

Л. П. ВИННИК

СТРУКТУРА 4—6-СЕКУНДНЫХ МИКРОСЕЙСМ

(Представлено академиком В. В. Шулейкиным 24 XII 1964)

Микросейсм с периодами 4—6 сек, являющиеся серьезной помехой для сейсмологических наблюдений, интенсивно исследуются в течение последних двух десятилетий. Принято считать, что они состоят из интерференционных поверхностных волн типа Рэлея и Лява, возбуждаемых волнением больших водных масс. Это представление утвердилось в результате многочисленных исследований, проводившихся с помощью различных методов, из которых наиболее надежным является метод тройных станций, позволяющий измерять скорость пробега волн между станциями посредством фазовой корреляции. Однако надежность результатов этого метода ограничена из-за трудностей расшифровки реальной, весьма сложной волновой картины; практически при интерпретации наблюдений тройных станций в явной или скрытой форме используется ряд предположений, не поддающихся проверке в рамках этого метода.

В исследовании, результаты которого излагаются ниже, применена новая для данной проблемы методика, основанная на принципе направленного приема, осуществляемого группой станций. Полевой материал, использованный в работе, был получен в октябре 1961 г. в Восточном Казахстане в районе Усть-Каменогорска. Здесь в течение одного месяца работала временная группа сейсмических станций (рис. 1). Все станции стояли на коренных породах типа гранита или кристаллических сланцев и были оборудованы идентичной аппаратурой: сейсмографами УСФ с собственным периодом 1,5 сек, фотоэлектрическими усилителями Ф 117/3 и гальванометрами ГР-VII с записью на регистриры РС-2 при скорости развертки 240 мм в минуту. Увеличение на 5 сек составляло около 20 000. Результаты, сообщаемые в данной заметке, получены главным образом при обработке записей вертикальных сейсмографов. В течение периода наблюдений происходило монотонное нарастание уровня микросейсм: их среднеквадратичная величина возросла на последней сейсмограмме по сравнению с первой в 4 раза. Для обработки было выбрано 5 сейсмограмм с таким расчетом, чтобы они были как можно более представительными. Землетрясений по данным различных бюллетеней в это время не происходило.

Использованный метод обработки в принципе сводится к суммированию записей отдельных станций с временными сдвигами, линейно зависящими от координат станции на плоскости, и вычислению среднеквадратичного значения этой суммы при различной настройке группы. Порядок вычислений строится несколько иначе. Если обозначить $x(t)$ выход группы, а $x_i(t)$ — запись i -й станции с временным сдвигом или без него, то средний квадрат выхода группы может быть представлен следующим образом:

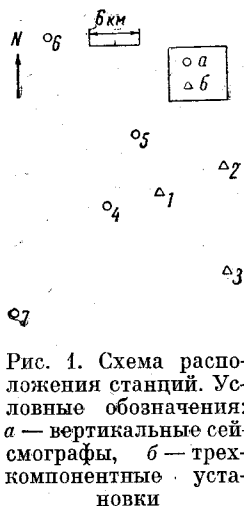


Рис. 1. Схема расположения станций. Условные обозначения: а — вертикальные сейсмографы, б — трехкомпонентные установки

$$\overline{x^2(t)} = \sum_i \overline{x_i^2(t)} + \sum_{i, j, i+j} \overline{x_i(t) x_j(t)},$$

где черта сверху означает осреднение. Первая сумма, составленная из средних квадратов записей различных станций, не меняется в зависимости от настройки группы. Вторая сумма содержит коэффициенты взаимной корреляции между всевозможными парами станций, причем эти коэффициенты, а вместе с ними и вся сумма изменяются в зависимости от настройки группы. Все они известны, если сосчитаны функции взаимной корреляции между записями различных пар станций. Практически мы вначале вычисляли оценки требуемых функций взаимной корреляции

$$R_{ij}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_i(t) x_j(t - \tau) dt,$$

