

СИЛЬНЫЕ ДВИЖЕНИЯ ГРУНТА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ И АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ВБЛИЗИ МОЩНОГО СЕЙСМОВИБРАТОРА

В.В.Кузнецов

Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
п. Паратунка, Камчатская обл.,
Институт геофизики СО РАН, г. Новосибирск.

Рассматриваются сильные движения грунта в окрестности мощного работающего сейсмодвибратора, возникающие в результате взаимодействия поверхностных и акустических волн, как аналог «управляемого» землетрясения. Амплитуда вертикальных колебаний платформы сейсмодвибратора достигает сантиметра. При работе вибратора в режиме «присоединенной массы» в двух-трех метрах от него фаза колебаний частиц грунта практически не изменяется, амплитуда вертикальных перемещений достигает миллиметра. На расстоянии около 5 метров от края сейсмодвибратора наблюдается заметное уменьшение амплитуды колебательной скорости частиц грунта, происходит смена фазы колебаний, изменяется характер движения частиц грунта. Зона минимальных колебаний грунта на расстоянии 5 метров от вибратора характеризуется наличием большого количества трещин на поверхности земли и может быть представлена (по аналогии с землетрясением) как нодальная плоскость. В грунте, на расстоянии, большем пяти метров от платформы вибратора, возникает поверхностная волна типа волны Рэлея, в которой интенсивность горизонтальной компоненты возрастает по мере удаления от сейсмодвибратора от 5 до 12 метров. Эта волна распространяется практически без потерь на расстояние порядка 100 м со скоростью, близкой к скорости звука в воздухе. Приведены оценки сейсмической энергии и сейсмического момента сейсмодвибратора, как источника «трясения земли». Обсуждается возможные механизмы взаимодействия волн.

Несмотря на многочисленные исследования, физика землетрясения не становится более ясной, чем она была во времена Рейда, который после известного землетрясения в Сан-Франциско в 1906 г предложил модель упругой отдачи. Изучая землетрясение, как физическое явление, можно представить его как три следующих один за другим этапа. Во-первых, это создание в среде напряженного состояния, начало его разрядки и формирование очага; во-вторых, транспортировка энергии от очага к поверхности Земли и, в третьих, собственно «трясение земли», как реализацию катастрофических явлений, таких как отколы, разрывы, разломы и т.п., происходящих на её поверхности. Очевидно, что лучшим решением проблемы физики землетрясения было бы создание единой теории, или хотя бы модели, описывающей все этапы последовательно и в едином контексте. Такой теории и модели пока нет и, следовательно, можно изучать явление, как говорится, «по частям». Ниже речь пойдет о попытке изучения «третьей части» с привлечением для этой цели результатов наших измерений сильных движений грунта и взаимодействия поверхностных и акустических волн в непосредственной близости сейсмодвибратора.

Насколько такой подход можно считать оправданным? Есть ли основания считать явления в геофизической среде, вызываемые работой мощного сейсмодвибратора, в какой-либо степени похожими на те, которые регистрируются при самом землетрясении? Для того чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к Шкале сейсмической интенсивности MSK-64, значения которой частично приведены в Таблице 1:

Таблица 1

Интенсивность в баллах	Ускорение в см/с ²	Скорость грунта см/с	Амплитуда в мм
V	15 – 30	1.5 – 3.0	0.8 – 1.5
VI	31 – 60	3.1 – 6.0	1.6 – 3.0
VII	61 – 120	6.1 – 12.0	3.1 – 6.0
VIII	121-240	12.1 – 24.0	6.1 – 12.0

Амплитуда колебаний грунта (δ) в непосредственной близости от мощного сейсмодвижителя порядка миллиметра, скорость движения частиц грунта, на частоте $\omega = 6 - 9$ Гц, составляет 3 - 5 см/с ($v = 2\pi\omega\delta$), ускорение ($a = 4\pi^2\omega^2\delta$) может достигать 200 см/с². Сравнивая полученные оценки параметров, характеризующих работу сейсмодвижителя с данными Таблицы 1, можно определить интенсивность такого «землетрясения» не ниже V класса. При работе 100-тонного вибратора в окружающих его зданиях на расстояниях до одного километра, действительно всяческие предметы качаются, а сами здания заметно сотрясаются.

