

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ИСПЫТАНИИ АТОМНОЙ БОМБЫ *).

Л. Дон Лиит.

При испытании атомной бомбы в долине Хорнадо дель Муэрте (Нью-Мексико) 16 июля 1945 г. были получены записи колебаний почвы, принадлежащие к наиболее важным в истории сейсмологии.

Сейсмограф



Поперечные
влево вправо

Продольные
вперед назад



Взрыв

Рис. 1. Диаграмма, иллюстрирующая терминологию для горизонтальных смещений.

Некоторые данные, например о расстоянии и абсолютном смещении, пока не сообщаются, но они не имеют значения для основных результатов.

Приводимые в этой статье сейсмограммы были получены на трёхкомпонентном сейсмографе Лиита¹, несколько реконструированном для этой цели; прибор этот позволяет получать фотографическую запись всех трёх компонент смещения почвы.

Три линии на сейсмограммах отмечают: одна — продольное смещение, т. е. горизонтальное движение в направлении сейсмического луча; другая — поперечное, представляющее горизонтальное смещение, перпендикулярное к продольному; третья — вертикальное смещение.

Терминология, принятая для обозначения смещений относительно этих осей, указана на рис. 1. Сейсмограмма, снятая при испытании атомной бомбы, показана на рис. 2. Абсолютные амплитуды смещения на рис. 2 не указаны, но величина относительных смещений воспроизведена точно.

ВОЛНЫ

Волны в земной толще составляют основной предмет сейсмологии. Они являются для неё тем же, чем электромагнитные волны для радио и звуковые для акустики.

Несмотря на это, литература по данному вопросу поразительно бедна количественными наблюдениями относительно типов волн, распростра-

*) American Scientist, 34, April 1946 г. Перевод С. И. Крежмера.

няющихся в почве. Это обусловлено, с одной стороны, молодостью этой науки, а с другой — трудностями контроля условий в источнике волн, создаваемых при эксперименте.

Землетрясения, конечно, относятся к разряду неконтролируемых источников. Искусственные взрывы очень удобны, хотя некоторые из

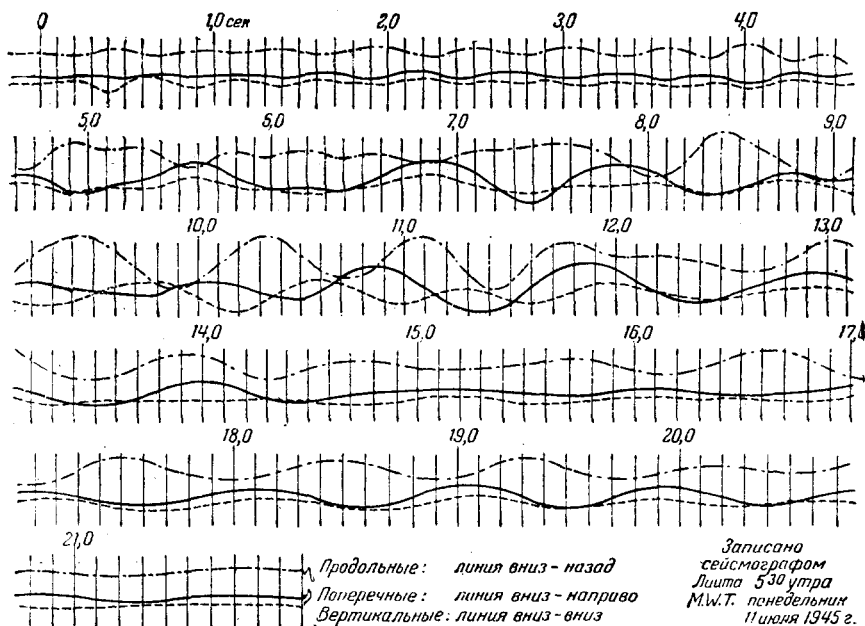


Рис. 2. Запись смещений почвы при испытании атомной бомбы, произведённом в Хорнадо дель Муэрте (Нью-Мексико) 16 июля 1945 г. Схема для различения типов волн см. рис. 9.

руководящих теоретиков пытались дискредитировать их, считая, что они дают простые радиально симметричные усилия, исходящие из одной точки, и являются, таким образом, слишком специальным случаем, чтобы создавать все возможные типы волн.

Такое утверждение обосновывалось теоретически, но не согласуется с наблюдениями.

