

В. А. ПЕРЕПЕЛИЦА

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ИСТИННОГО
ВИДА
СМЕЩЕНИЯ
«ПОЧВЫ»
ПО СЕЙСМОГРАММЕ**



✓ 367 28

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЗЕМНОЙ КОРЫ

В. А. Перепелица

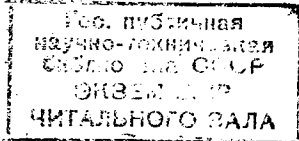
ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ИСТИННОГО ВИДА
СМЕЩЕНИЯ «ПОЧВЫ»
ПО СЕЙСМОГРАММЕ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1974

КОНТРОЛЬНЫЙ ЭКЗЕМПЛЯР



74-36738

Определение истинного вида смещения "почвы" по сейсмограмме. Перепелица В.А. Изд-во "Наука", 1974, 1-77.

Рассмотрены способы решения обратной задачи сейсмометрии для гальванометрического способа регистрации - основного способа, принятого в СССР. Приведено строгое решение при самых общих предположениях о характере движения "почвы" в сейсмической волне. Описан алгоритм, реализующий это решение, и дана программа на языке АЛГОЛ для ЭВМ БЭСМ-4. Приведены результаты расчета истинного смещения по сейсмограммам. Они подтверждают эффективность алгоритма. На примере задачи о выделении обменных волн показана эффективность использования истинных смещений в динамических задачах. Сделан вывод, что при использовании данных наблюдений сейсмографов с гальванометрической регистрацией в динамических задачах можно и нужно применять способ численного интегрирования для получения по сейсмограммам истинного вида смещения "почвы".

Книга рассчитана на специалистов геофизиков, сейсмологов. Таблиц 4, иллюстраций 10, библиогр. 80 назв.

Ответственные редакторы:

доктор физико-математических наук **А.А. ТРЕСКОВ**,
доктор геолого-минералогических наук Ю.А. ЗОРИН

Виктор Андреевич Перепелица

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТИННОГО ВИДА СМЕЩЕНИЯ "ПОЧВЫ"
ПО СЕЙСМОГРАММЕ

Утверждено к печати Институтом земной коры
Сибирского отделения Академии наук СССР

Редактор Е.И. Александрова, Художник С.Б. Генкина
Художественный редактор А.Н. Жданов, Технический редактор Г.П. Каренина
Подписано к печати 13/IX-74 г. Т - 13236. Усл.печ.л. 4,75. Уч.-изд.л. 4,5
Формат 60 x 90 1/16. Бумага офсетная № 1. Тираж 850 экз. Тип. зак.1342.
Цена 45 коп.

Книга издана офсетным способом

Издательство "Наука", 103717 ГСП, Москва, К-62, Подсосенский пер., 21
1-я типография издательства "Наука". 199034, Ленинград, В-34, 9-я линия, 12

Благодаря преимущественно наблюдательному характеру сейсмологии первичный материал наблюдений — сейсмограммы — имеет относительно большее значение, чем в других естественных науках, представляя единственный фактический материал для далеко идущих выводов о предмете исследования.

В сейсмологии всегда была важна правильность интерпретации сейсмограмм, а в последнее время она стала остроактуальной в связи с бурным развитием изучения динамики сейсмических волн, которая призвана преодолеть принципиальные затруднения, присущие кинематическим методам. К таким затруднениям, например, относятся (Алексеев, 1967): "невозможность использовать всю информацию о колебаниях поверхности тела; неоднозначность решения обратных кинематических задач в случае сложного, в частности немоного, изменения свойств среды в пространстве; неполнота описания механических свойств среды, необходимость решения весьма нечеткой в физическом и математическом отношениях задачи разделения полного поля колебаний на отдельные волны и помехи, малая эффективность чисто кинематических критериев определения физической природы зарегистрированных волн" (стр. 11). Кроме дополнительной информации о строении исследуемой среды, которую нельзя получить при использовании только кинематических характеристик волн, времен пробега и скоростей распространения, изучение динамики сейсмических волн дает основную информацию по энергии землетрясений и механизму очага.

Понимая под динамическими характеристиками сейсмических волн совокупность зависимостей, определяющих характер движения частиц среды во времени и пространстве при распространении сейсмических волн (Берзон и др., 1962), легко видеть, что основной характеристикой здесь будет форма волны, т.е. зависимость величины смещения (или скорости, или ускорения) частиц среды от времени. Другие динамические характеристики, амплитудные и фазовые спектры связаны с формой волны известными соотношениями (Харкевич, 1962), а максимальные амплитуды есть отдельные точки этой зависимости.

При изучении динамики сейсмических волн, особенно всего режима колебаний поверхности в данной точке наблюдений, прежде всего возникает вопрос о тождественности сейсмограммы и формы

движения частиц "почвы" в сейсмической волне, поскольку связь между ординатой записи на сейсмограмме и смещением в волне дается через дифференциальные уравнения движения сейсмографа. И до сих пор, несмотря на простоту теории и высокую степень ее выполнимости приборами, в этом вопросе о соотношении между истинным видом движения "почвы" и сейсмограммой сейсмологи попадают в область более или менее обоснованных предположений. Например, несмотря на общепризнанную нестационарность объемных волн, для измерения их абсолютных амплитуд (амплитуд смещения "почвы") оптимисты пользуются (Антонова и др., 1968) характеристиками сейсмографа для стационарного движения. Но, по-видимому, такое предположение неоправданно, поскольку, обработав обширный экспериментальный материал и оценивая (после введения и учета других всевозможных факторов) разброс данных измерений, авторы отмечают: "Наконец, часть отклонений (и пока - большую часть) не удастся связать ни с какими факторами, и они выступают в качестве случайных ("белого шума")" (стр. 19). Эти результаты подтверждают горькое замечание известного сейсмолога, что "измерения движения земли не достигли уровня точности, предполагаемого в других областях физических измерений" (Рихтер, 1963, стр. 208). Хотя в этом случае скорее нужно говорить не о точности измерений движения, а о правильности учета теории сейсмографа при интерпретации сейсмограмм. И есть такая точка зрения, что экспериментальная проверка соответствующих методов анализа наблюдений в динамике и следствий из них, "по-видимому, долго еще будет тормозиться необходимостью существенного видоизменения методики экспериментальных наблюдений и принципов конструирования аппаратуры, удовлетворяющих в настоящее время потребностям лишь чисто кинематических подходов к задаче интерпретации сейсмических наблюдений. В связи с этим необходима разработка специальных методов регистрации абсолютных динамических характеристик полного волнового поля и первичных импульсов в источнике колебаний. Эти методы должны обеспечивать повышенную точность измерения динамических характеристик" (Алексеев, 1967, стр. 81).

Предлагаемая работа и направлена на то, чтобы, с одной стороны, вопрос о соотношении между истинным движением "почвы" в сейсмической волне в точке наблюдения и соответствующей сейсмограммой вывести (учитывая наиболее полно теорию сейсмографа) из области предположений, а с другой - показать, что существующая аппаратура наблюдений удовлетворяет не только потребности чисто кинематического подхода, но и после соответствующей обработки сейсмограмм может удовлетворить запросы динамики.

СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИСТИННОГО ВИДА ДВИЖЕНИЯ «ПОЧВЫ» ПО СЕЙСМОГРАММЕ

Формулировка задачи

Для электродинамических сейсмографов с гальванометрической регистрацией, которые благодаря простоте теории, высокой степени ее выполнимости, простоте и надежности в эксплуатации стали основным средством регистрации на сейсмостанциях СССР (Архангельский и др., 1962), запись сейсмических волн — сейсмограмма — представляет собой в общем случае только реакцию сейсмографов на воздействие этих волн. Действительно, между ординатой записи $y(t)$ (или угловым отклонением гальванометра $\phi(t)$) и смещением «почвы» в сейсмической волне $x(t)$ в общем случае не существует линейной связи типа

$$y(t) = C x(t), \quad (1)$$

где C — некоторая постоянная, а зависимость между ними выражается системой двух дифференциальных уравнений второго порядка с постоянными коэффициентами (Саваренский, Кирнос, 1955)

$$\ddot{\vartheta} + 2\epsilon_1 \dot{\vartheta} + n_1^2 \vartheta = -\frac{1}{I} \ddot{x} + 2\epsilon_1 \sigma_1 \dot{\phi}, \quad (2)$$

$$\ddot{\phi} + 2\epsilon_2 \dot{\phi} + n_2^2 \phi = 2\epsilon_2 \sigma_2 \dot{\vartheta}.$$

(Список использованных в работе общепринятых в литературе по сейсмометрии обозначений дан в приложении 1.)

Поскольку в практике сейсмологических наблюдений обычно принято, чтобы знак первого смещения «почвы» совпадал со знаком первого смещения записи, систему уравнений (2) следует записать так:

$$\ddot{\vartheta} + 2\epsilon_1 \dot{\vartheta} + n_1^2 \vartheta = -\frac{1}{I} \ddot{x} - 2\epsilon_1 \sigma_1 \dot{\phi}, \quad (3)$$

$$\ddot{\phi} + 2\epsilon_2 \dot{\phi} + n_2^2 \phi = -2\epsilon_2 \sigma_2 \dot{\vartheta}.$$

Задача нахождения истинного вида зависимости смещения «почвы» от времени $x(t)$ по известному виду записи $y(t)$ на сейсмограмме была определена еще в 1902 г. основоположником инструментальной сейсмологии в России академиком Б.Б.Голицыным как основная задача сейсмометрии (Голицын, 1912): «Развитие сейсмометрии

самым тесным образом связано с определением абсолютных, истинных элементов движения точки земной поверхности во время землетрясений ... Для рационального изучения различных сейсмических явлений надо от показаний приборов переходить всегда к истинным движениям поверхности Земли, так как только на этом фундаменте и могут основываться дальнейшие успехи сейсмометрии ...

Основная задача сейсмометрии и заключается именно в том, чтобы по известной функции $\xi = F(t)$ (сейсмограмме. - В.П.) найти неизвестную функцию $x = f(t)$ (смещение "почвы" в волне. - В.П.) за все время колебаний почвы" (стр. 214, 215).

Все существующие методы определения истинного вида движения "почвы" по сейсмограмме есть по существу лишь различные способы решения одних и тех же уравнений движения сейсмографа (3). Все они являются в той или иной мере приближенными, но ограничения, им присущие, различны.

В реализации полученного тем или иным методом решения основной задачи сейсмометрии не могли не возникнуть трудности экспериментального или вычислительного характера, преодоление которых представляет самостоятельную задачу. Это, очевидно, свойственно всем возможным путям решения.

Поэтому, получив и предлагая для практического применения наиболее строгое математически [при самых общих допущениях о характере неизвестной функции $x(t)$] решение обратной задачи сейсмометрии, при рассмотрении того или иного из существующих методов основное внимание следует обращать на математическую строгость и принципиальные ограничения решения.

Непосредственная запись сейсмографом различных кинематических элементов движения «почвы»

Первый рассматриваемый путь нахождения истинного вида движения "почвы" как функции времени заключается в создании сейсмографа, запись которого была бы пропорциональна смещению. Анализ такой возможности проведен Д.П.Кирносом и наиболее полно изложен в следующих работах (Кирнос, 1955; Саваренский, Кирнос, 1955).

Представляя при неизвестном аналитическом виде смещение "почвы" в виде интеграла Фурье

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S(j\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (4)$$

где спектр смещения

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau, \quad (5)$$

Д.П.Кирнос получил решение системы уравнений (2) относительно ординаты записи $y(t) = 2A\phi(t)$ в виде интеграла Фурье

$$y(t) = -k \frac{2A}{l} \int_0^{\infty} S(j\omega) W(j\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (6)$$

где комплексная амплитудно-частотная характеристика $W(j\omega)$ может быть представлена в виде произведения $W(\omega, D_1, D_2, T_1, T_2, \sigma^2)$ - амплитудно-частотной характеристики и $\bar{\gamma}(\omega, D_1, D_2, T_1, T_2, \sigma^2)$ - фазочастотной характеристики

$$W(j\omega) = W(\omega) e^{j\bar{\gamma}(\omega)}. \quad (7)$$

Д.П.Кирнос показал, что для случая малой связи ($\sigma^2 \ll 1$), при определенном выборе парциальных параметров сейсмографа D_1, D_2, T_1, T_2 в некотором интервале частот $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$ можно получить у сейсмографа постоянную амплитудно-частотную характеристику и фазочастотную, примерно равную нулю. В этом случае, как видно из (7), (6) и (4), запись на сейсмограмме будет пропорциональна смещению "почвы", если спектр смещений заключен в том же интервале частот. Аналогичный вывод был сделан и для других кинематических элементов движения, скорости и ускорения.

В общем, практически важном, случае ($\sigma^2 \leq 1$) результаты подобного анализа будут справедливы для собственных параметров сейсмографа, поскольку, вводя эквивалентную системе уравнений движения (2) систему уравнений с исключением σ^2 (Нерсесов, 1956), частотные характеристики можно представить через собственные параметры сейсмографа (Дросте, Гордеюк, 1960). Связь же между собственными и парциальными параметрами сейсмографа хорошо изучена (Архангельский, 1961, 1964; Шебалин, 1961; Тобуаš, 1963а, б, 1964, 1966, 1967а, б; Перепелица, 1965). Ограничения для данного интервала частот налагаются на собственные параметры, а по ним для любого $\sigma^2 \in (0, 1)$ можно считать необходимые парциальные параметры.