Разработчики сейсмодвижителей проводили сравнение эффективности работы 30 минутного режима работы 100-тонного вибратора в «тротиловом эквиваленте». Оказалось, что такой сеанс на удалении в 100 км эквивалентен взрыву примерно 3 тонн тротила [1]. Это соответствует полной (в том числе и сейсмической) энергии $E = 10^{10}$ Дж, или землетрясению 10-ого энергетического класса. Если продолжить аналогию, то магнитуду поверхностных волн «землетрясения» M_S , вызываемого работой 100-тонного вибратора, можно приближенно оценить: $M_S \sim \lg\delta$ (δ в мкм), $M_S \geq 3$. Сейсмический момент такого «землетрясения» $M_0 = \mu\delta S = 5 \cdot 10^{13}$ дин-см, где μ - модуль сдвига. S - площадь поверхности грунта, синхронно колеблющегося с вибратором ($S \approx 100$ м²). Модуль μ можно оценить по скорости S-волн ($\mu = V_S^2\rho$), принимая величину V_S для грунта в районе полигона $V_S = 180$ м/с ($V_P = 370$ м/с) [2]. Величину μ можно оценить, зная напряжение σ , развиваемое сейсмодвижителем, и относительную деформацию ϵ . Величина σ была приведена в [1] ($\sigma = 0.5$ кг/см²), а $\epsilon \approx 10^{-3}$ (δ заметно затухает на расстоянии $L = 1$ м, а $\epsilon \sim \delta/L$). Обе оценки дают одинаковый результат: $\mu \approx 5 \cdot 10^8$ дин/см². Полученная величина M_0 значительно меньше, чем следовало бы из известного соотношения: $M'_0 \approx \mu/\sigma E = 10^3 E = 10^{20}$ дин-см. Если учесть фактор накопления $k = T\omega$, где T - время сеанса (0.5 часа), то M_0 увеличивается на 4 порядка, однако этого не достаточно, чтобы согласовать E и M_0 .

Ещё раз подчеркнем, что было бы совсем не правильно рассчитывать на то, что работа вибратора может «дать» картину явлений, полностью идентичных землетрясению. Более правильно считать, что если физика явлений в геофизической среде, возникающих при работе сейсмодвижителя будет ясна и понятна, то этот опыт, возможно, приблизит нас к пониманию процессов «трясения Земли» при землетрясении.

Эксперименты проводились на четырех сейсмодвижителях, установленных на вибросейсмическом полигоне «Быстровка», расположенном недалеко от Новосибирска. Сейсмодвижители: 1) ЦВ-100, - виброисточник дебалансного типа с амплитудой силы до 100 (170) тонн, принадлежащий Геофизической службе (ГС) СОРАН, 2) разработанный в институте вычислительной математики и математической геофизики СОРАН гидрорезонансный сейсмодвижитель с амплитудой силы 50 тонн (ГРВ-50), 3) ЦВ-40 (ГС СОРАН) и 4) ЦВ-30, разработанный в институте геофизики СОРАН [1 - 5]. Летом 2001 г. сейсмодвижитель ЦВ-40 перевозился ГС по трассе Быстровка - Залесово (Алтайский край). Нам удалось изучить особенности колебаний грунта вблизи вибратора ЦВ-40 во время проведения этого эксперимента.

Эффекты, о которых пойдет речь ниже, впервые были обнаружены группой Юшина [5] на ЦВ-30. Авторы показали, что в 5-метровой окрестности виброплатформы возникает квазистоячая волна, на гребне которой находится вибратор. Они зафиксировали «недопустимо высокую для рыхлого грунта фазовую скорость (1300 м/с)». Скорость этой волны резко снижалась примерно в 10 раз на расстоянии около 5 м от края платформы и еще через 5 – 10 метров она превращалась в обычную релеевскую волну в рыхлом грунте. В течение пяти лет (1997-2001) это явление было экспериментально изучено достаточно подробно [6-10]. Интерпретация полученных результатов составляет основное содержание настоящей статьи.