Два из основных типов волн хорошо известны науке как теоретически, так и из наблюдений: это — объёмные волны, распространяющиеся в самой упругой среде, в отличие от поверхностных волн, распространяющихся на границе свободной поверхности. Один из них состоит из чередующихся сжатий и разрежений; это — продольная волна или волна сжатия того же типа, который переносит звук в воздухе. В сейсмологии этот тип волн обозначается символом «Р», так

как эти волны приходят первыми при землетрясениях и были названы «*Undae Primae*».

Если K — объёмный модуль упругости, M — модуль сдвига и ρ — плотность, то скорость P -волн может быть выражена как

$$V_P = \frac{\sqrt{K + \frac{4}{3}M}}{\rho}.$$

Второй тип сейсмических волн — волны сдвига; это — поперечные волны. При землетрясениях они приходят к месту наблюдения после волн сжатия и были названы «*Undae Secundae*», получив у сейсмологов символ « S ». Скорость S -волн выражается формулой

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}.$$

Теория показывает, что волны в земле должны быть упругого типа, что земное тяготение не влияет на волны сдвига (S), а его влияние на волны сжатия (P) сказывается во втором порядке ^{2,3}.

Ценным вкладом в теорию упругости и упругих волн явилась работа лорда Рэлея⁴, указавшего, что на границе упругой среды должны иметь место особые волны. Эти волны получили название волн Рэлея.

Работа Рэлея опубликована в 1885 г., однако полное экспериментальное доказательство существования этих волн было опубликовано только в 1931 г.⁵.

Совпадение между наблюдением и классической теорией оказывается в значительной мере качественным даже для волн сжатия и сдвига (P и S).

Во время прихода волн сжатия (P) на сейсмическую станцию преобладает смещение в продольном и вертикальном направлениях, а во время, соответствующее приходу поперечных волн (S), обычно, но не всегда, преобладают поперечные колебания. Исключения весьма часты.

В 1904 г. Лемб⁶ опубликовал решения уравнений упругой волны, из которых он получил вид волны в удалённой точке, вызванной единичным импульсом, приложенным вертикально к земной поверхности. Рисунки 3 и 4 изображают результаты его расчётов.

Среди заключений Лемба было такое: «Следует признать, что наши теоретические кривые в двух отношениях сильно отличаются от записей сейсмографов. Прежде всего они не дают ничего похожего на последовательный ряд продольных колебаний, который характерен для сейсмограмм. Повидимому, такие данные, поскольку они достаточно надёжны и не обусловлены искажениями прибора, должны быть приписаны ряду последовательных импульсов, что само по себе достаточно правдоподобно. Эта трудность, на которую наталкивается почти любое теоретическое объяснение, ясно сознаётся сейсмологами, которые, поэтому, склонны сомневаться в достоверности в этом отношении записи их аппаратов.»

Рассматривая рис. 4, следует отметить, что найденное Лембом решение уравнений упругости предсказало, что от вертикального удара в удалённую точку в точку наблюдения должна проходить сперва волна сжатия (P), за которой следует интервал покоя, затем волна сдвига (S) и, наконец, рэлеевская волна. Каждая из них должна была бы являться единичным импульсом. Наблюдаемые на сейсмограммах длительные колебания Лемб объяснял либо рядом последовательных импульсов, либо несовершенством приборов, склоняясь к последнему предположению.

16 июля 1945 г. условия, из которых исходил в своей теории Лемб, были впервые осуществлены экспериментально. Ориентированный трёхкомпонентный сейсмограф имел магнитное затухание около 0,7 критического, так что не могло быть и речи об искажениях, вызываемых собственными колебаниями прибора.

Источником был один простой мгновенный вертикальный удар по почве, произведённый взрывом атомной бомбы на высоте 100 футов; таким образом не было ряда импульсов, могущих объяснить не предусмотренные теорией колебания.

Сравнивая рис. 2 с рис. 4, можно увидеть отличие теории от наблюдений.

АНАЛИЗ ТИПОВ ВОЛН

Расшифровка сейсмограмм основана на анализе движения частицы почвы при прохождении волн. Для некоторых из волн смещение частицы происходит только в вертикальной плоскости, и результаты могут быть легко изображены. Если это не соблюдается, то одной.

