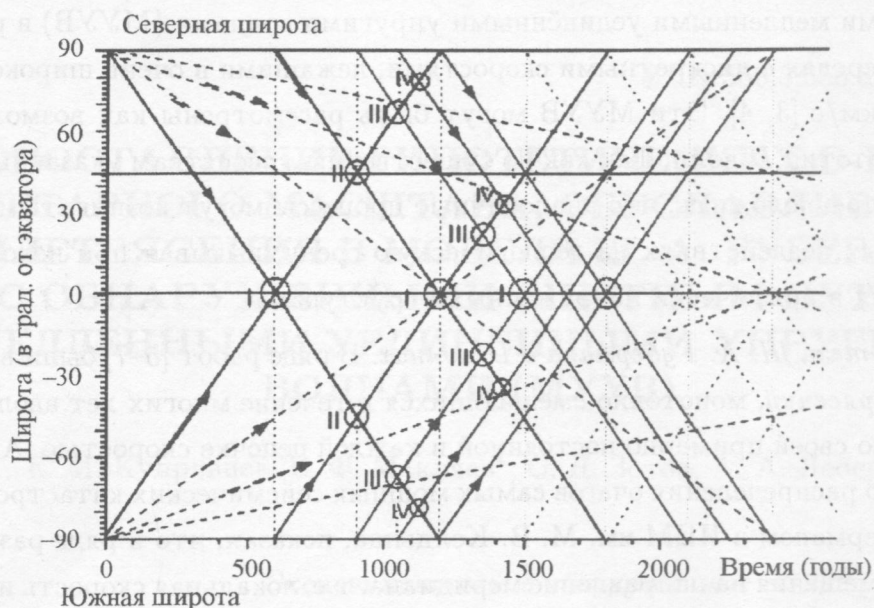


Рис. 1. Схема D -волн Ш. А. Губермана [11] с добавлением траекторий МУУВ (штриховые линии).

роте. 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).

На схеме рис. 1 сплошными линиями показаны все теоретически возможные пары D -волн, которые могли бы возникнуть в течение 1200 лет после появления (при $t = 0$) "первой" их пары, если бы *каждое* "столкновение" встречных D -волн порождало новую их пару на полюсах. Предполагаемое число таких волн уточнялось автором гипотезы позднее [10] и на 01.01.1900 г. он установил их число как 21 волну, двигающуюся к Северному, и столько же волн, двигающихся к Южному полюсу.

Одним из явных следствий гипотезы Губермана является дискретный характер широтных областей, в которых происходят пересечения разных порядков траекторий D -волн. Для наглядности мы привели указанные дискретные области на рис. 2 [12]. Их ширина составляет ± 1 градус, а положение Z_m определяется как [9] $Z_m = 5.62 m$, где $0 < m < 16$ (m – целое), так что $Z_m = 0; 5.62^\circ; 11.25^\circ; \dots$

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 в этих дискретных широтных областях, что подтверждает рассматриваемую гипотезу [2].