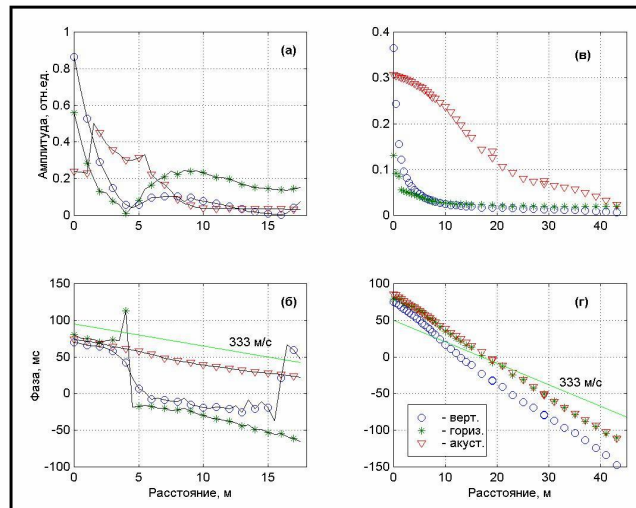


Рис. 1. Амплитуды (в отн. ед.) и фазы (в мс) сейсмических и акустических колебаний вблизи ЦВ-100 на полигоне «Быстровка» (а, б) и вблизи возимого вибратора ЦВ-40 на Алтае (в, г).

Результаты экспериментов по исследованию колебаний грунта вблизи вибраторов приведены на рис. 1, а модельные представления - на рис. 2. На рисунке 1-а показано изменение с расстоянием от вибратора амплитуды (в отн. ед.), а внизу 1-б, - фазы скоростей колебаний грунта (значения в миллисекундах), полученные вблизи вибратора ЦВ-100. На рис. 1-б приведено, для сравнения, изменение фазы акустического сигнала. Рисунки 1-а и 1-б показывают, что на расстоянии 5 метров от края платформы вибратора резко убывает амплитуда колебаний частиц грунта, на π меняется фаза колебаний и изменяется разность фаз горизонтальных и вертикальных колебаний грунта. Надо сказать, что аналогичные результаты получены нами и на других типах вибраторов, установленных на Быстровском полигоне. Заметим: несмотря на то, что мощность вибраторов изменялась почти в 5 раз (от 30 т. до 170 т.), «5-ти метровая особенность», называемая в этой работе «эффектом присоединенной массы (ПМ)», сохранялась во всех экспериментах.

Впервые отсутствие этого эффекта было обнаружено нами при работе 30 тонного вибратора в нестандартном режиме - с одним дебалансом. При этом платформа вибратора ЦВ-30 совершала кроме вертикальных перемещений, - видимые горизонтальные колебания. Поверхностная волна от вибратора распространялась со скоростью звука в воздухе, и смены фаз колебаний - не отмечалось. Отсутствие эффекта ПМ повторялось во всех случаях наблюдений за работой вибратора ЦВ-40 во время перемещений его по трассе Быстровка-Залесово. При установке этого вибратора после эксперимента на вибросейсмическом полигоне, отсутствие эффекта так же изредка наблюдалось при отклонении его платформы от строго горизонтального положения до тех пор, пока вибратор не «приработался». На рис. 1-в приведены амплитуды, а на рис. 1-г – фазы

колебаний грунта в поверхностной волне вблизи вибратора и изменение фазы акустического сигнала. Эти данные получены в пункте установки вибратора недалеко от с. Калтай Алтайского края. Аналогичные данные получены нами в других пунктах, а так же на ЦВ-40 на Быстровском полигоне. Отличие состоит только в том, что на полигоне поверхностная волна распространялась всегда со скоростью звука в воздухе. Из рисунка 1-г видно, что смены фаз в 5-ти метровой зоне не происходит, и фаза горизонтальных колебаний всегда опережает фазу вертикальных. Амплитуды колебаний экспоненциально затухают с расстоянием от вибратора.