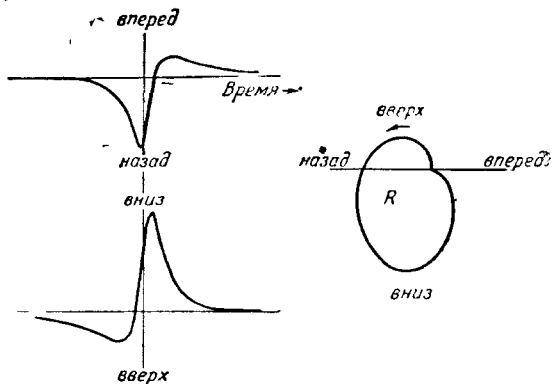


Рис. 3. Волны Рэля, вычисленные Лембом; продольная и поперечная записи и орбита частицы земли.

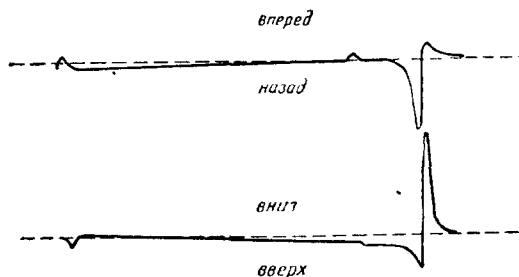


Рис. 4. Вычисленное Лембом смещение почвы; продольная и вертикальная записи на некотором удалении от вертикального источника сотрясения.

из основных проблем является определение по записи, какие именно из компонент вовлечены в движение одной и той же волной. В основу этого определения кладётся допущение, что компоненты, вовлечённые в движение волной определённого типа, должны обладать одинаковым периодом и обычно также близкими амплитудными изменениями. Но имеются несомненные случаи, когда амплитуда и период поперечной компоненты отличаются от двух других компонент. В таких случаях наиболее вероятной причиной поперечного движения является независимая поперечная волна.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При исследованиях записей сейсмических станций необходимо использовать землетрясения, которые случайно произошли в одном из направлений ориентации горизонтальных сейсмографов, т. е. обычно в меридиональном или широтном направлении от станции. Так и было сделано при определении отмеченных выше свойств рэлеевской волны⁵. Двумя годами позже Масельвейн указал⁷: «Повидимому, несомненно, что сложные поверхностные волны, которые мы наблюдаем, даже приблизительно не соответствуют рэлеевской теории и что термин „рэлеевская волна“ в применении к ним является недоразумением».

В развитие этой мысли он пишет: «Нужно заранее считать решённым утвердительно вопрос о существовании настоящих рэлеевских волн для того, чтобы иметь право утверждать, как сделал это Гутенберг, что сейсмограф, регистрирующий вертикальную и продольную компоненты, записывает только рэлеевские волны, в то время как колебания, одновременно записанные поперечным сейсмографом, будут поверхностными волнами сдвига. Такое же допущение, повидимому, было сделано Лиитом, который выражает уверенность в точности нанесения вектора в плоскости распространения волны и в то же время подвергает сомнению результат построения в горизонтальной плоскости, так как при этом в течение практически всего времени имеется „поперечная компонента неизвестной величины“». Приведённая в конце этой выдержки цитата из Лиита разъясняет, что для отделения продольной и поперечной компонент необходимо, чтобы горизонтальные сейсмографы были точно ориентированы относительно направления прихода волны.

Полностью эта выдержка гласит: «Представляется ясным, что ни одна слагаемая горизонтальной записи волны, азимут прихода которой не совпадает с азимутом ориентации прибора, не может с уверенностью приписываться *R*-волнам; всегда в наличии имеется поперечная компонента независимой величины».

Сказанное не имеет никакого отношения к вопросу о существовании или несуществовании волны Рэлея при землетрясениях. Вопрос о том, что результат наблюдений при землетрясениях описывается волнами Рэлея точно или с достаточным приближением, был решён утвердительно, хотя, очевидно, изложение автора не было ясным.

Так мы подошли к 1933 г. с гутенберговским утверждением о существовании волн Рэля при землетрясениях, наблюдениями Лиита, требующими проверки, и уверенностью Масельвейна в положительном разрешении этого вопроса. Получение дальнейших данных стояло в порядке дня.

Следующее исследование было выполнено при помощи контролируемых динамитных взрывов. Волны регистрировались в трёх направлениях, и горизонтальные компоненты были ориентированы в продольном и поперечном направлениях.