Приведем некоторые примеры. Так, сейсмограф общего типа Д.П.Кирноса при парциальных параметрах $T_1 = 12,5$ сек, $D_1 = 0,45$, $T_2 = 1,2$ сек, $D_2 = 5$ и $\sigma^2 \ll 1$ дает, по оценке автора прибора, достаточно правильную запись смещений в интервале 0,3-3 сек (Кирнос, 1955). Сейсмограф ВЭГИК с параметрами $T_1 = 1,2$ сек, $D_1 = 0,6$, $T_2 = 0,2$ сек, $D_2 = 20$ дает, по оценке авторов, ошибки в записи амплитуд не более 5%, а фазовый сдвиг не более 30° для колебаний с периодами меньше 0,5-0,6 сек (Кирнос, Харин, Рулев, 1961).

Таким образом, основные условия пропорциональности записи истинному виду движения - это, во-первых, ограниченность спектра

наблюдаемых смещений в определенном интервале частот $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$, во-вторых, возможность задания соответствующих характеристик у сейсмографа.

Экспериментальные данные по определению спектров смещений в сейсмических волнах указывают на значительно большую их ширину, чем допустимые интервалы у современных сейсмографов, предназначенных для регистрации этих волн (Архангельский, Кирнос и др., 1962). Так, например, ширина спектра смещений Р волн ($\Delta \approx 50^\circ$) равна примерно 1–80 сек (Касахара, 1961; Саваренский и др., 1963), для поверхностных волн верхняя граница достигает (при $\Delta \approx 12-30^\circ$) 20–30 сек (Кухтикова, Французова, 1964). Авторы монографии "Основные экспериментальные закономерности динамики сейсмических волн" (Антонова и др., 1968) на опыте обработки обширного материала наблюдений делают вывод: "Для получения полного и объективного представления об амплитудно-частотном составе колебаний желательно иметь записи аппаратуры, полоса пропускания которой перекрывала бы весь спектр колебаний или хотя бы его основную часть. Практически мы сейчас не имеем такой аппаратуры. Существующие комплекты охватывают только ту или иную часть частотного диапазона, причем максимум спектра волн часто оказывается вне полосы пропускания приборов" (стр. 7).

В то же время чувствительность сейсмографов остается достаточно высокой в области больших периодов далеко за пределами допустимого интервала частот $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$. С искажениями сейсмографы могут регистрировать волны в гораздо более широком интервале. Но правильная информация от этих записей относительно динамических параметров сейсмических волн не может быть получена, а попытки сопоставлять данные по приборам с разной полосой пропускания будут безуспешными без соответствующей обработки сейсмограмм.

В последнее время сконструирован и внедрен на сейсмических станциях сейсмограф с периодом сейсмоприемника $T_1 = 25$ сек (Архангельский, Кирнос, 1964), что должно расширить интервал записи смещения в сторону больших периодов. Но, учитывая все изложенное выше, следует и сейчас признать справедливыми следующие слова Д.П. Кирноса: "Построить приборы, записывающие без искажений все встречающиеся колебания с различными периодами, пока не представляется возможным. Вопрос о получении неискаженной записи практически можно ставить лишь для ограниченного... интервала периодов сейсмических волн. Для более общего решения следует обращаться ко второму пути решения обратной задачи, т.е. вычислять смещение по сейсмограмме" (Саваренский, Кирнос, 1949, стр. 259–260).

Определение истинного смещения по спектру записи

Принципиальная схема расчета истинного смещения по спектру записи, базирующаяся на том же решении системы уравнений (2) методом преобразования Фурье, дана в работе (Саваренский, Федоров, Гогичайшвили, 1963).

Используя соотношение между спектром записи и спектром смещения "почвы", которое имеем из (6),

$$Y(j\omega) = -k \frac{2A}{1} W(j\omega) S(j\omega), \quad (8)$$

можно по сейсмограмме вычислить спектр записи, внести в него поправку на частотные характеристики сейсмографа и, выполняя обратное преобразование Фурье, вычислить $x(t)$:

$$x(t) = -\frac{1}{2Ak} \int_0^{\infty} \frac{Y(j\omega)}{W(j\omega)} e^{j\omega t} d\omega. \quad (9)$$

Данный способ должен несколько расширить возможности определения истинного смещения по записи сейсмографа. Но здесь имеются ограничения как принципиального, так и вычислительного характера.

Во-первых, на концах (в начальный момент времени t_H и конечный t_K) отрезка записи, спектр которого определяется, для выполнения соотношения (7) необходимо, чтобы "почва" и сейсмограф находились в состоянии покоя, т.е. $y = \dot{y} = x = \dot{x} = 0$ | $t=t_H, t_K$

Соотношение между спектром вынуждающей функции $x(t)$, решением $y(t)$ и характеристикой линейной системы, описываемой обыкновенным дифференциальным уравнением n -го порядка

$$a_n y^{(n)} + a_{n-1} y^{(n-1)} + \dots + a_1 \dot{y} + a_0 y = x^{(k)}(t), \quad (10)$$

получается путем применения (Харкевич, 1962) к обеим частям уравнения (10) преобразования Фурье

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt$$

с использованием теоремы о спектре производной:

$$S_{(n)}(\omega) = (j\omega)^n S(\omega). \quad (11)$$

Теорема (11) выполняется при условии, что все производные данной функции до $(n-1)$ -го порядка включительно обращаются в нуль при $t \rightarrow \pm\infty$. На конечном отрезке это условие должно выполняться на концах его (t_H, t_K). При анализе реальных сейсмограмм

указанное условие невыполнимо, и его нарушение может вносить неконтролируемую погрешность в определяемый спектр.

Во-вторых, в формуле (8) не учитывается неизбежная систематическая погрешность отсчета ординат записи, обусловленная неточным проведением нулевой линии отсчета ординат относительно истинной нулевой линии (линии, которую бы прочертил индикатор сейсмографа при отсутствии движения). Авторы работы (Саваренский, Федоров, Гогичайшвили, 1963) полностью отнесли большие погрешности в низкочастотной части спектра смещения "почвы", вычисленного ими по сейсмограммам сейсмографов разного типа, за счет ненадежности (Шебалин, 1955) частотных характеристик сейсмографов в области периодов, превышающих период сейсмоприемника, хотя, по данным Шебалина, например, для приборов общего типа СК погрешность амплитудно-частотной характеристики в интервале 10-30 сек примерно постоянна. По данным других авторов (Голенешкий, Одогова, Анисимова, 1968), для тех же приборов отмечается постоянство среднеквадратичной погрешности в интервале периодов 1-15 сек и вариация ее в пределах 5%. Как показано в некоторых работах (Касахара, 1961; Грудева, Малиновская, Наймарк, 1967), при неточном проведении нулевой линии возникают сильные искажения в низкочастотной части спектра и почти не возникают в его основной части. Поскольку амплитудный спектр истинного смещения определяется по спектру записи путем умножения последнего на величину, обратную амплитудно-частотной характеристике, погрешности низкочастотной части спектра истинного смещения возрастают в еще большей мере.

Пример расчета истинного смещения по спектру записи, приводимый авторами, показывает, что промежуточная величина, спектр смещения, для сейсмографов с различной полосой пропускания сопоставима лишь в пределах столбообразности амплитудно-частотной характеристики последних.

Очевидно, что для развития этого способа необходимы анализ отмеченных выше источников искажений и разработка в вычислительной схеме способов их устранения.

Моделирование

В методе, условно названном здесь моделированием, неизвестную зависимость смещения "почвы" от времени или хотя бы несколько первых амплитуд представляют различного рода функциями, математическими моделями. Уравнения движения сейсмографа (2) решаются с заданной правой частью каким-либо численным методом, а если возможно, то аналитически, т.е. решается прямая задача сейсмометрии. Из отношений соответствующих экстремальных точек полученного решения и заданной функции определяют так называемые динамические характеристики сейсмографа. Затем решают об-

ратную задачу: по сейсмограмме и динамическим характеристикам определяют параметры истинного движения.

За модели (перечислить их все затруднительно), представляющие истинное движение или хотя бы первые его амплитуды, принимались различного рода функции, начиная от установившегося гармонического движения, далее, включенной синусоиды и кончая обобщенной функцией Берлаге (Голицын, 1912; Харин, 1938; Саваренский, Кирнос, 1949, 1955; Кирнос, 1955; Кирнос, Кондорская, 1958; Дросте, Гибович, Гордеюк, 1959; Малиновская, Чечель, 1962; Аронович, Вилькович, Долгополов, 1966). Однако такой путь, чрезвычайно полезный для решения прямой задачи сейсмометрии, для изучения свойств сейсмографов, их реакции на различного рода воздействия, не приводит к принципиальному решению обратной задачи сейсмометрии, поскольку нет и не может быть общей модели для истинного смещения во всех типах волн (и в одних и тех же объемных волнах при разных землетрясениях). Каждая конкретная модель требует определения границ ее применимости на обширном экспериментальном материале, как видно, например, из работы Д.П.Кирноса и Н.В.Кондорской (1958). Кроме того, форма сейсмических волн зависит и от механизма очага, и от эпицентрального расстояния (Берзон и др., 1962), а это означает необходимость расчета для каждого сейсмографа множества характеристик, соответствующего множеству моделирующих функций.

Последнее достижение в этом направлении — работа З.И.Аронович, Е.В.Вилькович, Д.В.Долгополова (1966), где оценивается возможная погрешность в определении магнитуд по объемным волнам путем сравнения значений, полученных с использованием характеристик для гармонического движения и для обобщенной функции Берлаге, компактно описывающей широкий класс квазипериодических импульсов с разной формой огибающей, т.е. характеристик для нестационарного движения. Интересно сопоставить результаты этой работы с выводом о необъяснимости большей части рассеяния результатов измерений в работе Антоновой и др. (1968), в частности относительно амплитуд, в которой авторы пользовались характеристиками для гармонического движения, измеряя по сейсмограмме максимальную амплитуду продольной волны, независимо от номера экстремума, начиная от момента вступления волны. А в первой работе расчетным путем показано, что для импульса, из физических соображений наиболее близкого к форме объемной волны, динамические характеристики на периодах, близких к периоду маятника, имеют относительно характеристики для стационарного, гармонического движения отклонения 300% для третьего и 800% — для четвертого экстремума. Это и может объяснить большой разброс результатов измерений амплитуд смещений во второй работе — Антоновой и др. (1968).

Использование динамических характеристик — это шаг вперед сравнительно с использованием характеристики для гармонического движения, однако, оценивая результаты своих измерений магнитуды,

авторы (Аронович, Вилькович, Долгополов, 1966) делают знаменательный вывод: "Нельзя отдать предпочтения ни одному из двух полученных значений, так как неизвестен истинный вид входной функции Берлаге ...

Учитывая повышенные требования к определению динамических элементов сейсмических волн, следует на обширном экспериментальном материале провести определение истинного вида колебаний почвы при землетрясениях с помощью точного решения обратной задачи сейсмометрии" (стр. 83,84).

Способ почленного интегрирования

Точное и общее (для произвольного вида смещения "почвы") решение задачи определения истинного вида смещения заключается в почленном интегрировании уравнений движения сейсмографа (системе уравнений (2) приводится к одному уравнению четвертого порядка). По виду производимой для нахождения неизвестной функции $x(t)$ операции способ получил название способа почленного интегрирования. Поскольку аналитический вид входящих в уравнения движения переменных неизвестен, реализация решения, получаемого способом почленного интегрирования, возможна лишь численными методами.

Способ имеет давнюю историю более или менее успешных попыток применения (Померанцев, 1902; Tsuboi, 1931; Sharpe, 1935; Харин, 1938; Berckheimer, Schneider, 1964; Левин, Серяпин, 1968).

Проводилась также проверка способа в опытах с виброплатформой путем сравнения рассчитанного по сейсмограммам смещения с известным видом движения платформы (Померанцев, 1905; Дук, 1935; Саваренский, Кирос, 1949). Вывод, который делали все авторы: способ дает хорошие результаты только лишь для малых значений времени (фактически для первых секунд и даже долей секунды) от момента первого вступления. С увеличением интервала интегрирования рассчитываемая по сейсмограмме функция все дальше уклоняется от нулевой линии отсчета ординат.

Математический анализ способа провел Б.Б.Голицын (1912).