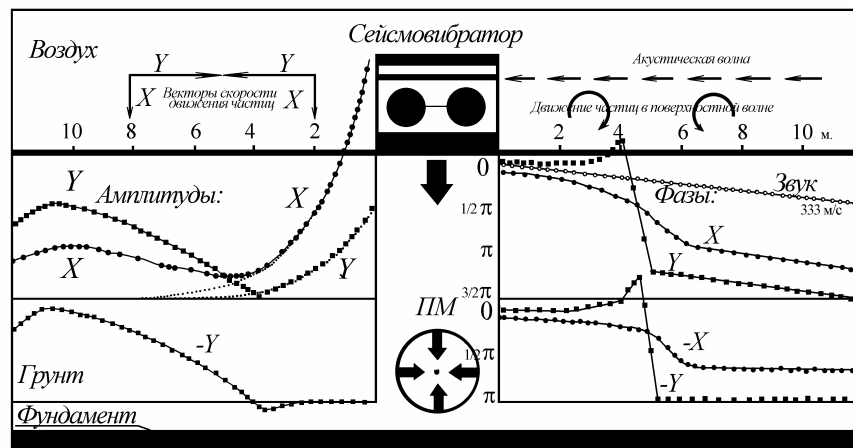


Рис. 2. Интерпретация результатов. ПМ – присоединенная масса. -X, -Y – разности фаз (в долях π) и амплитуд (отн. ед.) колебаний грунта с ПМ и без неё.

Итак, анализируя данные экспериментов, накопленные в течение 5 лет, эффект возникновения ПМ можно характеризовать рядом повторяющихся признаков, которые присущи всем экспериментам и отражены на рис. 1 и 2:

- станина вибратора установлена на Быстровском полигоне строго горизонтально,
- вблизи вибратора грунт колеблется синхронно с ним, фаза вертикальных (X) и горизонтальных (Y) колебаний на первых пяти метрах от платформы практически не меняется,
- вблизи вибратора фаза горизонтальных колебаний частиц грунта незначительно опережает фазу колебаний вертикальных, вращение частиц грунта происходит по часовой стрелке (рис. 2),
- амплитуда колебаний вблизи вибратора резко убывает по мере удаления от него, наблюдались случаи, когда амплитуда Y-компоненты при перемещении от края вибратора сначала несколько увеличивалась, а потом резко уменьшалась [10],
- в 5-ти метровой зоне амплитуда Y-компоненты становится практически равной нулю, а затем начинает увеличиваться, на некотором расстоянии амплитуды X и Y колебаний становятся равными,
- на расстоянии 5 метров фаза Y-колебаний резко меняется на 180° , в то время как смена фазы X-колебаний происходит не так резко как у Y и на меньшую величину (рис. 1, 2),
- на расстоянии чуть меньшем 5-ти метров, фаза Y-колебаний начинает возрастать, как будто здесь образуется волна,двигающаяся в направлении не от вибратора, а к нему, т.е. отражается от 5-ти метровой зоны (возрастание фазы прекращается точно в 5-ти метровой зоне, см. рис. 1, 2), скорость отраженной волны около 50 м/с,
- на расстоянии, большем 5-ти метров, фаза X и Y колебаний начинает синхронно плавно уменьшаться, показывая, что осуществляется режим бегущей волны, причем в этом

режиме, в отличие от колебаний внутри 5-ти метровой зоны, фаза вертикальных колебаний опережает фазу колебаний горизонтальных, вращение частиц грунта происходит против часовой стрелки (рис. 2),

- инфразвуковая волна несколько «отстает» от основного колебания платформы вибратора и распространяется как бегущая волна на всем промежутке расстояний, её амплитуда экспоненциально уменьшается, не испытывая никаких особенностей в 5-ти метровой зоне.

При различных измерениях величины незначительно варьировали, но, в целом, аналогичная картина наблюдалась во всех экспериментах, на всех типах вибраторов. Если перечисленные условия не выполнялись, эффекта ПМ массы не возникало (1-в и 1-г). Частота излучения вибратора в этих экспериментах была, как правило, 6.25 Гц, что соответствует длительности периода колебаний $2\pi = 160$ мсек., а $\pi/2 = 40$ мсек. Сдвиг между фазами сейсмических вертикальных и горизонтальных колебаний менялся на различных расстояниях от вибратора, в зависимости от того, «работал» вибратор с ПМ или без неё. Разности амплитуд (-Y) и фаз (-X, -Y) колебаний частиц грунта, измеренные в различных режимах (с ПМ и без неё), показаны в нижней части рис. 2. Возможно, они характеризуют присоединенную массу как источник поверхностных волн.