затем нормировали их по правилу

$$\hat{R}_{ij}(\tau) = R_{ij}(\tau) / \sqrt{R_{ii}(0) R_{jj}(0)},$$

после этого вычисляли суммы вида $\sum \hat{R}_{ij}$ и наносили их на корреляционные диаграммы. Для того чтобы от построенной таким способом диаграммы перейти к средним квадратам выхода группы, нужно удваивать величины, взятые с корреляционной диаграммы, и прибавлять к ним число n — количество сейсмографов в группе. Время осреднения при вычислении корреляционных функций составляло 20 мин. Выполняя нормировку функций взаимной корреляции, мы предполагаем, что уровень микросейсм на каждой станции одинаков и существующие различия связаны с некоторым разбросом увеличений регистрирующей аппаратуры. При интерпретации корреляционной диаграммы используются некоторые представления статистической теории группирования и регулируемого направленного приема ⁽¹⁾. Процесс, протекающий во времени и на плоскости (таким процессом и являются микросейсм), характеризуется спектральной плотностью, зависящей от частоты и двух волновых чисел, соответствующих двум пространственным координатам. Так как изучаемый процесс является чрезвычайно узкополосным, то без серьезных натяжек его можно считать монохроматическим и ограничиться анализом спектральной плотности, зависящей от двух волновых чисел и не зависящей от частоты. Если такой процесс интерпретируется как суперпозиция нескольких плоских волн, то возрастание спектральной плотности при некоторых волновых числах означает присутствие волны с этими волновыми числами, от которых просто перейти к азимуту источника и скорости. Так, если на плоскости волновых чисел λ_x и λ_y некоторой волне соответствуют волновые числа λ_x' и λ_y' , то ее скорость v можно определить по формуле

$$v = \omega / \sqrt{\lambda_x'^2 + \lambda_y'^2},$$

где ω — круговая частота. Радиус-вектор точки λ_x', λ_y' при замене осей λ_x и λ_y на x и y указывает направление на источник волны. Группа имеет характеристику направленности, позволяющую пропускать компоненты процесса с одними волновыми числами и подавлять другие. Введение временных сдвигов при суммировании записей отдельных станций позволяет перемещать характеристику направленности по плоскости волновых чисел.

На рис. 2 показана характеристика направленности нашей группы. Кроме основной, центральной области пропускания она имеет побочные области пропускания со значениями 0,3—0,5 (по сравнению с 1 в центральной области). Если в исследуемом процессе имеется некоторая волна, то возрастание значений корреляционной диаграммы будет происходить при попадании волновых чисел этой волны как в основную, так и в

побочные области пропускания характеристики направленности. При этом определение волновых чисел может оказаться затруднительным, в особенности при наличии нескольких волн. Процесс интерпретации корреляционной диаграммы может быть в высокой степени формализован и автоматизирован. При нашей теперешней интерпретации, которая носит преимущественно качественный характер, мы просто перебирали различные возможности и считали максимум, выделяемый на корреляционной диаграмме, основным, если он не мог быть получен в качестве побочного

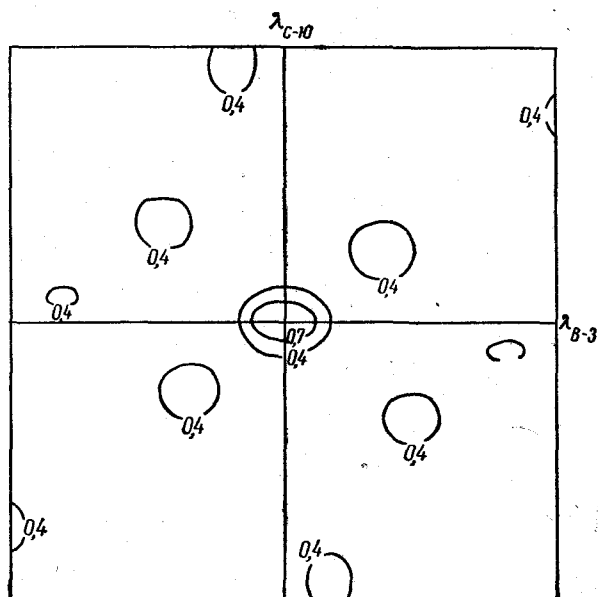


Рис. 2. Энергетическая характеристика направленности группы

по отношению к некоторому другому максимуму. При этом в каждом случае оказалось возможным выделить от одной до трех волн, присутствием которых объясняются все основные особенности соответствующей диаграммы. Эту методику удобно проиллюстрировать на примере диаграммы № 4 (рис. 3).