Предполагая, что при вступлении сейсмической волны в начальный момент времени имеется разрыв первого рода скорости на фронте волны, т.е. $\dot{x}(+0) \neq \dot{x}(-0)$, из уравнения движения сейсмографа для случая оптической регистрации

$$\ddot{y} + 2\epsilon_1 \dot{y} + n_1^2 y = -V_0 \dot{x} \quad (12)$$

после почленного его интегрирования от $-\Delta t$ до $+\Delta t$, если $\pm \Delta t \rightarrow 0$, Б.Б.Голицын определяет начальные условия движения:

$$x_0 = x(-0) = x(+0), \quad y_0 = y(-0) = y(+0), \quad (12a)$$

$$\dot{x}_0 = \dot{x}(+0) \neq \dot{x}(-0), \quad \dot{y}_0 = \dot{y}(+0) = \dot{y}(-0) - V_0[\dot{x}(+0) - \dot{x}(-0)].$$

Затем, после двукратного интегрирования уравнения (12) в пределах от 0 до t , Б.Б.Голицын получает, с учетом систематической погрешности проведения нулевой линии ($\alpha + \beta t$), для смещения "почвы" $x(t)$ выражение

$$x(t) = -\frac{1}{V_0} \left[y(t) + 2\epsilon_1 \int_0^t y dr + n_1^2 \int_0^t \int_0^t y dr^2 - \{A + Bt + Ct^2 + Dt^3\} \right], \quad (13)$$

где $A = y_0 - x_0$;

$$B = [\dot{y}(-0) + 2\epsilon_1 y_0 + V_0 \dot{x}(-0)];$$

$$C = -\frac{1}{2} [n_1^2 \alpha + 2\epsilon_1 \beta];$$

$$D = -\frac{1}{6} n_1^2 \beta. \quad (13a)$$

Для случая гальванометрической регистрации Б.Б.Голицын приводит систему уравнений движения сейсмографа к одному уравнению четвертого порядка. Предполагая вступление сейсмической волны в начальный момент времени с разрывом первого рода скорости и ускорения на фронте ее, начальные условия он определяет так же, как и в случае оптической регистрации. Окончательное выражение для смещения "почвы" Б.Б.Голицын получает в виде

$$x(t) = \frac{1}{2Ak} [I - P], \quad (14)$$

где

$$I = \dot{y}(t) + a y(t) + b \int_0^t y dr + c \int_0^t \int_0^t y dr^2 + d \int_0^t \int_0^t \int_0^t y dr^3 \quad (15)$$

и

$$P = A + Bt + Ct^2 + Dt^3 + Et^4 \quad (16)$$

и коэффициенты полинома определяются выражениями

$$A = \dot{y}(-0) + 2(\epsilon_1 + \epsilon_2) y_0 - \frac{2Ak}{1} x_0;$$

$$B = 2\epsilon_1 \dot{y}(-0) + (n_1^2 + 4\epsilon_1 \epsilon_2) y_0 + 2Ak [\dot{\vartheta}(-0) + \frac{1}{1} \dot{x}(-0)] - n_1^2 \alpha - 2\epsilon_1 \beta;$$

$$C = \frac{1}{2} \{ n_1^2 \dot{y}(-0) + 2\epsilon_2 n_1^2 y_0 + 2n_1^2 Ak \vartheta_0 - 2\epsilon_1 n_1^2 \alpha - (n_1^2 + 4\epsilon_1 \epsilon_2) \beta \}; \quad (17)$$

$$D = -\frac{1}{6} (\partial \alpha + c \beta), \quad E = -\frac{1}{24} \partial \beta.$$

Из (13) и (14) следует, что рассчитываемая по сейсмограмме функция будет обязательно содержать некоторый полином. Ввиду то-

го что коэффициент B в (13а) и (17) зависит от начальных скоростей "почвы" и сейсмографа, Б.Б.Голицын делает вывод, что при последующих вступлениях волн с разрывом первого рода скорости и ускорения на фронте волны коэффициент B будет изменяться, причем произвольным, неконтролируемым образом. Отсюда следует вывод, что сплошное интегрирование уравнений движения сейсмографа для определения истинного смещения "почвы", при наличии промежуточных вступлений, недопустимо. Отметим, что вывод об изменении коэффициента B неверен. Вступление волны, по определению Б.Б.Голицына, характеризуется разрывом первого рода ускорения и скорости. Но, как видно из (13а) и (17), этот факт никак не отражается на коэффициенте B , поскольку начальные скорости входят в него для момента -0 . Следовательно, предположение, что в начальный момент вступает сейсмическая волна, совершенно несущественно, и за начальный момент может быть взято время любой точки сейсмограммы, а сплошное интегрирование — проводится в любом интервале.

Здесь же Б.Б.Голицын намечает принципиальную схему расчета $x(t)$. За начальный момент берется любая точка сейсмограммы, и рассчитывается функция $I(t)$, содержащая в себе некоторый полином. Поэтому она будет удаляться от оси времени, колеблясь около некоторой средней кривой, полинома $P(t)$, который и следует вычесть из $I(t)$, чтобы получить $x(t)$. Б.Б.Голицын указывает и способ: "Эту среднюю кривую можно более или менее точно провести от руки через кривую $I = \Phi(t)$. По существу дела, кривая P должна состоять из нескольких отдельных ветвей. В тех точках, где две такие ветви сходятся, будет находиться особая точка кривой P , в которой кривая имеет две касательные и которая соответствует моменту вступления новой сейсмической волны" (стр. 559).

В итоге Б.Б.Голицын заключает, что "хотя метод почленного интегрирования и дает возможность определить x как функцию от t за все время землетрясения, и притом при совершенно произвольном характере движения почвы, но практическое применение этого метода сопряжено с немалыми трудностями и представляет собою, во всяком случае, довольно сложную и кропотливую задачу" (стр. 560).

Тем не менее успешные результаты с применением метода почленного интегрирования были получены (по-видимому, в единственном случае) по указанной Б.Б.Голицыным принципиальной схеме расчета. В работе (Sharpe, 1935), где ставилось целью объяснить детали колебательного характера движения в течение примерно первых 20 сек как результат отражения первичного импульса внутри коры, было рассчитано истинное смещение "почвы" в продольной волне глубокофокусного землетрясения. О высоких требованиях, предъявляемых при применении этого способа к сейсмограммам, говорит то, что из 117 сейсмограмм этого землетрясения только 28 были использованы для получения смещения "почвы". Истинное смещение рассчитывалось на аналоговой машине (в некоторых слу-

чаях и численным способом, причем отмечается полное совпадение результатов) в интервале примерно до 20 сек по формулам (13) и (14). Затем, указывает автор, "проводится гладкая поправочная кривая, которая приводит среднее смещение почвы к оси времени, и смещения относительно этой гладкой кривой наносятся на график и принимаются за движение почвы" (Sharpe, 1935, стр. 201). Автор отмечает, что можно указать только весьма грубую оценку точности, с которой получены кривые смещения "почвы": погрешность в абсолютной величине может достигать 100% в зависимости от типа сейсмографа, относительно смещения в начальном импульсе погрешность определения смещения в любом другом максимуме, вероятно, не превышает 25%.

Д.А.Харин в одной из своих работ (Харин, 1938) присоединяется к выводам Б.Б.Голицына.

Дальнейшие шаги в анализе способа почленного интегрирования сделаны в работах Д.П.Кирноса и др. (Кирнос, 1938; Саваренский, Кирнос, 1949), где отмечается, что сформулированное Б.Б.Голицыным ограничение способа почленного интегрирования, недопустимость сплошного интегрирования в интервале с промежуточными вступлениями, не имеет места. В первой из них, где рассматривается оптическая регистрация, автор пишет: "Если закон движения объекта меняется в процессе записи, т.е. появляются новые вступления, то, как нетрудно показать (разбивая интегрируемую кривую на участки, в пределах которых новых вступлений нет, и получая общий интеграл как сумму интегралов выделенных участков), можно не учитывать соответствующие этим вступлениям новые начальные условия, а производить сплошное интегрирование виброграммы" (стр. 88). По оценке автора, "метод почленного интегрирования несколько сложен и кропотлив... Однако при ответственных исследованиях, когда не представляется возможным применить другие способы, а также для получения полной кривой изучаемого движения этот метод является единственным способом получить надежные результаты" (стр. 88). Во второй работе Д.П.Кирнос приводит для смещения "почвы" в случае гальванометрической регистрации выражение

$$x(t) = -\frac{1}{2Ak} [2(\epsilon_1 + \epsilon_2) y + \{n_1^2 + n_2^2 + 4\epsilon_1\epsilon_2\} \int_0^t y dr + 2(\epsilon_1 n_2^2 + \epsilon_2 n_1^2) \int_0^t \int_0^t y dr^2 + n_1^2 n_2^2 \int_0^t \int_0^t \int_0^t y dr^3] + \ddot{x}_0 t^2 + \dot{x}_0 t - \ddot{y} \frac{1}{2Ak} \quad (18)$$

Здесь также отмечается, что "способ почленного интегрирования применим и в том случае, когда производная смещения - скорость - терпит разрыв. В самом деле ... скачок скорости равен скачку \dot{x}_c - производной по времени от перемещений центра качения маятника относительно его основания. Как и в случае перехода от покоя к движению, при почленном интегрировании эти скачки сократятся и,

следовательно, запись можно интегрировать от начала движения независимо от разрывов производной смещения" (Саваренский, Кирнос, 1949, стр. 312). Вместе с тем автор делает вывод: "Таким образом, чтобы применять метод почленного интегрирования при гальванометрической регистрации, необходимо знать не только угловые перемещения рамки гальванометра, но и угловые скорости $\dot{\phi}$ движения рамки, а также начальные условия движения объекта (\ddot{x} и \dot{x}) или рамки гальванометра (\ddot{y} и \dot{y}). Так как пока нет еще надежного способа определения этих величин, метод почленного интегрирования не может быть использован при гальванометрической регистрации" (стр. 282).

При повторном издании единственного в СССР систематического изложения вопросов сейсмометрии (Саваренский, Кирнос, 1955) все относящееся к способу почленного интегрирования было опущено, как и во втором издании "Лекций по сейсмометрии" Б.Б.Голицына (Голицын, 1960). Вновь стали ссылаться на сформулированное Б.Б.Голицыным ограничение как на принципиальное ограничение способа (наряду с необходимостью кратного интегрирования): "Существенно отметить, что при этом вследствие повторного интегрирования ошибки накапливаются. Величина ошибок возрастает и при увеличении времени из-за накопления неперiodического члена, которое возникает вследствие существования начальных условий при вступлении последующих волн в промежуточные моменты, осложняя кривую колебаний наложениями. В результате получается "дрейф" нулевой линии кривой колебаний" (Саваренский, Федоров, Гогичайшвили, 1963, стр. 1341).

Со своей стороны отметим одно принципиальное ограничение способа почленного интегрирования в случае гальванометрической регистрации. При переходе от системы уравнений движения (2) к одному уравнению четвертого порядка на неизвестные функции $\ddot{x}(t)$ и $\ddot{y}(t)$ должно быть наложено дополнительное ограничение: дифференцируемость их во всем интервале интегрирования.

Таким образом, наличие в выражении для смещения "почвы" (14) или (18) величин, зависящих от неизвестных начальных условий, и необходимость кратного численного интегрирования служили принципиальными препятствиями для разработки численного алгоритма и внедрения этого способа в практику.

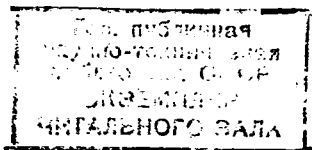
Решение уравнений движения сейсмографа операторным методом

Попытка обойти трудности, вызванные наличием в решении, полученном способом почленного интегрирования, неизвестных начальных условий и необходимостью кратного численного интегрирования, отягощенного большими погрешностями, была сделана в работе Д.В.Долгополова, А.П.Буденного (1966). Применив к уравнению

четвертого порядка, эквивалентному системе уравнений (2), операторный метод, авторы получили для смещения "почвы" выражение

$$\begin{aligned}
 \{x(t)\} & \underset{t \rightarrow \infty}{=} [a \int_0^t Y(\eta) e^{-\nu(t-\eta)} (t-\eta) d\eta + b \int_0^t Y(\eta) e^{-\nu(t-\eta)} (t-\eta)^2 d\eta + \\
 r & \gg \frac{1}{\omega_H} \\
 & + c \int_0^t Y(\eta) e^{-\nu(t-\eta)} (t-\eta)^3 d\eta + d \int_0^t Y(\eta) e^{-\nu(t-\eta)} d\eta + \\
 & + f \{Y(t)\} - \{Y'(t)\} - Y(0)] \frac{1}{V} \quad (19)
 \end{aligned}$$

Это выражение является, как указывают авторы, приближенным решением. По структуре оно совпадает с точным решением (14), отличаясь наличием дополнительных множителей в подынтегральных функциях и "лишним" слагаемым (с коэффициентом c), но не содержит неизвестных начальных условий и кратных интегралов. Авторы утверждают, что это решение может быть реализовано на ЭВМ.



РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ СЕЙСМОМЕТРИИ МЕТОДОМ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛАПЛАСА

Метод, условия применимости

Для случая гальванометрической регистрации операция приведения системы уравнений движения сейсмографа (2) или (3) к одному уравнению четвертого порядка, основанная на допущении, что неизвестная входная функция $\ddot{x}(t)$ и ее производная $\dot{\ddot{x}}(t)$ дифференцируемы во всем интервале интегрирования, не является логически строго корректной, поскольку сохраняется предположение, что при вступлении сейсмической волны возможен разрыв первого рода скорости и ускорения на фронте ее, т.е. что скорость и ускорение есть функции разрывные, не допускающие дифференцирования.

Строгое решение (в предположении о разрыве первого рода скорости и ускорения на фронте волны) дает примененный автором (Перепелица, 1967) к уравнениям движения сейсмографа (3) наиболее мощный метод решения систем дифференциальных уравнений такого типа — метод преобразования Лапласа (Гарднер, Бэрнс, 1961; Дёч, 1965).

Функциональное преобразование Лапласа переводит определенный класс функций вещественной переменной в функции комплексной переменной. Очевидно, что в случае обратной задачи сейсмометрии ограниченные функции времени $x(t)$, $\dot{x}(t)$ и $\ddot{x}(t)$ (при сделанном выше предположении о характере скорости и ускорения на фронте волны) удовлетворяют условиям применимости (Смирнов, 1958) преобразования Лапласа, а именно:

1) непрерывны в промежутке $(-\infty, +\infty)$, кроме конечного числа точек разрыва первого рода на любой ограниченной части этого промежутка;

2) имеют в каждой точке просто производную или производные слева и справа.

Преобразуемые функции называются оригиналами, получающиеся в результате — изображениями. Операции дифференцирования и интегрирования над оригиналами преобразуются в операции умножения и деления над изображениями. Таким образом, дифференциальные уравнения преобразуются в алгебраические, что значительно облегчает их решение.