Результаты были опубликованы в 1939 г.⁸ Наиболее важным из них, коротко говоря, было доказательство возникновения при взрыве динамита следующих поверхностных волн:

1. Рэлеевская волна «R».
2. Поверхностная волна сдвига «Q» или волна Лава (Lave).
3. Связанная волна, или «C-волна».

Из них первые две известны в теории. Связанная волна, или «C-волна», не наблюдалась и не предсказывалась ранее.

1. Рэлеевская волна R. Частица под действием этой волны движется по эллиптической орбите в соответствии с теорией, малая ось — продольная, а большая — вертикальная. В верхней части своей эллиптической орбиты частица движется по направлению к источнику, так что это её движение было названо обратным.

Таким образом при прохождении волны частица движется в последовательности: вперёд, вверх, назад, вниз.

Соотношения величин и скоростей смещения (рис. 5) позволили установить, что это действительно волна Рэля. В данном случае поперечное движение отсутствует или так нерегулярно, что, очевидно, не связано с продольной и поперечной волнами. Исходя из этого и многих других наблюдений, следует считать, что волна Рэля действительно существует.

2. Поверхностная волна сдвига Q или волна Лава. Теория поверхностной волны сдвига без вертикальной компоненты была разработана британским математиком А. Е. Лавом⁹. Некоторые сейсмологи называют эту волну волной Лава, другие же предпочитают обозначать её Q-волной (от *Querwellen* — поперечные волны), не связывая её с повторным внутренним отражением, которого требует теория Лава. Семь записей на рис. 6 показывают развитие формы волны на рас-

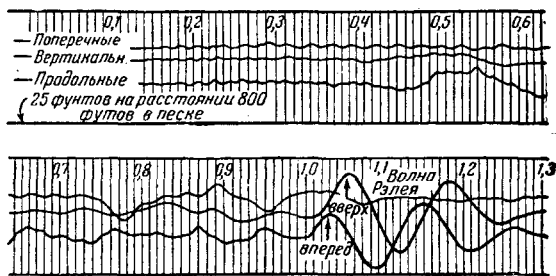


Рис. 5. Запись волн Рэля.

стоянии от 550 до 1000 футов от места динамитного взрыва. Это расстояние достаточно, чтобы обнаружить Q как особую независимую волну, имеющую только поперечную компоненту. На расстоянии 900 футов она выражена лучше и яснее видна независимость её движения от колебаний в двух других компонентах, а также она менее

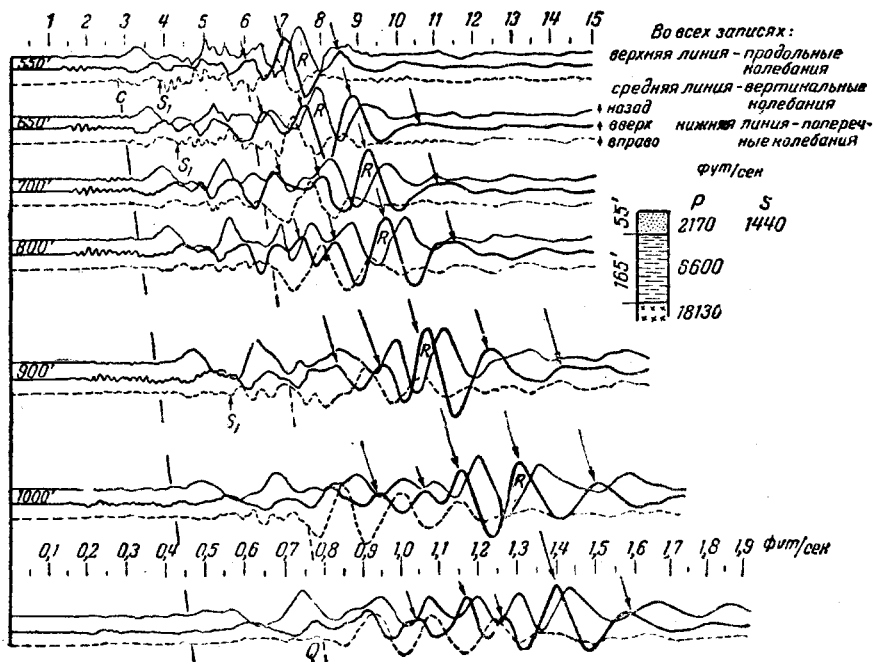


Рис. 6. Экспериментальные кривые, иллюстрирующие типы волн.