Диаграмма построена следующим образом: прямоугольные оси координат совпадают с направлениями С — Ю и В — З (если диаграмма служит для определения направления движения волн), эти же оси служат осями соответствующих волновых чисел при операциях с характеристикой направленности; на одной из осей вместо волновых чисел отложены в качестве масштаба непосредственно скорости, пунктиром обозначена зона скоростей 3—4 км/сек, соответствующая поверхностным волнам; область отрицательных значений заштрихована, одинаковые значения соединены изолиниями с шагом в единицу. На диаграмме имеется по крайней мере 5 максимумов, которые потенциально могли бы быть основными максимумами 5 различных волн. Однако сопоставление с характеристикой направленности, которое проще всего осуществить, накладывая диаграмму на характеристику направленности, позволяет выделить лишь одну волну с основным максимумом возле начала координат. Аналогичная методика применяется при анализе остального материала. Для первой оценки энергии выделяемой волны берется наибольшее значение ~~ее~~ основного максимума и делится на $n(n-1)/2$, где n — число станций в группе.

Принципиальный результат, полученный при интерпретации всех корреляционных диаграмм — это постоянное присутствие компоненты со ско-

ростью 10—20 км/сек и энергией, составляющей 0,1—0,4 от полной энергии процесса. Выделяются также волны (но не во всех случаях) со скоростью, близкой к 4 км/сек, которые могут быть поверхностными. Одна-

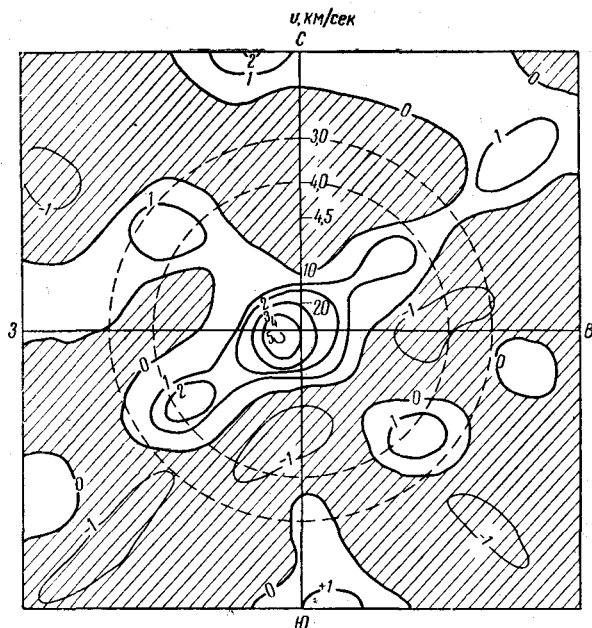


Рис. 3. Корреляционная диаграмма № 4

ко высокоскоростная волна (или группа волн) или превосходит по энергии любую другую выделяемую волну или соизмерима с ней. В сумме все выделяемые волны составляют по энергии не более 50% от полной энергии процесса, остальное приходится на долю нерегулярной компоненты, природа которой пока не ясна. Высокоскоростные волны, судя по тому, что их не удалось выделить на записях горизонтальных сейсмографов, по-видимому, являются в основном продольными. Мы предполагаем, что эти волны имеют то же происхождение, что и остальные компоненты микросейсмического фона; в этом нас убеждает то, что при возрастании энергии микросейсм в 4 раза вклад высокоскоростных волн не испытывал тенденции к понижению.

Автор выражает признательность В. И. Кейлис-Бороку за инициативу в постановке исследования, И. П. Пасечнику, Н. М. Пручкиной, К. А. Коссовой — за помощь в работе.

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта
Академии наук СССР

Поступило
18 XII 1964

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ Л. П. Винник, Изв. АН СССР, сер. геофиз., 6, 850 (1963).