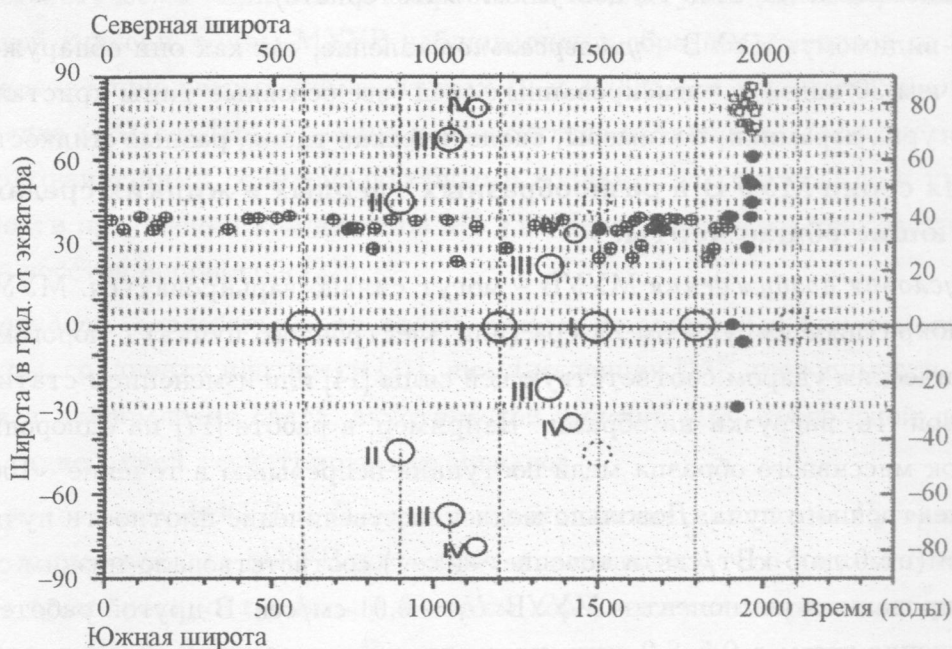


Рис. 2. Дискретные D -широты Ш. А. Губермана.

2. *Прогноз землетрясений на основе гипотезы Губермана.* Автор обсуждаемой гипотезы не ограничился 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) [13]. При этом у автора гипотезы, как он пишет [2], “...никаких доказательств реальности этих волн ... пока нет...”. Как сообщил нам Ш. А. Губерман, вопрос о возможности таких волн в природе он задавал в своё время А. Д. Сахарову и Я. Б. Зельдовичу, но утвердительного ответа не получил.

3. *Медленные Уединенные Упругие Волны с дискретными скоростями: свойства этого нового малоизвестного типа волн.* Мы предлагаем обсудить волны типа МУУВ в качестве реального аналога гипотетических D -волн Ш. А. Губермана. Для этого предварительно напомним основные свойства этого экспериментально обнаруженного явления (см., например, обзор на эту тему [3] по 15 конкретным статьям, опубликованным до 2003 г., доступный в Интернете).

По-видимому, МУУВ – универсальное явление, так как они обнаружены в образцах более чем 30 видов конденсированных сред (все основные типы кристаллов, аморфные структуры, керамики, полимеры, биологические ткани, разные жидкости).

Для серии МУУВ в разнообразных твердых и жидких средах характерны следующие общие черты:

– условия возбуждения МУУВ – могут сильно варьироваться. МУУВ возбуждается однократным импульсом лазера (или электронного пучка) с порогом ~ 10 кВт/см², механическим ударом соответствующей силы [14] или изменением статической [15] или тепловой [16] нагрузки на образец. Например, в работе [17] на однородно облучаемый участок массивного образца меди поступала непрерывно в течение ~ 100 –200 сек энергия электронного луча. Довольно медленное увеличение плотности пучка в начальной стадии (от 0 до 5 кВт/см² в течение ~ 1 сек) соответствовало низким скоростям зарегистрированных компонентов МУУВ: $U_i \sim 0.01$ см/сек. В другой работе [15] медленное нагружение весом в 0.5–8.0 тонн плоского медного образца приводило к возбуждению компонентов МУУВ со скоростью $U_i \sim 0.2$ см/сек;

– устойчивая форма волны типа солитона в виде однополярного (одногорбого) импульса либо сжатия, либо разрежения, наблюдаемая для каждого из импульсов, составляющих МУУВ в данном материале (причины этого пока не выяснены);

– дискретный спектр наблюдаемых скоростей U_i (где $i = 0, 1, 2, 3, \dots$) в большом диапазоне – от км/с до мкм/с (от скорости U_0 , равной скорости продольной звуковой волны v_l , до величин, во много раз меньших U_0). Анализ показывает, что все компоненты МУУВ возникают одновременно или в течение очень короткого периода времени. Для компонентов МУУВ с малыми номерами (скорости, сравнительно близкие к скорости звука), амплитуда пропорциональна квадрату скорости компонента [18];

– возможность (при некоторой конкретной схеме возбуждения и регистрации) одновременного возбуждения и наблюдения в избранном поддиапазоне скоростей нескольких 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 большая дальность распространения (например, 20 метров в кварцевом волокне) [19];