Многочисленные оценки скоростей этих сейсмических колебаний показали, что по грунту в непосредственной близости от вибратора распространяется волна со скоростью, близкой (возможно, равной) к скорости звука в воздухе. Амплитуда колебаний грунта, распространяющихся со скоростью звука, быстро уменьшается с увеличением расстояния от вибратора, и примерно в 100 метрах от него – регистрируется медленная волна, скорость которой $V_1 = 270$ м/с. Чуть дальше, на расстоянии от вибратора около 200 м, проявляется более быстрая сейсмическая волна, скорость которой $V_2 = 1400$ м/с. Эти данные получены при корреляционном приеме сигнала в режиме изменения частоты вибратора.

Обсудим полученные результаты. Выделим три взаимосвязанных результата. Во-первых, это возникновение эффекта присоединенной массы, во-вторых, - генерация сейсмической поверхностной волны, распространяющейся со скоростью звука в воздухе. В третьих, эффект усиления амплитуды колебаний, по мере удаления от пяти метровой зоны. Можно назвать две причины возникновения этого (третьего) эффекта. Одна, это результат работы ПМ, другая связана с взаимодействием поверхностных сейсмических и акустических волн (air-coupled surface wave). В этом случае усиление горизонтальной компоненты происходит за счет передачи энергии поверхностной волне от акустической волны, распространяющейся в фазе с поверхностной волной. Такие эффекты реально наблюдались в природе, несмотря на то, что плотность воздуха на три порядка меньше плотности грунта.

Образование присоединенной массы (первый эффект) – явление, известное в гидродинамике [11]. Естественно, среда, в которой возникает ПМ, должна быть жидкой, по крайней мере, - пластичной. Прежде чем рассматривать роль эффекта ПМ в нашей задаче, следовало бы привести убедительные аргументы принципиальной возможности перехода грунта в «жидкое», пластическое состояние. Физику перехода грунта в пластическое состояние здесь мы не рассматриваем. Этому вопросу посвящена отдельная работа. Можно только сказать, что подобное явление – возникновение эффекта «разжижения» грунта хорошо известно в строительной практике, например, при ритмичной забивке свай. Возможно, возникновение эффекта «разжижения» обязано т.н. эффекту Баушингера, который состоит в том, что при выполнении определенных условий, эффект пластичности («разжижения», когда ϵ очень слабо зависит от σ) достигается при циклическом нагружении среды. Поэтому, можно полагать, что при периодическом воздействии вибратора на грунт, грунт переходит в «жидкое», пластическое состояние, которое характеризуется эффектом ПМ. По-видимому, возможна и такая ситуация, когда

грунт становится пластичным, но эффекта ПМ нет, например, за счет того, что нагружение среды не строго вертикально, как это наблюдалось при работе ЦВ-30 с одним дебалансом.

Факт возникновения поверхностной волны, распространяющейся со скоростью, равной скорости звука в воздухе $V_A = 333$ м/с (второй эффект), регистрировался только на Быстровском полигоне. Рассмотрим возможные механизмы, которые могут приводить к возникновению этого явления. Наиболее естественной представляется идея, согласно которой, эта скорость – ни что иное, как известная в физике взрыва «пластическая» скорость V_V , определяемая из известного соотношения: $V_V^2 = V_P^2 - 4/3V_S^2$. Скорости Р- и S-волн измеренные на грунте Быстровского полигона известны, тогда, по формуле, $V_V = 310$ м/с. Для того, чтобы скорость V_V была бы точно равна 333 м/с, V_P должна быть, например, на 20 м/с больше ($V_P = 390$ м/с, вместо 370 м/с [2]), что находится в пределах точности измерений.