осложнена частичным перекрытием с объёмными волнами сдвига. Проследивание в обоих направлениях от 900 футов требует небольшого воображения, так как условия немного сложнее. Здесь, как и в других местах, Q характерно отличается тем, что группа начинается с максимальной амплитуды, переходя в конце к меньшим амплитудам и более коротким периодам. Рэлеевская волна на рис. 6 отличается тем, что с увеличением расстояния максимальная амплитуда отстаёт от движения фронта группы волн.

3. Связанная волна. Эта волна, не предсказанная обычной теорией упругости, была впервые обнаружена в 1939 г.⁸. С тех пор ей не уделяли внимания. На рис. 6 она обозначена S . Особенность её в том, что частица движется вдоль диагонали прямоугольного параллелепипеда, ориентированного в продольном направлении. Результа-

том этого движения является одновременность максимумов и минимумов для всех трёх компонент. На рис. 6 видно её движение (вправо, вверх, вперёд, влево, вниз, назад).

ТИПЫ ВОЛН НА РАССТОЯНИИ 200 ФУТОВ

Предварительный опыт с зарядом 200 фунтов обычного высокобризантного взрывчатого вещества, произведённый перед испытанием атомной бомбы с целью проверки цепей управления на расстоянии, даёт интересную картину формы волны на расстоянии 200 футов от взрыва. Запись показана на рис. 7. Орбиты частицы при начальной волне сжатия и в течение прохождения R -волны показаны на рис. 8. Q -волна хорошо выражена. Её приход после R на этой короткой дистанции можно было предвидеть из рис. 6.

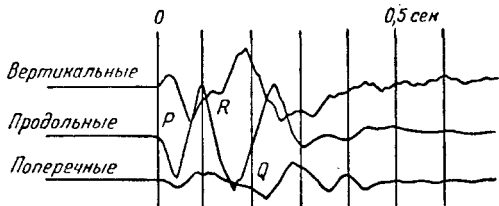


Рис. 7. Запись колебаний почвы на расстоянии 200 футов от места взрыва 200 фунтов высокобризантного взрывчатого вещества. Долина Хорнадо дель Муэрте.

ТИПЫ ВОЛН ПРИ ЗАПИСИ ВЗРЫВА АТОМНОЙ БОМБЫ

Основные выводы о типах волн, записанных при взрыве атомной бомбы и представленных на рис. 2, даны на схеме рис. 9. На рисунках 10—13 все они (за исключением чистых поперечных волн) показаны в порядке времени прихода сглаженными диаграммами орбит частиц.

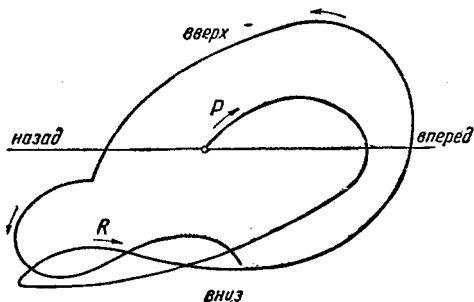


Рис. 8. Орбита частицы при колебаниях почвы на расстоянии 200 футов от места взрыва 200 фунтов взрывчатого вещества. Воспроизведено по записи рис. 7.

P_2 является обычной объёмной волной сжатия. По кажущемуся углу прихода волнового фронта, а также по данным о скоростях, полученным из других источников, можно установить, что эта первая волна преломилась в среде, в которой скорость распространения больше, чем

у поверхностного слоя. Символу P соответствует этому дан индекс 2, указывающий прохождение через второй слой. Данных, доказывающих, что это второй, а не третий, четвёртый или пятый слой, нет, но это неважно для нашей настоящей цели.

Предполагается, что P_1 является объёмной волной сжатия, которая распространялась в слое 1, т. е. у поверхности почвы. Кажущийся угол прихода для неё заметно более пологий, чем для P_2 .

S_2 является независимой поперечной волной, которую следует считать преломлённой объёмной волной, судя по её скорости и периоду.