– способность отражаться от границ образца (в воде – от стенок сосуда [20]) с малыми изменениями параметров волны (десятки отражений), при этом знак напряжений в волне не меняется (образцы кварца [14], стекла [21]);

– “долгоживучесть” при малых скоростях и амплитудах (по измерениям методом акустической эмиссии, волны МУУВ наблюдались в образцах металлов до 7 часов после возбуждения при разных температурах (0 и 1000°С) и характеризовались скоростями порядка мкм/сек [16]; в резине и плексигласе наблюдался “эффект насыщения” образца долгоживущими солитон-подобными волнами, что приводило к уменьшению контрастности проявлений компонентов МУУВ. Через двое суток контрастность в том же образце восстанавливалась [22];

– способность воздействия на самые разные датчики для измерения: давления, температуры, градиента плотности [21], люминесценции [15], проводимости, изменения отражения и преломления света, акустической эмиссии [16], продольной деформации [23] и др., с генерацией регистрируемых сигналов.

4. *Сопоставление МУУВ и D-волн с точки зрения гипотезы Губермана.* Перечисленные выше свойства МУУВ позволяют предполагать, что их компоненты могут длительное время распространяться в земной коре, выступая в роли медленных уединенных D-волн Ш. А. Губермана. Например, в экспериментах с натуральным опалом были зарегистрированы компоненты МУУВ со скоростями, лежащими в интервале (2–0.12)мм/сек [24]. В этот интервал попадает и определенная Ш. А. Губерманом скорость D-волн, распространяющихся по Земле (она составляет 0.53 мм/сек). Опал, как известно, почти целиком состоит из кварца, который является основным компонентом земной коры.

Можно предположить, что на обоих полюсах Земли при сильнейших сейсмических толчках, вызванных смещением литосферных плит во время землетрясений, образуется не пара гипотетических D-волн, а пара реальных серий МУУВ, в каждой из которых наиболее интенсивный компонент имеет ту же скорость, что и D-волна. Эти два компонента и выступают инициаторами землетрясений [12]. Заметим, что в этом предположении все прогнозы, выполненные Ш. А. Губерманом, остаются полностью справедливыми. Но тогда возникает вопрос – что же происходит с другими компонентами МУУВ? Логично предположить, что поскольку Ш. А. Губерман рассматривал землетрясения только с магнитудой $M > 8$, то с учетом серии МУУВ по его модели

можно будет предсказывать землетрясения и с меньшей магнитудой. Если же оставаться на позиции допустимости только пары D -волн в модели Губермана, то на вопрос об остальных компонентах МУУВ возможны два варианта ответа, требующие дальнейших исследований. Либо – что по какой-то пока неизвестной нам причине (например, резонансного характера) в такой сложной нелинейной системе как земная кора *только один* компонент из серии волн МУУВ с его конкретной скоростью запускает сильнейшие землетрясения. Либо – что в коре Земли при некоторых конкретных условиях возбуждения, также по какой-то пока неизвестной нам причине, распространяется с достаточной интенсивностью только один компонент МУУВ с указанной скоростью (по нашей терминологии это $U_{23} = 0.5$ мм/с), а остальные компоненты оказываются значительно менее интенсивными.

Выводы. Проведенное обсуждение показывает, что волны типа МУУВ действительно могут служить аналогом гипотетических волн Губермана, которые по его модели инициируют землетрясения.

Серия таких волн, вызванная резким изменением плотности энергии в среде, может быть индикатором возникновения больших деформаций в твердых телах, технических сооружениях и геологических слоях, служить объективным предвестником приближающихся катастроф, а также дальнедействующим агентом, инициирующим разрушения в других критически напряженных структурах.

Это – весомые аргументы для расширения исследований свойств МУУВ в различных твердых и жидких средах и разработки методов их регистрации и использования, в частности, для надёжного предсказания землетрясений, а также диагностики и прогноза состояния горных пород и технических сооружений. Целесообразно от лабораторных экспериментов переходить к *натурным* опытам, разработав соответствующие способы регистрации этих волн, поскольку обычными сейсмографами столь медленные волны не регистрируются.