Надо сказать, это не единственный, возможный способ «получить» поверхностную волну в грунте, распространяющуюся со скоростью 333 м/с. Рассмотрим слой грунта на фундаменте как «пластину» толщиной $h \sim 10 - 15$ м [2] (рис. 2). В такой «пластине» может быть возбуждена волна Лэмба, скорость распространения которой больше чем скорость волн Рэлея $V_R \approx 0.9V_S$. Заметим, что, строго говоря, волны Рэлея могут распространяться только на границе полупространства, чего реально не существует, поэтому эти волны правильнее называть квазирэлеевскими.

Как известно, волны Лэмба бывают симметричные (s) и антисимметричные (a). В зависимости от толщины пластины, скорость волн Лэмба нулевого порядка, представляющих собой продольную (s_0) и изгибную (a_0) волны, асимптотически стремится к скорости рэлеевских волн V_R [12, 13]. Волны Лэмба порядка выше нулевого проявляются только при некоторых "критических" значениях параметра $\omega h/V_S$. При докритических величинах параметра, в этих волнах нет потока энергии, и они представляют собой движение, быстро затухающее вдоль пластины. При критических значениях этого параметра волны Лэмба представляют собой стоячие волны. При очень больших величинах $\omega h/V_S$ фазовые и групповые скорости волн Лэмба в пластине так же приближаются к скорости V_R . Существует некоторая область значений параметра $\omega h/V_S$, при которых возможно существование обобщённых волн Лэмба высшего порядка, распространяющихся со скоростями, большими V_R .

Обобщенные волны Лэмба излучаются с помощью т.н. механизма «черенковского» излучения [12]. Надо сказать, что здесь используется формальная аналогия с известным в электродинамике эффектом. Аналогия построена на взаимодействии между волновыми полями. Это взаимодействие возможно лишь в том случае, если каждое волновое поле излучается независимо друг от друга, и волна (сейсмическая и акустическая) несет в себе определенную энергию. В случае совпадения частот (в наших экспериментах это очевидно) и скоростей волн, такое взаимодействие может происходить на поверхности, разделяющей эти поля. Вдоль этой поверхности бежит акустическая волна со скоростью, большей, чем скорость сдвиговых волн в грунте. Это явление приводит к возникновению эффекта излучения волн пластиной. Используя некоторую формальную аналогию: движение частицы со скоростью, большей, чем местная скорость сейсмических волн, такое излучение авторы книги [12] назвали «черенковским». В пластине толщиной h при выполнении условия: $\omega h/V_S \sim 1$, в принципе, могут распространяться сейсмические волны Лэмба со скоростями, большими, чем у рэлеевских волн и равными скорости звука.

В наших экспериментах: скорость сдвиговых волн в рыхлом грунте $V_S = 180$ м/с (V_R несколько меньше, ≈ 160 м/с), частота работы вибратора $\omega \sim 6 - 7$ Гц, толщина рыхлого грунта (толщина пластины) меняется в пределах 10–15 м, следовательно, условие $L = \omega h/V_S \sim 1$, почти выполняется.

Рассмотрим работу сеймовибратора в фазе сжатия, когда он производит вертикальное нагружение грунта (стрелка под вибратором на рис. 2). При этом в воздухе возникает волна разрежения (стрелки, направленные в сторону, противоположную распространению акустической волны показывают разрежение в волне). В некоторой области пространства под вибратором, выше прочного и высокоскоростного фундамента, может возникнуть область (ПМ), в которой происходит сжатие среды. Предположим, что область ПМ представляет собой сферу радиусом R (порядка 6 м) и будем рассматривать её как источник сейсмических волн (круг ПМ на рис. 2), тогда поверхностная волна от этого источника будет иметь фазу (Y), противоположную фазе поверхностной волны, генерируемой сеймовибратором. Однако эта волна будет находиться в фазе с акустической волной. В такой ситуации возможна перекачка акустической энергии в энергию поверхностной волны. Надо заметить, что эффект ПМ может возникнуть только при наличии фундамента. В противоположном случае, вертикальные колебания грунта будут «вынесены» сейсмической, объемной волной в более глубокие горизонты и эффекта ПМ может не возникнуть. Отсутствие фундамента «не позволит» возникнуть и волне Лэмба, для образования которой необходимо наличие четких границ у «пластины», в которой она образуются. Более того, ширина пластины (толщина слоя грунта) играет решающую роль в том, какой может быть скорость волны Лэмба.