Прямое преобразование Лапласа оригинала $f(t)$ записывается следующим образом:

$$\int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt = F(s) \text{ или } L[f(t)] = F(s), \quad (20)$$

где $s = \sigma + j\omega$, $j = \sqrt{-1}$, а t , σ , ω являются вещественными переменными.

Для производных $f'(t)$ и $f''(t)$ будут иметь место соотношения

$$\begin{aligned} L[f'(t)] &= sF(s) - f(0), \\ L[f''(t)] &= s^2F(s) - sf'(0) - f''(0). \end{aligned} \quad (21)$$

Следовательно, преобразование Лапласа автоматически дает учет начальных условий, т.е. непосредственное решение задачи Коши - нахождение полного решения неоднородного дифференциального уравнения, которое состоит из частного решения, соответствующего правой части, и решение однородного уравнения при заданных начальных условиях.

В дальнейшем будут еще использованы соотношения

$$\begin{aligned} L\left[\int_0^t f_1(t-\tau) \cdot f_2(\tau) d\tau\right] &= F_1(s) \cdot F_2(s), \\ L\left[\frac{1}{(n-1)!} t^{n-1}\right] &= \frac{1}{s^n}, \end{aligned} \quad (22)$$

где $F_1(s)$ и $F_2(s)$ - изображение оригиналов $f_1(t)$ и $f_2(t)$ соответственно.

Решение и результат

Схема решения системы дифференциальных уравнений типа (3) методом преобразования Лапласа заключается в следующем. Сначала, применяя к обеим частям уравнений прямое преобразование Лапласа, следует переходить от оригиналов к изображениям. Полученную систему алгебраических уравнений надо решать относительно изображения неизвестной функции - оригинала и затем делать обратный переход от изображений к оригиналам по таблицам соответствий.

Обозначим изображение оригиналов $x(t)$, $\dot{x}(t)$ и $\phi(t)$ соответственно через $X(s)$, $\theta(s)$ и $\Phi(s)$. Изображениями для системы (3) будут уравнения

$$\begin{aligned} s^2\theta(s) - s\dot{\theta}_0 - \dot{\theta}_0 + 2\epsilon_1 s\theta(s) - 2\epsilon_1\dot{\theta}_0 + 2\epsilon_1\sigma_1 s\Phi(s) - 2\epsilon_1\sigma_1\phi_0 + \\ + n_1^2\theta(s) = -\frac{1}{I}[s^2X(s) - s x_0 - \dot{x}_0], \end{aligned} \quad (23)$$

$$s^2\Phi(s) - s\phi_0 - \dot{\phi}_0 + 2\epsilon_2 s\Phi(s) - 2\epsilon_2\dot{\phi}_0 + 2\epsilon_2\sigma_2 s\theta(s) - 2\epsilon_2\sigma_2\nu_0 + n_2^2\Phi(s) = 0.$$

Из (23) имеем для изображения смещения "почвы" выражение

$$X(s) = \frac{1}{2\epsilon_2\sigma_2} \{s\Phi(s) - \phi_0 + 2(\epsilon_1 + \epsilon_2)\Phi(s) + [n_1^2 + n_2^2 + 4\epsilon_1\epsilon_2(1-\sigma^2)]\Phi(s) - \frac{1}{s} + 2(\epsilon_1 n_2^2 + \epsilon_2 n_1^2)\Phi(s) - \frac{1}{s^2} + n_1^2 n_2^2 \Phi(s) - \frac{1}{s^3} - \frac{1}{s} a_1 - \frac{1}{s^2} a_2 - \frac{1}{s^3} a_3 \}, \quad (24)$$

где

$$a_1 = -\frac{2\epsilon_2\sigma_2}{1} x_0 + 2(\epsilon_1 + \epsilon_2)\dot{\phi}_0 + \ddot{\phi}_0, \\ a_2 = -\frac{2\epsilon_2\sigma_2}{1} \dot{x}_0 - 2\epsilon_2\sigma_2 \dot{v}_0 + 4\epsilon_1\epsilon_2(1-\sigma^2)\phi_0 + n_1^2 \phi_0 + 2\epsilon_1 \dot{\phi}_0, \quad (24a) \\ a_3 = 2\epsilon_2\sigma_2 n_1^2 v_0 - 2\epsilon_2 n_1^2 \phi_0 + n_1^2 \dot{\phi}_0.$$

Используя соотношения (21) и (22), подставляя $\phi = \frac{1}{2A}y$ и учитывая систематическую погрешность проведения нулевой линии отсчета ординат $a + \beta t$, получаем из (24) для смещения "почвы" выражение (в котором под $y(t)$ понимаются измеренные ординаты записи за вычетом систематической погрешности проведения линии отсчета ординат)

$$x(t) = I(t) - P(t), \quad (25)$$

где

$$I(t) = \frac{1}{4A\epsilon_2\sigma_2} \{ \dot{y}(t) + 2(\epsilon_1 + \epsilon_2)y(t) + [n_1^2 + n_2^2 + 4\epsilon_1\epsilon_2(1-\sigma^2)] \int_0^t y(r) dr + 2(\epsilon_1 n_2^2 + \epsilon_2 n_1^2) \int_0^t y(r)(t-r) dr + \frac{n_1^2 n_2^2}{2} \int_0^t y(r)(t-r)^2 dr \};$$

$$P(t) = A_0 + A_1 t + A_2 t^2 + A_3 t^3 + A_4 t^4.$$

Коэффициенты полинома $P(t)$ равны

$$A_0 = \frac{1}{2\epsilon_2\sigma_2} a_1 - \frac{1}{4A\epsilon_2\sigma_2} [\beta + 2(\epsilon_1 + \epsilon_2)a], \quad (25a)$$

$$A_1 = \frac{1}{2\epsilon_2\sigma_2} a_2 - \frac{1}{4A\epsilon_2\sigma_2} \{ 2(\epsilon_1 + \epsilon_2)\beta + [n_1^2 + n_2^2 + 4\epsilon_1\epsilon_2(1-\sigma^2)]a \},$$

$$A_2 = \frac{1}{2\epsilon_2\sigma_2} a_3 - \frac{1}{8A\epsilon_2\sigma_2} \{[n_1^2 + n_2^2 + 4\epsilon_1\epsilon_2(1-\sigma^2)]\beta + 2(\epsilon_1 n_2^2 + \epsilon_2 n_1^2) a\},$$

$$A_3 = -\frac{1}{24A\epsilon_2\sigma_2} [8(\epsilon_1 n_2^2 + \epsilon_2 n_1^2)\beta + n_1^2 n_2^2 a],$$

$$A_4 = -\frac{1}{96A\epsilon_2\sigma_2} n_1^2 n_2^2.$$

Они зависят, как видно из (24а) и (25а), от начальных условий, постоянных сейсмографа и коэффициентов a и β систематической погрешности проведения нулевой линии отсчета ординат. Таким образом, во всем интервале интегрирования эти коэффициенты постоянны.

Из (14) и (25) видно полное совпадение решений по структуре. Различие между ними - в более слабых ограничениях, налагаемых на неизвестную функцию $x(t)$ в методе преобразования Лапласа по сравнению с методом почленного интегрирования. Кроме того, в (25) нет кратных интегралов, что, впрочем, можно было бы получить и из (14), используя соотношение

$$\int_0^t \dots \int_0^t y dr^n = \frac{1}{(n-1)!} \int_0^t y(t-r) dr. \quad (26)$$

Это обстоятельство снимает одно из существенных возражений против решения обратной задачи сейсмометрии путем численного интегрирования и делает чрезвычайно удобным вычисление функции $I(t)$.

Коэффициенты слагаемых в функции $I(t)$ для различных типов сейсмографов

Предположим, что в (25) коэффициенты полинома равны нулю. Тогда решение можно записать в виде

$$x(t) = c_0 [c_1 \dot{y} + y + c_2 \int_0^t y dr + c_3 \int_0^t y(t-r) dr + c_4 \int_0^t y(t-r)^2 dr]. \quad (27)$$

В табл. 1 для всех сейсмографов, применяющихся на сейсмостанциях СССР (Архангельский и др., 1962; Киринос, Харин, Шебакин, 1961), приведены численные значения коэффициентов при слагаемых правой части формулы (27), рассчитанные для стандартных значений постоянных сейсмографов. Здесь видна роль слагаемых, отличных от амплитуды записи, которые наглядно показывают искажающее влияние сейсмографов.

Таблица 1

Коэффициент	Численные значения для сейсмографов								
	СГК-3	СВК-3	СК-3	ВЭГИК	СКМ	СКМ-3а	СКМ-3б	СКД	ВСГ
c ₁	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,52
c ₂	0,93	0,81	7,42	18,9	6,55	5,50	6,30	0,51	0,70
c ₃	0,47	0,47	12,3	236	14,5	25,4	22,0	0,09	0,22
c ₄	0,06	0,06	7,75	725	2,80	17,4	96,0	0,10	0,01

Некоторые выводы

Методы определения истинного вида движения "почвы" в сейсмической волне по соответствующей сейсмограмме, являясь лишь различными способами решения одних и тех же уравнений движения сейсмографа, в той или иной степени приближенные методы. Но ограничения при применении каждого из них различны. Решение методом преобразования Лапласа, совпадающее по структуре с решением способом почленного интегрирования, не имеет принципиальных ограничений при самых общих предположениях относительно неизвестной функции $x(t)$. Ранее оно не получило разработки и применения ввиду низкого уровня развития вычислительной техники. Развитие вычислительных средств (ЭВМ) устранило препятствие в виде громоздких вычислений, раньше практически непреодолимых. Но и теперь разработка алгоритма для реализации (25) затруднительна. Один из известных сейсмологов считает (Буллен, 1966, стр. 191, 192): "Уравнение... выражает движение рассматриваемой компоненты почвы через постоянные прибора, время t и значение... измеряемые по сейсмограмме, таким образом... дает формальное (подчеркнуто мною -Б.П.) решение проблемы. При использовании... обращаются к численному интегрированию на машинах.

В связи с трудностями, встречающимися при численном интегрировании... на практике стараются сконструировать сейсмографы таким образом, чтобы наиболее важные характеристики движения почвы могли быть достаточно быстро установлены прямо из сейсмограммы", т.е. численное интегрирование представляется проблемой, не уступающей по трудности созданию специального типа сейсмографа. Тем не менее, учитывая корректность и общность этого решения, автор данной работы сделал попытку реализовать его.

Разработанный автором численный алгоритм реализации строгого решения обратной задачи сейсмометрии для гальванометрической регистрации, некоторые результаты его применения к данным наблюдений и анализ полученного истинного смещения изложены в главе 3.

$x(t)$ и реализации некоторой малой сравнительно с $x(t)$ по величине амплитуд случайной функции погрешности $\delta(t)$:

$$\tilde{x}(t) = x(t) + \delta(t). \quad (29)$$

Беря интервал интегрирования фиксированной длины скользящим по сейсмограмме с некоторым малым сдвигом начала интервала, просуммируем (29) в совпадающие моменты времени и по теореме о математическом ожидании суммы неслучайной функции и случайной будем иметь (Вентцель, 1962).

$$M[\tilde{x}(t)] = x(t) + M[\delta(t)]. \quad (30)$$

При достаточно большом числе слагаемых действие отдельных случайных погрешностей взаимно погашается, компенсируется, и должно быть, чтобы $M[\tilde{x}(t)] \rightarrow x(t)$. В силу единственности здесь имеется мощный критерий правильности, объективности результата расчетов: независимость результата от положения начала интервала интегрирования, совпадение в перекрывающихся частях отдельных интервалов. Степень совпадения, которую количественно можно оценить вычислением коэффициента корреляции, покажет выполнимость сделанного выше предположения о свойствах амплитуд смещения, правомерность применения метода наименьших квадратов.

Данная принципиальная схема вычислений будет приводить в интервале интегрирования длиной τ к исключению из результата смещений "почвы" с периодами, примерно равными (или больше) $\tau/2$, поскольку коэффициенты аппроксимирующего полинома определяются методом наименьших квадратов, а полином четвертого порядка на данном интервале τ может иметь только три экстремума. Следовательно, длина скользящего интервала интегрирования τ должна быть примерно в 2-3 раза больше максимального предполагаемого периода смещений "почвы". Какова она должна быть в каждом конкретном случае, может показать лишь расчет по сейсмограммам. Необходимо только вследствие этого для сопоставимости результатов расчеты по разным сейсмограммам проводить со скользящим интервалом одинаковой длины. А совпадение результатов при просчете со скользящим интервалом двойной длины укажет на отсутствие более длиннопериодных колебаний, на окончательность решения.

О корректности численного метода

В рассчитываемую по сейсмограмме функцию $I(t)$ входит слабое, пропорциональное первой производной от записи. При переходе к численным методам получаем некорректно поставленную задачу восстановления производной по экспериментальной функции (сейсмограмме). При вычислениях от графически точной функции $y(t)$ переходим к дискретно заданной с некоторым постоянным ша-

гом дискретизации Δt функции $y_{\delta}(t_i)$, причем в процессе цифрования в отсчеты вносится некоторая малая, не более 5% (Колесников, Соловьев, 1964), погрешность случайного характера $\delta(t)$. При этом всегда можно указать такие случаи, когда при сколь угодно малом отклонении $y_{\delta}(t)$ от $y(t)$ их производные будут отличаться друг от друга сколь угодно сильно. Пусть, например, экспериментальная функция есть

$$y_{\delta}(t) = y(t) + \delta \sin \omega t, \quad (31)$$

где δ — сколь угодно малая величина. Погрешность задания функции $y_{\delta}(t)$ тогда не превосходит δ . А для производной, в зависимости от частоты ω функции погрешности $\delta(t)$, погрешность задания производной может быть больше любого числа M при $\omega > M/\delta$.