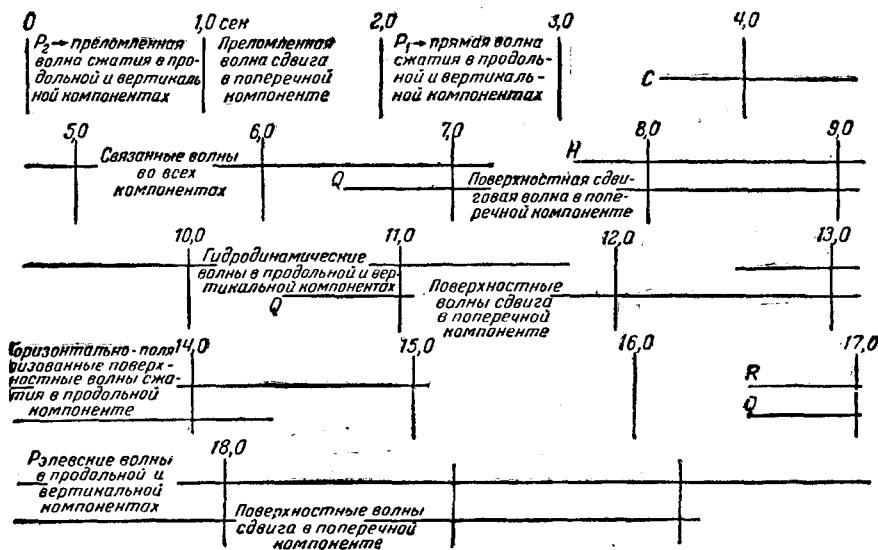


Рис. 9. Схема к рис. 2 для идентификации типов волн.

Следует заметить, что поперечное движение существовало с самого начала записи. Это неоднократно наблюдалось и при других экспериментах, но часто могло быть приписано не совсем точному расположению сейсмографов.

В данном случае поперечное колебание, приходящее одновременно с P_2 , является настолько значительным, что объяснение его неточной ориентировкой весьма сомнительно. Вполне возможно, что в ближайшем будущем будут накоплены наблюдения о поперечной волне со скоростью, соответствующей продольной волне; они потребуют детального разбора.

C — связанная волна — была коротко описана выше, а движение частицы при её прохождении показано на рис. 11. Это — новая волна, обнаруженная впервые в 1939 г. При взрыве атомной бомбы волна эта оказалась двойной. Имеется волна C с периодом около 0,4 сек., приходящая в то же самое время и существующая с волной, обладающей периодом 1,0 сек. Движение было влево, вверх, вперёд — вправо, вниз, назад.

Q — поверхностная волна сдвига — появляется как раз тогда, когда продольная и вертикальная компоненты волны C затухают. Другие похожие группы Q начинаются примерно на 10,5 и 16,5 сек.

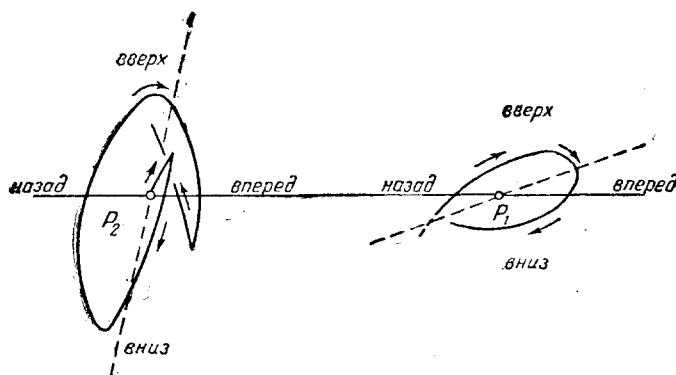


Рис. 10. Орбиты частицы при прохождении волн P_2 и P_1 .

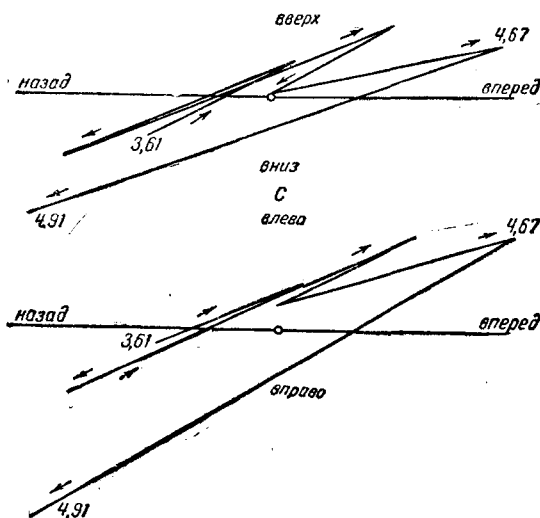


Рис. 11. Орбиты частицы при прохождении связанных волн C . Верхняя — продольная, вертикальная плоскость, нижняя — горизонтальная плоскость. Числа в точках излома указывают время в секундах, прошедшее после появления P_2 .