Авторы благодарят Ш. А. Губермана за проявленный интерес к физическим экспериментам с МУУВ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] А. В. Викулин, *Мир вихревых движений* (Петропавловск-Камчатский, КамчатГТУ, 2008).
- [2] Ш. А. Губерман, ДАН СССР **224**(3), 573 (1975).

- [3] Е. М. Кудрявцев, в: Сб. трудов XIII сессии РАО, т. 1, Физическая акустика (Москва, ГЕОС, 2003) с. 204; <http://rao.akin.ru/rao/sess13/sect1f.htm> pp.165.
- [4] Е. М. Кудрявцев, С. Д. Зотов, А. А. Лебедев, Препринт ФИАН N 5 (Москва, ФИАН, 2009).
- [5] K. Mogi, Bull. Earthquake Res. Inst. **46**, 53 (1968).
- [6] M. D. Wood and S. S. Allen, Nature **244**(5413), 213 (1973).
- [7] Е. В. Вилькович, Ш. А. Губерман, В. И. Кейлис-Борок, ДАН СССР **219**(1), 77 (1974).
- [8] Ш. А. Губерман, ДАН СССР **230**(4), 811 (1976).
- [9] Ш. А. Губерман, Вычислительная сейсмология N 12, 158 (1979).
- [10] Ш. А. Губерман, *Неформальный анализ данных в геологии и геофизике* (М., Недра, 1987).
- [11] "Наука и жизнь" N 2, 53 (1990).
- [12] Е. М. Кудрявцев, Е. Ф. Макляев, С. Д. Зотов, Препринт ФИАН N 6 (Москва, ФИАН, 2009).
- [13] Ш. А. Губерман, в: Труды Всесоюзной конференции "Катастрофы и человечество", Суздаль, 1991 (МГУ, Москва, 1991), с. 113.
- [14] К. Б. Абрамова, С. Д. Зотов, Е. М. Кудрявцев, И. П. Щербаков, *Труды 19 сессии РАО* (Нижний Новгород, 2007) (<http://rao.akin.ru/Proc.of XIX Sess.of the RAS, Sept. 2007 Phys. Acoust.>), p. 77.
- [15] E. M. Kudriavtsev, K. V. Abramova, and I. P. Scherbakov, Proc.SPIE **4679**, 167 (2002).
- [16] Е. М. Кудрявцев, С. Д. Зотов, М. М. Ляховицкий и др., Тезисы конф. "Деформация и разрушение материалов" (Москва, ИМЕТ, 2009).
- [17] Е. М. Кудрявцев, А. В. Варава, А. В. Дедов, А. Т. Комов, Краткие сообщения ОИЯИ, N 5-6, 13 (1999).
- [18] E. Kudriavtsev, S. Lefranc, and M. Autric, Proc. of SPIE **3885**, 428 (2000).
- [19] E. M. Kudriavtsev, GCL/HPL-2004, Abstract, (Prague, Czech Republic (Prague, Prague Univ, 2004), p. 2.
- [20] Е. М. Кудрявцев, С. Д. Зотов, *Труды 14-й сессии РАО и 10-й школы-семинара "Акустика океана"* (Москва, 2004).
- [21] Е. М. Кудрявцев, С. Д. Зотов, А. А. Лебедев, Письмо в редакцию "Квантовая электроника", принято в печать, 2009.
- [22] Е. М. Кудрявцев, С. Д. Зотов, Препринт ФИАН N 46 (ФИАН, Москва, 2001).

- [23] Е. М. Кудрявцев, С. Д. Зотов, Сб. научных трудов “Ультразвук и термодинамические свойства вещества”, вып. 36, (Курск. гос. ун-т, 2009), с. 44.
- [24] E. M. Kudriavtsev and S. D. Zotov, Труды 16-ой сессии РАО (<http://rao.akin.ru/Proc.of XVI Sess.of the RAS, Nov 2005 Phys. Acoust.>), p. 728.

Поступила в редакцию 12 августа 2009 г.