Поэтому, несмотря на то что для всех типов сейсмографов, применяющихся на сейсмостанциях СССР, коэффициент при слагаемом с производной в формуле для $I(t)$ не превосходит 0,03 коэффициента слагаемого ординаты (см. табл. 1) (сейсмограф Б.Б. Голицына составляет исключение, но он чрезвычайно редко применяется), необходимы меры, исключающие возможность внесения большой погрешности в окончательное решение, обеспечивающие его устойчивость.

Задачи подобного рода, в которых малые отклонения, находящиеся в пределах точности исходных величин, могут вызвать большие изменения в окончательном результате, решаются с помощью регуляризации численных алгоритмов, т.е. выбора таких приближенных алгоритмов вместо исходных, которые дают устойчивый результат без большой потери точности. Имеется общая теория регуляризации (Тихонов, 1963а, 1963б, 1967), идея которой заключается в замене оператора A некорректной задачи $A_z = p$ некоторой системой регуляризующих операторов A_{α} , зависящих от параметра α так,

что при $\alpha > 0$ решение задачи получается устойчивым, а при $\alpha \rightarrow 0$

операторы A_{α} в некотором смысле сходятся к A . На основе этой общей теории для частного случая, определения производной по экспериментальной функции, предложен ряд алгоритмов, дающих устойчивое решение (Бакушинский, 1966; Гласко, Заикин, 1966; Демидович, 1967; Долгополова, Иванов, 1966).

В данной работе, однако, оказалось возможным использовать обычные формулы численного дифференцирования, применив метод регуляризации не к численному алгоритму, а к исходной экспериментальной кривой (сейсмограмме). Как видно из формулы (31), неустойчивость результатов численного дифференцирования может быть обусловлена наличием в экспериментальной функции $y_{\delta}(t)$ высокочастотной составляющей $\delta(t)$. Однако шаг дискретизации Δt можно выбрать так, чтобы максимум спектра исходной функции $y(t)$ находился в области низких частот f_i , много меньших $f_m = 1/2\Delta t$ (если брать 20–30 точек на видимый период записи), а максимум спектра высокочастотной помехи $\delta(t)$ располагался близко к часто-

те f_m . Для устранения влияния высокочастотной помехи к сейсмограмме после оцифровки $y_\delta(t_i)$ был применен цифровой рекурсивный фильтр низких частот с симметричными коэффициентами, дающий следующие значения преобразованной функции:

$$y_i = \frac{1}{l^2} \sum_{k=-l}^l (1 - |k|) y_{\delta_{i+k}} \quad (32)$$

При $l=2$ получаем исключение частот свыше f_m из спектра преобразованной функции и эффективное подавление частот, близких к f_m , т.е. устранение из спектра экспериментальной функции спектра помехи, а во временном представлении — устранение из функции $y_\delta(t)$ самой помехи $\delta(t)$, сглаживание исходной функции.

Дополнительное сглаживание производной достигается тем, что производная считается в средней точке по интерполирующим полиномам Лагранжа второго и четвертого порядков (Березин, Жидков, 1959) и берется среднее значение. Эффект принятого метода регуляризации проиллюстрирован в описании результатов расчетов.

Кроме того, эффект такого метода регуляризации исходной экспериментальной кривой проявился при следующей операции. Для большего удобства представления результатов расчетов от таблицы исходной функции с шагом дискретизации Δt , получающимся в процессе оцифровки различным для разных сейсмограмм, переходим к таблице с эталонным шагом, равным для всех компонент или сейсмограмм. Переход совершается с помощью итерационного интерполирования полиномами Лагранжа, причем верхний порядок полинома взят равным 3, а погрешность интерполирования 5%. Как правило, процесс сходился более чем в 99% случаев.

Остальные слагаемые, кроме пропорционального ординате записи, в формуле для $I(t)$ представляют собой интегралы, которые брались по общей формуле Симпсона (Березин, Жидков, 1959), а численное интегрирование, как известно, операция корректная.

Для проверки влияния точности вычислений на конечный результат следует использовать обычный в вычислительных методах прием просчета с двойным шагом дискретизации, причем совпадение результатов будет указывать на правильность, независимость от погрешностей счета.

Краткое описание программы

Автором составлена программа (на языке АЛГОЛ-60) для ЭВМ БЭСМ-4, реализующая вышеизложенный алгоритм. Максимальная длина полного интервала счета смещений составляет 1200 точек исходной функции (сейсмограммы), скользящего — 750.

Счет смещения ведется по формуле (25) в скользящем интервале фиксированной длины со сдвигом начала на задаваемый пос-

тоянный шаг и вычислением среднего результата в каждой точке по всем перекрывающимся частям разных интервалов интегрирования. Качество результатов (по совпадению) в целом контролируется вычислением коэффициента корреляции (Вентцель, 1962) для каждого перекрывающегося отрезка, рассеяние — вычислением

среднеквадратичной погрешности в каждой точке σ_i . В каждом цикле по σ_i вычисляется среднее $\bar{\sigma}_i$ для данного перекрывающегося отрезка. По $\bar{\sigma}_i$ вычисляется средняя величина $\bar{\sigma}$ и ее среднеквадратичная погрешность $\sigma\bar{\sigma}$. Величина $\bar{\sigma}$ принимается в качестве некоторой интегральной оценки точности определения величины амплитуд истинного смещения. Кроме того, на печать выводятся значения максимальных погрешностей и предусмотрена возможность вывода на печать всех промежуточных результатов расчетов.

При однократном вводе исходных данных можно вести счет с двойным шагом дискретизации, двойной длиной скользящего интервала интегрирования и полиномом степени $n+1$ ($n=4, 5, \dots$).

Время счета в одном скользящем интервале длиной 750 точек составляет примерно 40 сек.

Программа опирается на СП библиотеки ВЦ Сибирского энергетического института СО АН СССР. Текст программы приведен в приложении 2.

Результаты расчета истинного смещения по сейсмограммам

По изложенной методике рассчитывалось истинное смещение для многих землетрясений и взрывов по сейсмограммам почти всех применяющихся на сейсмостанциях СССР типов сейсмографов с гальванометрической регистрацией.

Сейсмограммы оказались пропорциональны смещению "почвы" только при условии $T_1 \gg 10 T_\omega$ (рис.1). Во всех других случаях обнаружены более или менее сильные искажения, вносимые сейсмографами.

Характер выполнимости предположений, лежащих в основе алгоритма, и иллюстрацию результатов работы вычислительной схемы покажем в основном на примере расчета истинных смещений для землетрясения от 31.03.1965 г. с $t_0 = 9^h 47^m 22^s$ и координатами $38^\circ,1 N$ и $21^\circ,8 E$ (Греция), $M = 6.1/4$ (Оперативный бюллетень, 1965) по сейсмограммам 6 станций Прибайкальской сети (среднее эпицентральное расстояние равно примерно 55°). Результаты расчетов для других землетрясений и станций полностью аналогичны приведенным здесь.

Взаимное расположение сейсмостанций показано на рис.2. Данные о постоянных сейсмографов приведены в табл. 2.

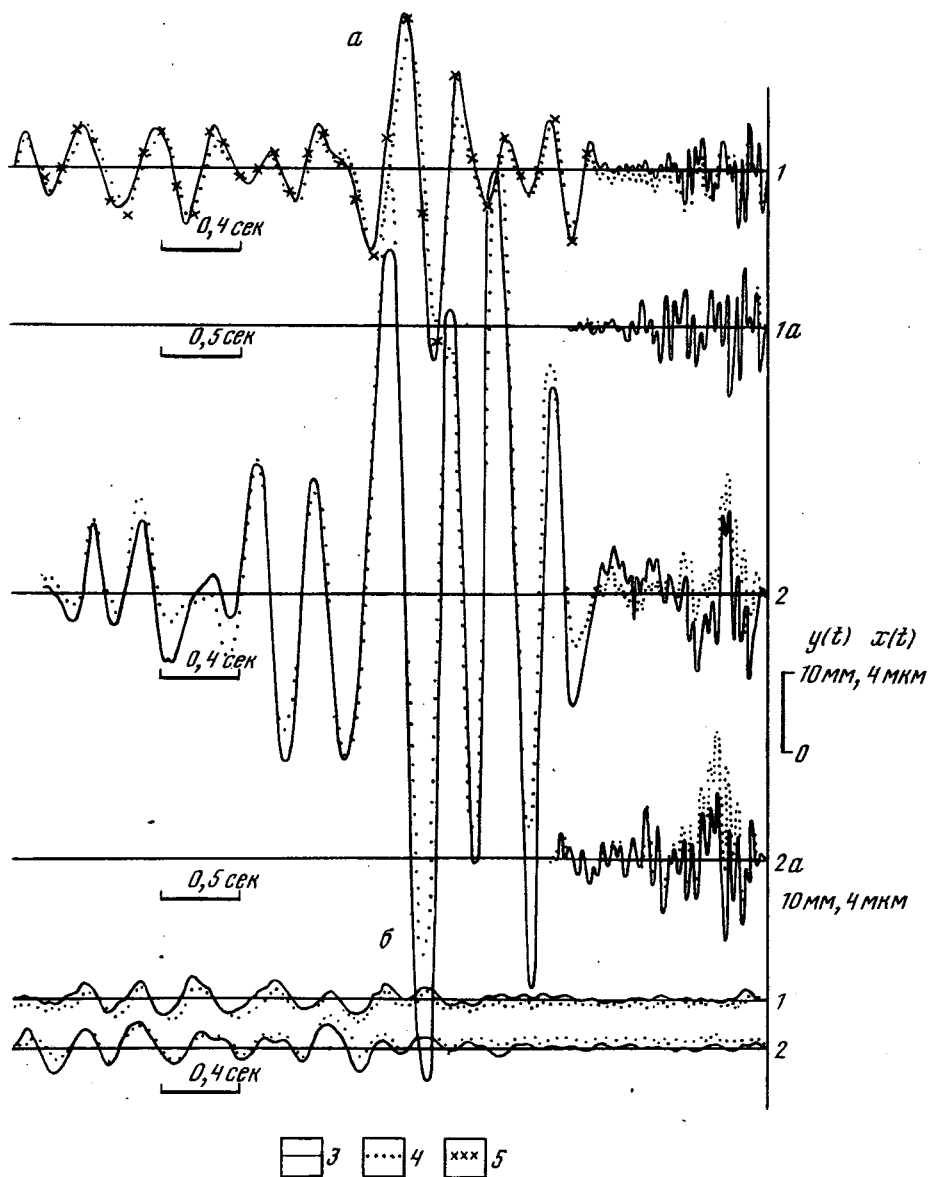


Рис.1. Сейсмограф С5С ($T_1=5$ сек, $T_2 = 0,1$ сек), взрыв 600 кг на расстоянии 3 км (а), 5 км (б).

1 - вертикальная компонента; 2 - горизонтальная радиальная компонента; 1а, 2а - шаг цифрования 0,002 сек, скользящий интервал интегрирования $\tau=0,8$ сек; 1,2 - шаг цифрования 0,005 сек, $\tau=2$ сек (5 - $\tau=4$ сек); 3 - смещение; 4 - сейсмограммы

Рис.2. Расположение сейсмостанций

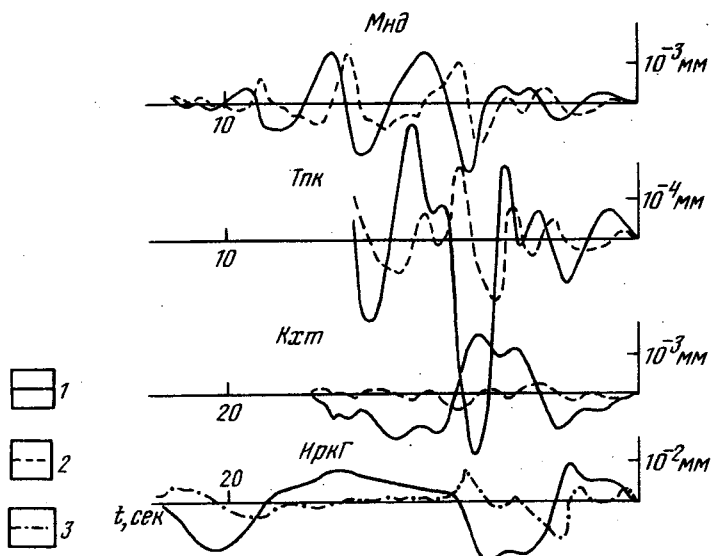
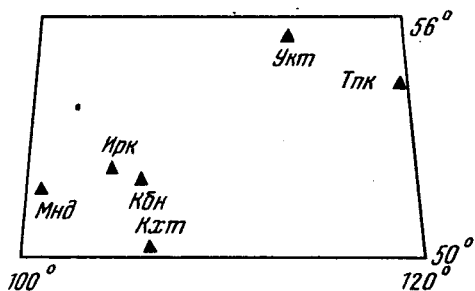


Рис.3. Характер соответствия производной и дифференцируемой функции

1 - слагаемое в $I(t)$, пропорциональное ординате записи; 2 - слагаемое, пропорциональное производной, умноженное на 10; 3 - слагаемое, пропорциональное производной