Волна H появляется около 8-й секунды (рис. 2). Это — новая волна в сейсмологии. Она заставляет двигаться частицу в продольно-

вертикальной плоскости совершенно независимо от поперечных смещений. Исключительным и важным обстоятельством в этом движении является то, что оно противоположно по сравнению с движением частицы при прохождении рэлеевской волны, и в верхней части наклонной эллиптической орбиты происходит смещение вперёд, как для частицы при распространении волны на поверхности воды.

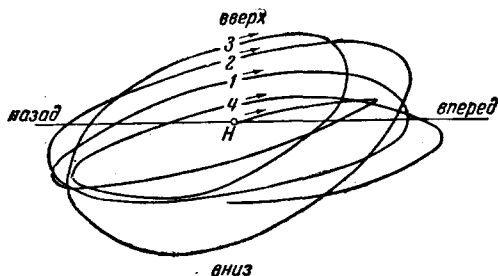


Рис. 12. Орбита частицы при прохождении гидродинамической волны H .

По этой причине она была названа гидродинамической волной и пока обозначена H . Орбита частицы схематически показана на рис. 12. Есть основание считать, что возникновение такой волны, как H , объясняется особыми свойствами почвы в Хорнадо

дель Муэрте (аллювиальные пески и гравий). К сожалению, в данный момент точные данные о толщине этого слоя неизвестны. Предположительно — это скорее несколько сотен, чем десятков футов.

Другой пример удачно записанной H -волны приведен на рис. 14. Эта запись была сделана на той же площадке для испытаний, на которой получены данные, приведенные на рис. 6. Из сейсморазведки преломленными волнами и бурения известно, что верхняя часть разреза почвы состоит из поверхностного слоя в 55 футов песка, лежащего на слое в 165 футов глины.

На рис. 12 и 14 можно заметить, что у H горизонтальная компонента преобладает над вертикальной и что большая ось эллиптической орбиты наклонена к горизонтальной плоскости под острым углом.

R — рэлеевская волна — вызывает движение частиц по орбите, показанной на рис. 13, в течение времени, указанного на рис. 9.

Отношение вертикальной компоненты к горизонтальной у R больше, чем у H , но всё же не достигает классического отношения $\frac{\text{вертикальная}}{\text{горизонтальная}} = \frac{1,5}{1}$. R показано совместно с H на записи, представленной на рис. 14.

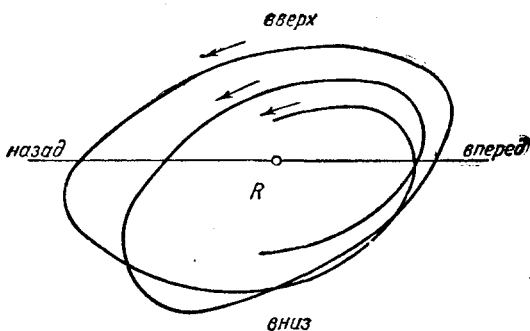


Рис. 13. Орбита частицы при прохождении рэлеевской волны R .

ВЫВОДЫ

Испытания атомной бомбы в Нью-Мексико 16 июля 1945 г. впервые в точности воспроизвели экспериментально при больших амплитудах условия, требуемые теорией Лемба (1904 г.). Лембом было дано решение уравнения упругости, описывающее смещение почвы в точке, удаленной от места, где к поверхности земли при-

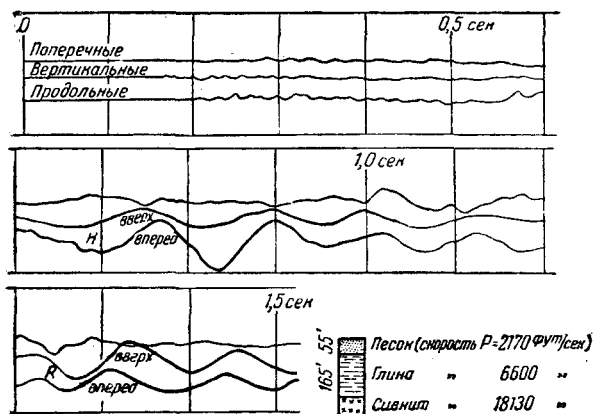


Рис. 14. H -волны и R -волны, возникшие при взрыве небольшого динамитного снаряда.