Каким же образом происходит раскачка колебаний «пластины» так, что она становится акустическим излучателем [10]? Не может же инфразвуковой сигнал, падая на «пластину», сам себя усилить, если нет дополнительного источника накачки мощности в систему? Рискнем ответить на эти вопросы, для чего предположим, что в этом эксперименте мы имеем дело с параметрическим усилением. При этом за счет нелинейности среды происходит преобразование (например, комбинационное рассеяние [13]) мощных колебаний с частотами накачки ω_1 и ω_2 , таким образом, чтобы частота, на которой происходит усиление (генерация) сигнала с частотой ω_3 , соответствовала разности: $\omega_3 = \omega_1 - \omega_2$. Прямо этот метод не подходит к нашему случаю, так как частота в наших экспериментах, это частота вибратора. Однако, как показано в [13], взаимодействие волн (фононов) в среде может реализовываться не только путем подбора колебаний с соответствующими частотами, а и путем подбора соответствующих волновых чисел: $k_3 = k_1 - k_2$, здесь: $k = \omega/V$, или $1/V_3 = 1/V_1 - 1/V_2$. Если принять $V_1 = 270$ м/с, а $V_2 = 1400$ м/с, то $V_3 = 333$ м/с - скорость звука. Волны, распространяющиеся со скоростью 270 и 1400 м/с регистрировались в наших экспериментах, однако природа их пока остается неясной. Причиной генерации инфразвука в «пластине» может быть параметрическое усиление волны (распространяющейся со звуковой скоростью), за счет накачки среды двумя достаточно мощными колебаниями (со скоростями 270 и 1400 м/с). Приняв этот гипотетический механизм, можно оценить размер 5-ти метровой области $R \approx 2h \cdot 270/1400$, отсюда $h \sim 13$ м, что соответствует оценкам толщины рыхлого слоя, приведенным в [2]. Однако, при этом, конкретный механизм взаимодействия (сцепления) инфразвуковой волны с волной поверхностной - сейсмической (air coupled surface wave), остаётся недостаточно ясным.

Эксперименты с сеймовибраторами как источниками «трясения земли» показали их важность для понимания физики волновых явлений различной природы. Несмотря на сравнительно простую схему экспериментов, некоторые полученные результаты неоднозначны и не всегда объяснимы, что наверняка говорит о сложности природных явлений сопутствующих землетрясению.

Благодарю С.Ю.Хомутова и В.Т.Гуляева - за участие в проведении экспериментов, В.И.Юшина - за помощь и обсуждение результатов, В.Н.Кашуна, В.А.Свириденко, Б.М.Глинского, В.В.Ковалевского и др. – за помощь в проведении экспериментов.

Литература

1. Еманов А.Ф., Селезнев В.С., Соловьев В.М. и др. // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 3. С. 474-486.
2. Манштейн А.К., Куликов В.А., Эпов М.И., Нефедкин Ю.А. // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 3. С. 465-473
3. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Дряхлов С.И. и др. // ДАН. 1996. Т. 346. № 5. С. 664-667.
4. Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 3. С. 431-441.
5. Юшин В.И., Егоров Г.В., Сперанский Н.Ф., Астафьев В.Н. // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 9. С.156-165.
6. Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Хомутов С.Ю. и др. // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 3. С. 442-456.
7. Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Хомутов С.Ю. // ДАН. 2000. Т. 370. № 2. С. 243-248.
8. Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Khomutov S.Y. // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26. P. 2017-2020.
9. Kuznetsov V.V., Plotkin V.V., Khomutov S.Y. et al. // Phys. Chem. Earth (A). 2000. V. 25. № 3. P.325-328.
10. Гуляев В.Г., Кузнецов В.В., Плоткин В.В., Хомутов С.Ю. // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 3. С. 303-312.
11. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. М.: Наука. 1986. 736 с.
12. Красильников В.А., Крылов В.В. Введение в физическую акустику. М.: Наука. 1984. 400 с.
13. Викторов И.А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. М.: Наука. 1981.