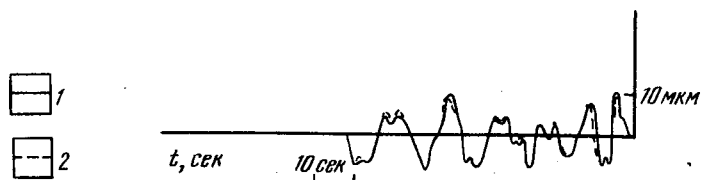


Рис.4. Результат просчета с двойным шагом. Ст. Мнд, вертикальная компонента

1 - шаг 0,1 сек; 2 - шаг 0,2 сек

Таблица 2

Сейсмостанция	Компонента	Сейсмограф	D ₁	D ₂	T ₁ , сек
Монды (Мнд)	N	СГК-3М	0,34	1,34	1,95
	Z	СВК-3М	0,35	1,34	1,94
	E	СГК-3М	0,34	1,34	1,92
Уакит (Укт)	N	УСФ	0,93	1,65	1,25
	Z	УСФ	0,61	1,14	1,34
	E	УСФ	1,18	1,54	1,18
Тупик (Тпк)	N	УСФ	1,02	4,20	1,00
	Z	УСФ	1,02	4,20	1,00
	E	УСФ	1,02	4,20	1,00
Иркутск (ИркК)	45°	СГК	0,45	4,85	12,5
	Z	СВК	0,50	4,16	15,0
	135°	СГК	0,45	4,88	12,5
Иркутск (ИркГ)	N	ГСГ	1,01	0,96	10,7
	Z	ВСГ	1,03	0,98	13,5
	E	ГСГ	0,98	0,99	12,2
Кабанск (Кбн)	N	СГК	0,45	5,00	12,5
	Z _r	СВК	0,49	4,16	15,0
	E	СГК	0,41	4,96	12,5
Кяхта (Кхт)	N	СГК	0,45	5,00	12,5
	Z	СВК	0,45	4,96	12,5
	E	СГК	0,45	5,00	12,5

T ₂ , сек	K ₁ , кгм ²	K ₂ , кгм ²	σ ²	A, м	l, м
0,42	0,304	0,374 × 10 ⁻⁹	0,284	0,923	0,167
0,40	0,250	0,334 × 10 ⁻⁹	0,285	1,042	0,178
0,40	0,298	0,352 × 10 ⁻⁹	0,286	1,000	0,165
0,49	0,214	0,565 × 10 ⁻⁹	0,43	1,021	0,295
0,46	0,209	0,649 × 10 ⁻⁹	0,47	1,026	0,295
0,49	0,208	0,516 × 10 ⁻⁹	0,37	1,019	0,290
0,70	0,209	0,102 × 10 ⁻⁸	0,465	1,070	0,226
0,70	0,207	0,112 × 10 ⁻⁸	0,465	1,070	0,224
0,70	0,210	0,108 × 10 ⁻⁸	0,465	1,070	0,228
1,20	0,273	0,552 × 10 ⁻⁸	0,094	1,090	0,270
1,00	0,249	0,435 × 10 ⁻⁸	0,582	1,090	0,788
1,20	0,284	0,515 × 10 ⁻⁸	0,093	1,090	0,266
10,3	0,500	0,167 × 10 ⁻⁵	0,030	0,955	0,120
13,0	0,500	0,264 × 10 ⁻⁶	0,030	0,960	0,424
11,9	0,500	0,141 × 10 ⁻⁵	0,030	0,960	0,115
1,20	0,302	0,505 × 10 ⁻⁸	0,102	1,000	0,275
1,00	0,254	0,506 × 10 ⁻⁸	0,571	1,185	0,864
1,20	0,299	0,451 × 10 ⁻⁸	0,097	1,000	0,270
1,20	0,287	0,556 × 10 ⁻⁸	0,100	1,000	0,268
1,20	0,250	0,489 × 10 ⁻⁸	0,505	1,000	0,795
1,20	0,272	0,522 × 10 ⁻⁸	0,099	1,000	0,270

Примечание. Для ст.ИркГ величина K₁ бралась условно, а K₂ рас-

на рис.3 приведены примеры кривых слагаемых \hat{c}_y и \hat{m}_y ($\hat{c} = c_0 c_1, \hat{m} = c_0$). Видно, что кривые производных имеют регулярный характер, полностью соответствующий характеру исходных дифференцируемых функций, а по амплитуде на порядок меньше (для сейсмографа Голицына порядок амплитуд совпадает, но первое остается в силе), что и может служить основанием достаточности выбранного метода регуляризации. Эти величины рассчитывались для всех случаев, и результат одинаков.

считывалась по значениям переводных множителей

Независимость решения от шага дискретизации иллюстрируется рис.4.

Как для короткопериодных сейсмографов, сейсмограммы которых оцифровывались с относительно меньшим числом точек отсчета на видимый период записи, чем для приборов общего типа, так и для приборов общего типа просчет с двойным шагом дает одно и то же: при достаточно малом шаге дискретизации результат расчета не зависит от шага.

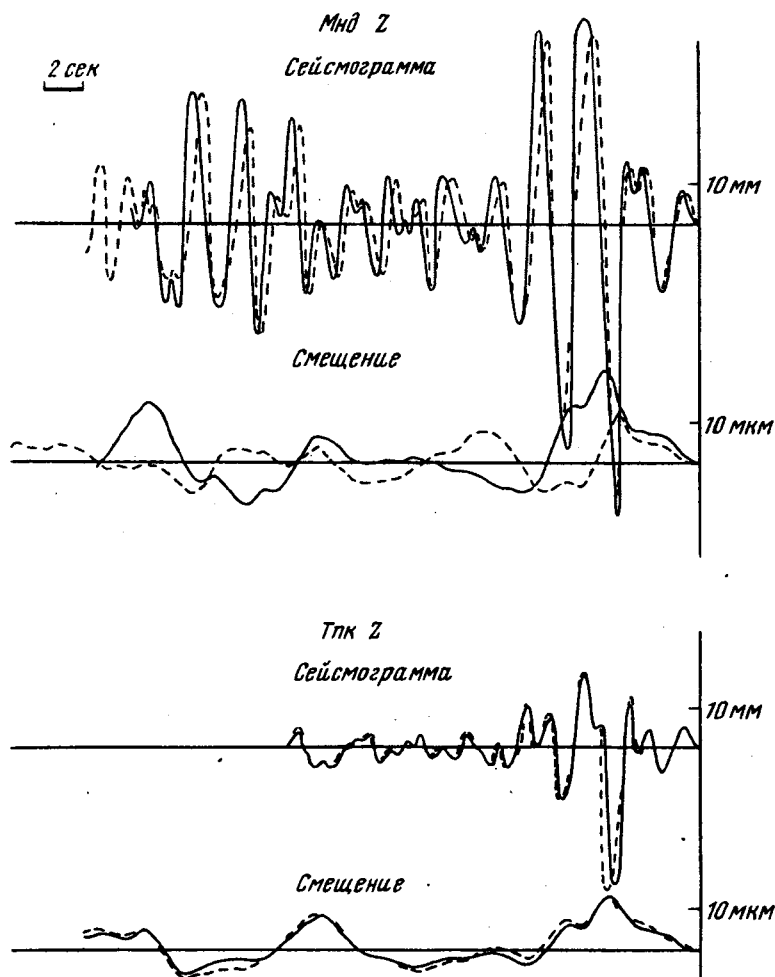


Рис. 5. Воспроизводимость результата при независимом цифровании

На рис.5 приведены пример кривой $y(t)$ по независимому цифрованию и соответствующие результаты расчета истинного смещения. Малые погрешности в исходной функции ведут к малым погрешностям в результате, большие - к большим.

При достаточно малой величине сдвига скользящего интервала интегрирования результат не зависит от величины сдвига (рис.6).

Результат расчета стабилен и при малых вариациях параметров сейсмографа (рис.7).

На рис. 8 показаны результаты решения с различной длиной скользящего интервала интегрирования. Четко прослеживается филь-

тующая роль корректирующего полинома в зависимости от длины скользящего интервала. Видно, что по сейсмограммам короткопериодных сейсмографов уверенно восстанавливаются составляющие истинного смещения "почвы" с периодами, в 5 раз большими периода сейсмоприемника (для скользящего интервала интегрирования 25 сек; при дальнейшем увеличении длины скользящего интервала решение расходится). Для сейсмографов Кириоса и Голицына результат расчета истинного смещения не зависит от длины скользящего интервала интегрирования при длине, большей 75 сек. При длине 75 сек все три компонента волны Р подобны друг другу (наличие на горизонтальных компонентах, некоррелируемых от станции к станции, длиннопериодных колебаний при длине скользящего интервала 150 сек, возможно, обусловлено наклонами).

Средние коэффициенты корреляции R_{CP} , а также $\bar{\sigma}$ и $\sigma\bar{\sigma}$ приведены в табл.3. Значения коэффициентов корреляции, близкие к 1, указывают на независимость получаемого решения (в перекрывающихся частях разных интервалов) от начала интервала интегрирования. Сопоставление $\bar{\sigma}$ с величинами амплитуд истинного смещения указывает на малое рассеяние отдельных результатов.

Согласованность результатов в волне Р для разных сейсмостанций и разных приборов, установленных в одной точке, хорошая.

Независимость результата от типа прибора подтвердили дальнейшие расчеты. На рис. 9 приведены сейсмограммы землетрясения от 28.02.1970 г. с $t_0 = 19^h 52^m 32^s$ сейсмографов СК и СКД сейсмостанции Москва (Обнинск), вертикальная компонента и результаты расчета смещения (постоянные сейсмографов стандартные).

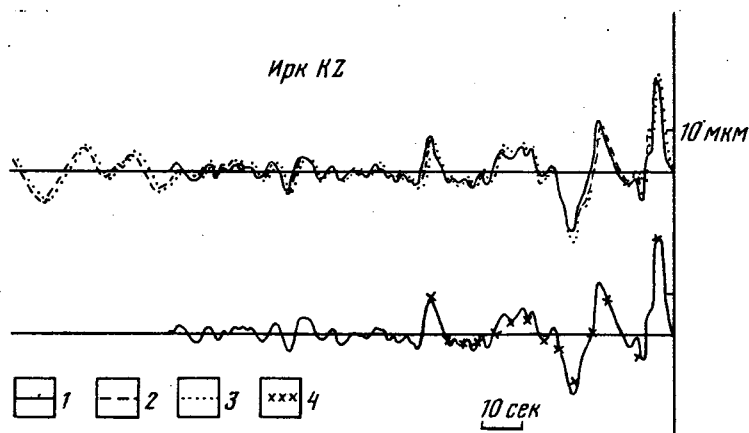


Рис. 6. Устойчивость результата при изменении величины сдвига начала скользящего интервала интегрирования и расчете с двойным шагом

1 - $\Delta\tau = 3,2$ сек; 2 - $\Delta\tau = 7,5$ сек; 3 - $\Delta\tau = 15$ сек; 4 - результат расчета с двойным шагом

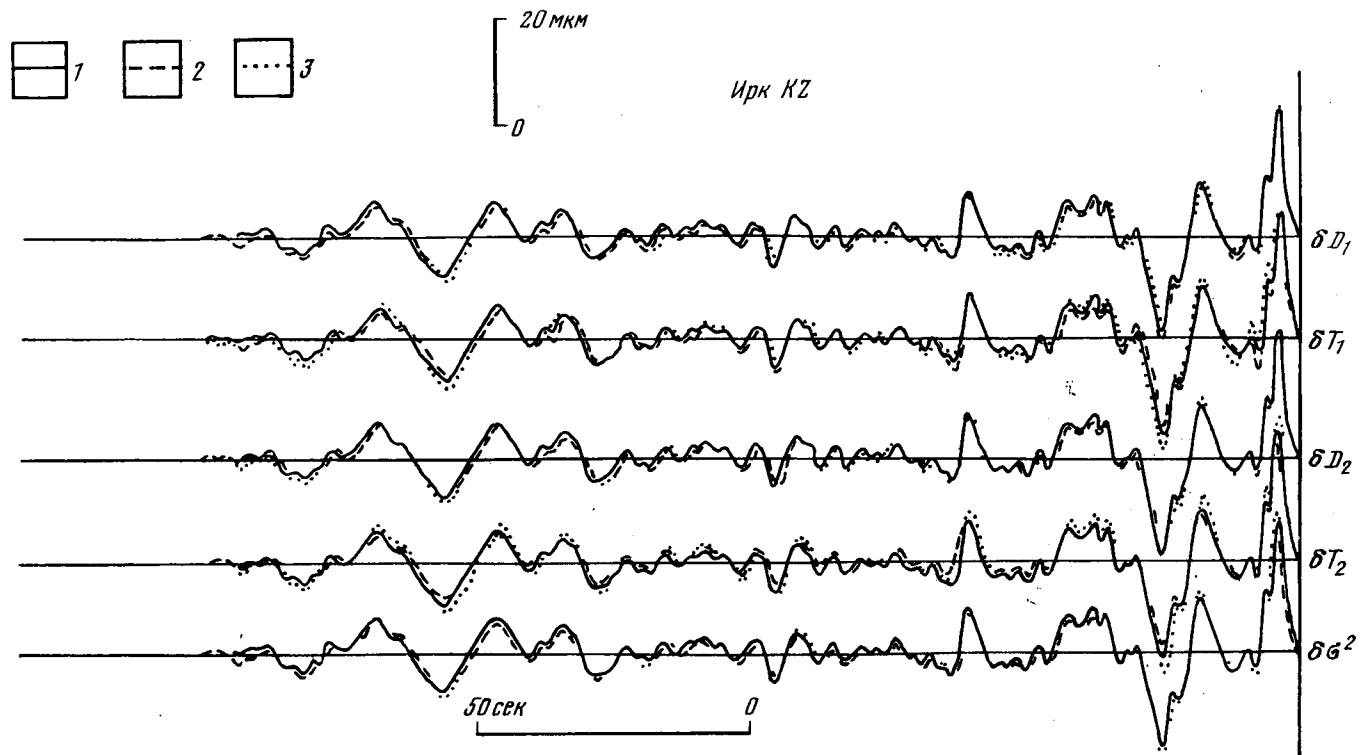


Рис.7. Устойчивость результата при вариации δ параметров сейсмографа
 1 - $\delta=0$; 2 - $\delta=10\%$; 3 - $\delta=-10\%$.