ложен вертикальный импульс. Смещение почвы регистрировалось демпфированным трёхэлементным сейсмографом с ориентированными горизонтальными компонентами. Результаты наблюдения существенно и значительно отличаются от предсказания теории. Один ранее описанный тип волн (сдвоенные волны), не предусмотренный теорией, несёт заметную долю энергии всех волн. Другой (гидродинамические волны) не был обнаружен или предсказан ранее. Эти волны вызвали самые большие по амплитуде смещения на записи.

Продольные и поперечные объёмные рэлеевские и поверхностные волны сдвига были также идентифицированы. Эта запись представляет собой важнейшее достижение в деле решения сейсмической проблемы — установления наблюдением типов волн, распространяющихся в земле, — одной из основных проблем этой науки.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Leet L. D., Trans. Amer. Geophys. Union 26, ч. I, стр. 33—36.
2. Macelwane James B. L., Theoretical Seismology, John Wiley & Sons, New York (1936).
3. Love A. F. H., Treatise on the Theory of Elasticity, Cambridge University Press (1892).
4. Rayleigh Lord, On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid, Proc. of the London Math. Soc. 17, стр. 4—11 (1885).

5. Leet L. D., Publications of the Dominion Observatory Ottawa 7, № 6, стр. 263—322 (1931).
6. Lamb Horace, Phil. Trans. Roy. Soc. London, A, 203, 1 (1904).
7. Macelwane James B. L. J., Earthquake Surface Waves, Bulletin № 90 of the National Research Council (1933).
8. Leet L. D., Bulletin of the Seismological Soc. of America 29, стр. 487—496 (1939).
9. Love A. E. H., Some Problems of Geodynamick, Cambridge University Press (1911).

К статье Дон Лиита «Сейсмические явления при испытании атомной бомбы»

Распространение сейсмических волн в земле представляет собой очень сложное явление. Как известно из классической теории упругости, на которой базируется теоретическая сейсмология, в безграничной упругой однородной среде возможно одновременное возникновение двух типов упругих волн (продольных и поперечных), распространяющихся с различными присущими им скоростями, зависящими от физических свойств среды. Любая граница, вдоль которой соприкасаются среды с различными физическими свойствами, сильно осложняет явление, так как при падении на неё упругой волны, наряду с возникновением новых волн (двух преломлённых и двух отражённых) и так называемых «непрямых возмущений» продольного и поперечного типа, образуются ещё особого типа поверхностные волны. Наличие нескольких границ сопровождается явлениями интерференции и дифракции упругих волн. Наконец, обнаруженная при анализе сейсмограмм, а также теоретически дисперсия сейсмических волн во многих случаях обязана своим происхождением отклонению реальных горных пород, слагающих земную кору, от идеальной упругости.

Теоретическая сейсмология уже при изучении колебаний упругого слоя, лежащего на упругом полупространстве, столкнулась с почти непреодолимыми при современном состоянии математического аппарата трудностями, вызванными указанными выше граничными явлениями. Поэтому в настоящее время трудно рассчитывать на эффективный теоретический анализ сейсмических явлений, протекающих в земной коре. В связи с этим попытки чисто экспериментальным путём подойти к исследованию сейсмических волн встречаются сейсмологами с интересом. С этой именно точки зрения следует подойти к публикуемому в журнале переводу статьи американского учёного Дон-Лиита.

Статью можно разделить на несколько частей, имеющих различную значимость.

Дон-Лиитом сконструирована для исследования сейсмических явлений при взрывах надёжная аппаратура, хотя и обладающая невысокой чувствительностью, но, вследствие применённой им непосредственной оптической регистрации, свободная в нужном ему диапазоне пери-

одов от искажений. Синхронная запись на одной ленте трёх компонент смещения позволяет автору полнее и точнее, чем прежним исследователям, следить за движением частицы поверхности Земли при прохождении различных волн, причём наблюдения за углом выхода фронта волн помогают ему выделить преломлённые волны минтроповского типа.

Особый интерес представляет впервые публикуемая, к сожалению только в схематическом виде, запись колебаний от взрыва атомной бомбы.

Несколько смелыми и спорными представляются заключения автора об открытии им новых типов сейсмических волн. Наконец, наивным и неправильным является сделанное автором сопоставление полученной им сейсмограммы при взрыве атомной бомбы с графиком смещений Лемба, вычисленным последним при анализе распространения удара на границе упругого полупространства.

Д. Харин