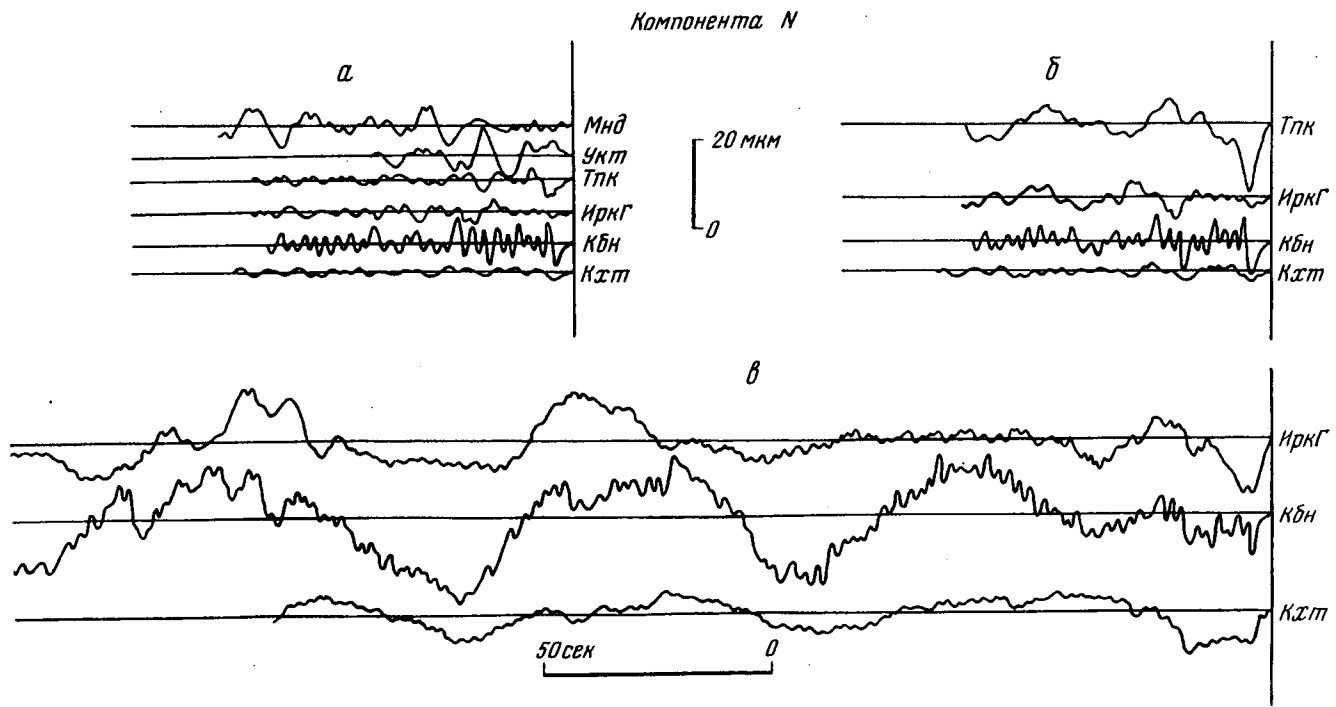


Рис. 8. Результаты расчета с разной длиной τ скользящего интервала интегрирования
 а - $\tau=25$ сек; б - $\tau=50$ сек; в - $\tau=150$ сек

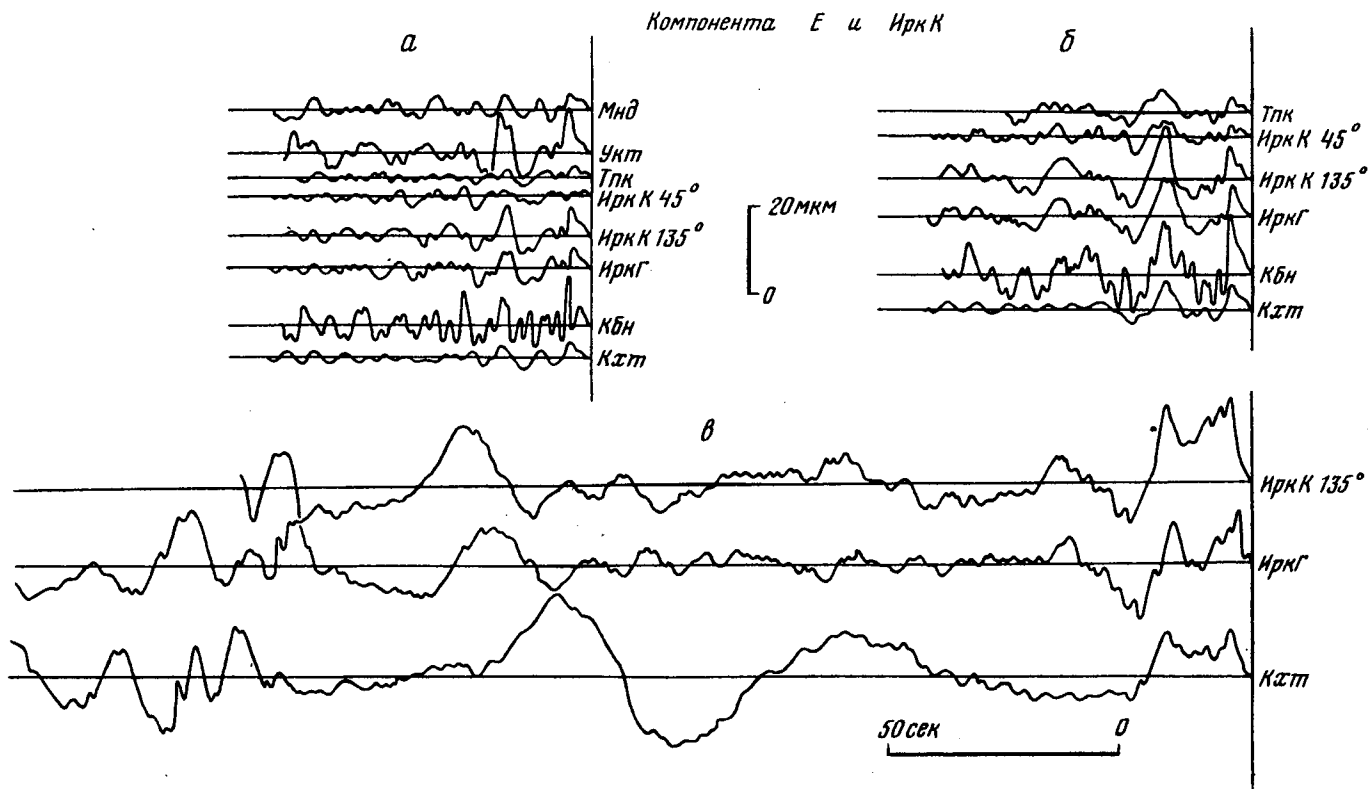


Рис. 8 (продолжение)

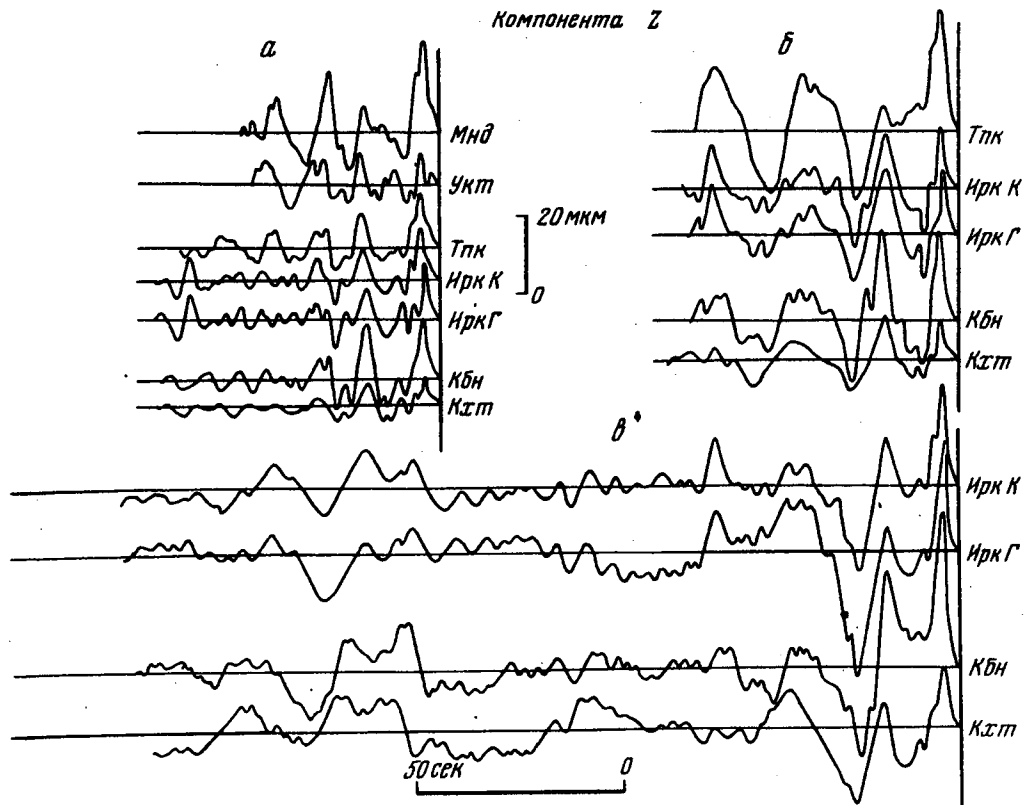


Рис. 8 (окончание)

Таблица 3

Сейсмо- станция	Компо- нента	Длина скользящего интервала интегрирования											
		25 сек			50 сек			75 сек			150 сек		
		R_{cp}	$\bar{\sigma}$	$\sigma\bar{\sigma}$	R_{cp}	$\bar{\sigma}$	$\sigma\bar{\sigma}$	R_{cp}	$\bar{\sigma}$	$\sigma\bar{\sigma}$	R_{cp}	$\bar{\sigma}$	$\sigma\bar{\sigma}$
Иркутск К	45°	0,91	0,3	0,1	0,95	0,2	0,1	0,72	1,0	0,5	0,84	2,0	0,6
	Z	0,89	1,0	0,6	0,96	1,2	0,1	0,92	1,0	0,4	0,82	3,3	0,5
	135°	0,90	0,6	0,3	0,95	0,7	0,2	0,89	0,8	0,2	0,86	1,8	0,3
Иркутск Г	N	0,93	0,3	0,1	0,96	0,4	0,1	0,88	0,6	0,3	0,81	1,5	0,3
	Z	0,83	1,2	0,7	0,94	1,5	0,3	0,90	1,0	0,5	0,91	1,4	0,2
	E	0,88	0,6	0,3	0,95	0,6	0,1	0,93	0,7	0,3	0,91	1,0	0,4
Кабанск	N	0,96	0,4	0,2	0,95	0,4	0,1	0,89	0,8	0,3	0,74	5,5	2,0
	Z	0,84	1,4	0,8	0,97	1,4	0,1	0,92	1,2	0,5	0,92	1,6	0,6
	E	0,92	0,8	0,3	0,96	0,9	0,2	0,85	3,0	0,3	0,87	2,4	0,9
Кяхта	N	0,91	0,2	0,1	0,93	0,2	0,1	0,87	0,4	0,1	0,70	2,0	0,6
	Z	0,88	0,7	0,3	0,94	1,1	0,2	0,85	1,1	0,4	0,71	3,3	0,6
	E	0,90	0,3	0,2	0,93	0,3	0,1	0,86	0,9	0,5	0,77	3,7	1,4

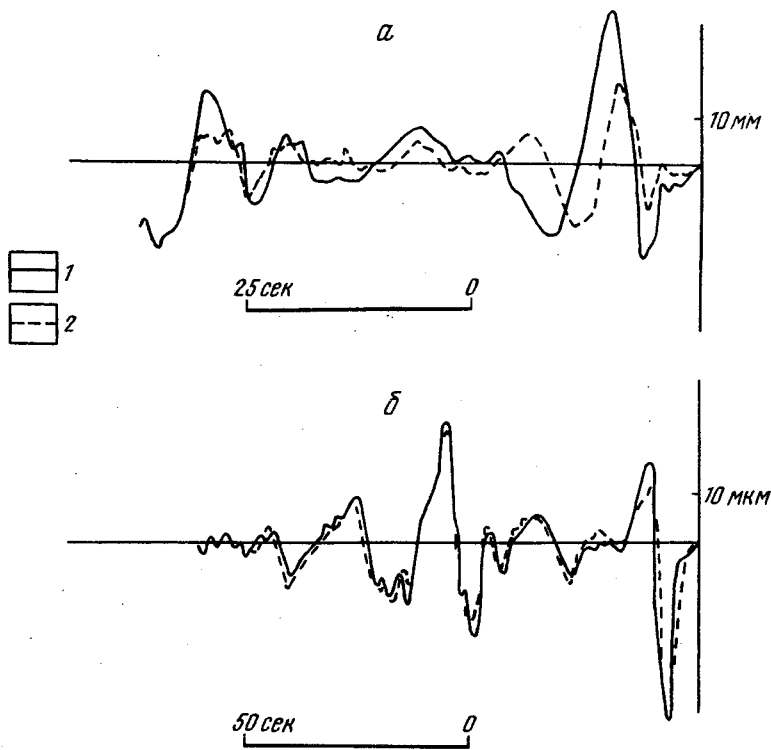
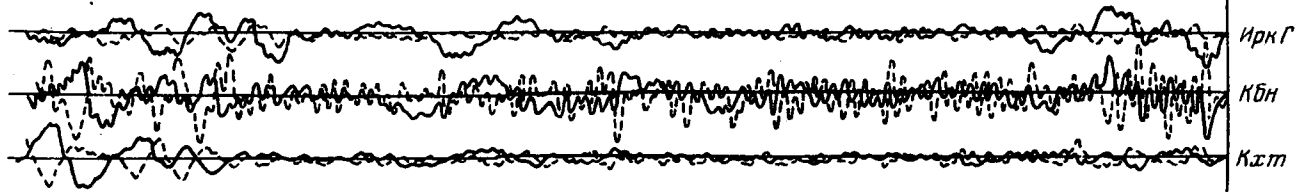


Рис.9. Независимость результата расчета истинного смещения от типа прибора

а - сейсмограммы; б - смещение ($\tau=50$ сек);
 1 - сейсмограф СКД; 2 - сейсмограф СК

На рис. 10 приведены исходные сейсмограммы и рассчитанное по ним истинное смещение в сейсмической волне для землетрясения от 31.03.1965 г. (по короткопериодным сейсмографам станций Монды, Уакит, Тупик - фрагменты смещения, компонента Z, длина скользящего интервала интегрирования 25 сек). Характер несовпадения формы смещения и сейсмограммы, как подтверждается расчетами и по многим другим землетрясениям, типичен для рассмотренных условий. Можно отметить стабильность полученной формы смещения в волне P, независимость от расположения сейсмостанций, типа прибора и условий учета (для данной длины скользящего интервала интегрирования).

Компонента N



Компонента E и ИркК

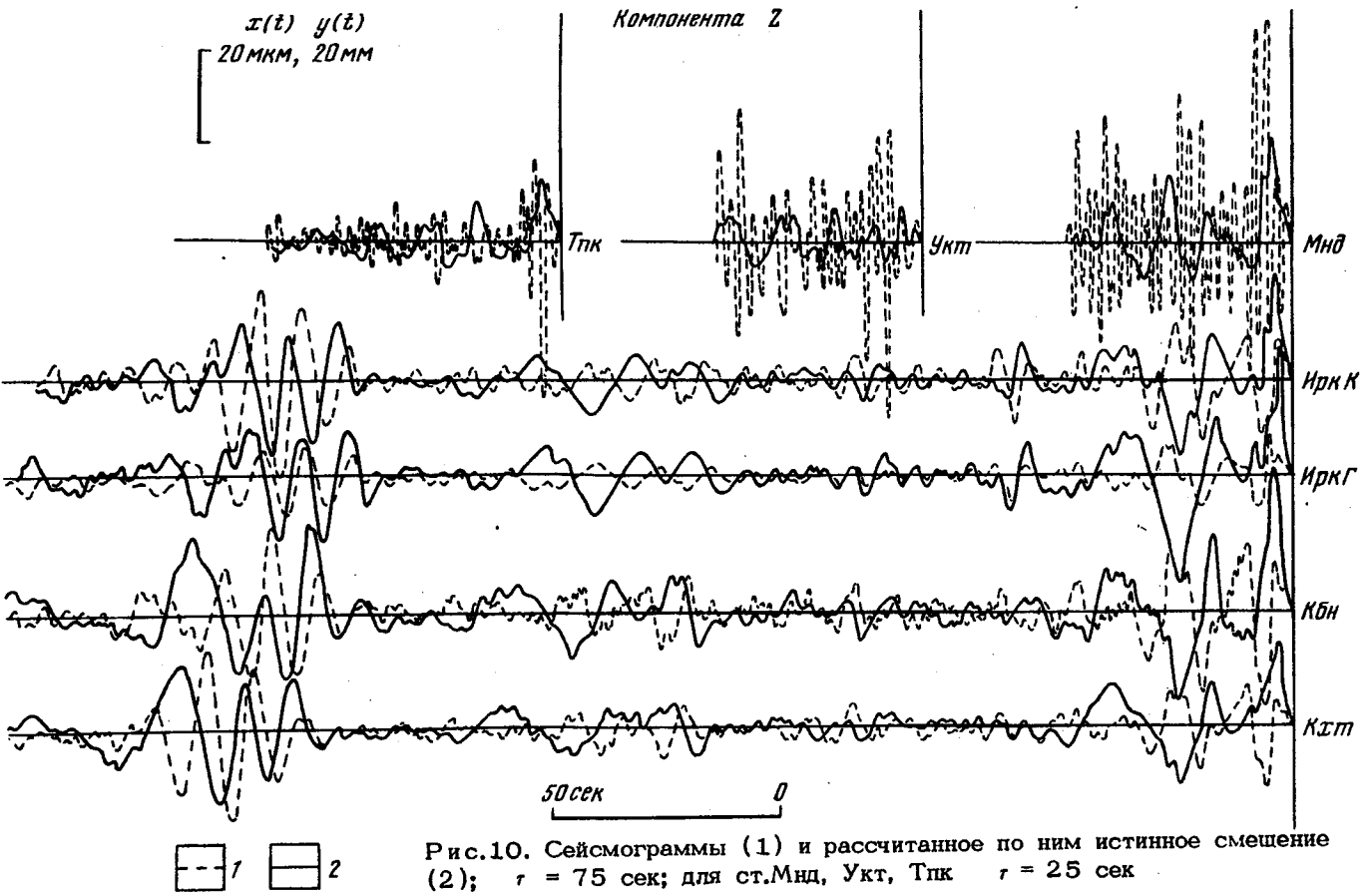
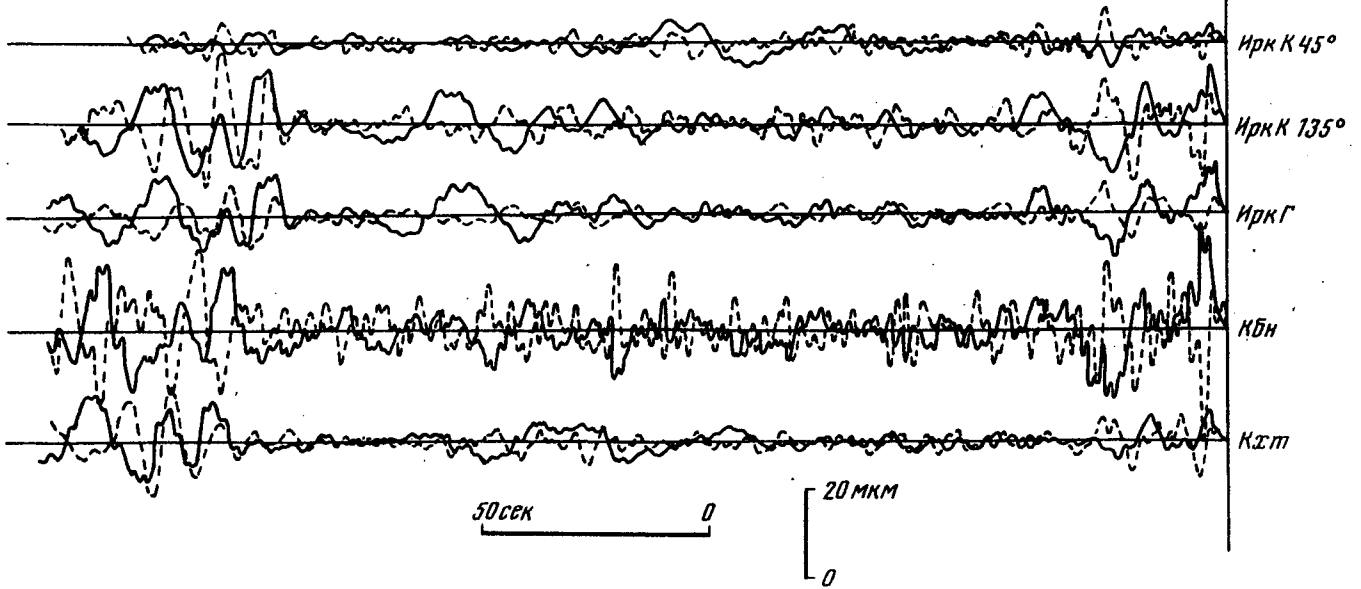


Рис.10. Сейсмограммы (1) и рассчитанное по ним истинное смещение (2); $\tau = 75$ сек; для ст.Мнд, Укт, Тпк $\tau = 25$ сек

04

14

**Некоторые сейсмологические приложения
результатов расчета истинного смещения:
выделение проходящих обменных волн PS
при удаленных землетрясениях**

Вопросы интерпретации результатов в сейсмологическом аспекте при постановке данного исследования не предусматривались. К настоящему времени получены некоторые результаты такого анализа истинного смещения. Предельно кратко они состоят в следующем.

Регистрация продольных и поперечных волн подтверждает правильность выбора в сейсмологии идеально упругой (с двумя упругими параметрами) модели среды. Но тогда должно наблюдаться и такое более тонкое следствие из этой теории, как обменные проходящие волны PS при удаленных землетрясениях, образующиеся на границах раздела первого рода под станцией наблюдения. Теоретически свойства этих волн изучены и описаны очень подробно (Gutenberg, 1944; Саваренский, Кирнос, 1955; Петрашень, 1959; Жигальцев, 1962). Первые попытки выделить эти волны на сейсмограммах были предприняты давно (Бутовская, 1952; Андреев, 1957). Тем не менее до сих пор не только нет полных экспериментальных исследований динамических параметров обменных волн, но и не был разработан способ уверенного выделения хотя бы обменных волн от наиболее резких (по скачку скорости) границ раздела, таких, например, как поверхность Мохоровичича, по сейсмограммам обычных сейсмических станций, оборудованных сейсмографами с гальванометрической регистрацией. Новейшие изыскания в этом вопросе как визуальным способом (Данциг и др., 1969), так и средствами машинного анализа (Гамбурцева и др., 1970) привели их авторов к отрицательному результату. Обменные проходящие волны PS достаточно хорошо выделяются на записях аппаратуры "Земля", но эта аппаратура, являясь фильтрующей для волн от удаленных землетрясений, не позволяет оценить динамические параметры волн.

Задаваясь целью выделить обменные проходящие волны PS при удаленных землетрясениях, мы применили к результатам расчета истинного смещения "почвы" метод разделения интерферирующих волн (Гольцман, Троян, 1967). Для этого находилось направление вектора смещений в продольной волне и рассматривалась проекция полного вектора колебаний в суммарном поле продольной и проходящих обменных волн на плоскость, перпендикулярную вектору смещений в продольной волне.

Для ряда землетрясений по станциям Иркутск, Кабанск, Кяхта и Закаменск получены следующие результаты (табл.4; истинное смещение табулировалось с шагом 0,4 сек, времена запаздывания обменных волн указаны в точках). В интервале 36 сек от момента первого вступления выделено постоянное (независимо от эпицентрального расстояния, азимута и т.д.) число волн, вектор сме-

щений в которых перпендикулярен вектору смещения в продольной волне. Стабильность волнового поля, независимость от источника указывают на его формирование под станцией наблюдения. По динамическим признакам выделенные волны полностью удовлетворяют теоретической модели упругой среды, принятой в сейсмологии, и могут быть интерпретированы как обменные PS-волны, образующиеся на границах раздела под станцией наблюдения (возможное наличие отраженных обменных волн не нарушает однозначности определения поля волн PS). Расшифровка этого волнового поля должна дать структуру коры и верхней мантии (до глубины примерно 250 км).

Для ст. Кабанск интерпретация волны с запаздыванием 5,2 сек, как волны от границы Мохоровичича, дает глубину залегания последней 37,5 км, что прекрасно согласуется с данными ГСЗ (Крылов и др., 1970) и данными, полученными аппаратурой "Земля" (Шербакова и др., 1969а) для этого пункта.

Указание на существование границ раздела первого рода ниже поверхности Мохоровичича полностью согласуется как с данными, полученными аппаратурой "Земля" (Померанцева и др., 1965; Шербакова и др., 1969б), так и с сейсмологическими данными (Магницкий, 1965) и данными ГСЗ (Вольвовский и др., 1967).

Отметим, что нет принципиальных ограничений для выделения по примененному алгоритму обменных волн от более глубоких границ раздела первого рода в верхней мантии (если такие границы существуют).

Результаты расчетов показывают очень высокую эффективность при условии анализа именно истинного смещения (когда сигнал и помехи существенно различаются по частоте) примененного оптимального алгоритма разделения интерферирующих волн: получены разрешающая способность в среднем 1,2 сек при длине сигнала от 10 до 80 сек и уверенное выделение обменной волны при $A_{\max} \geq 1/2 \sigma$, где σ - среднеквадратичная амплитуда шума. Соответствующие параметры, полученные авторами алгоритма разделения (при равенстве частот сигнала и помех): разрешающая способность 0,03 сек при длине сигнала 0,106 сек и $A_{\max} \geq 5 \sigma$. Это обеспечивает возможность (при переходе к анализу именно истинного смещения) стопроцентного использования записей удаленных землетрясений для выделения проходящих обменных волн PS от границ раздела под станцией наблюдения. Как видно из табл. 4, уверенно выделяются волны с относительной амплитудой (по отношению к амплитуде продольной волны) порядка нескольких сотых. По-видимому, такая точность измерений вполне соизмерима с уровнем точности, предполагаемым в других областях физических измерений.

Таблица 4

Дата	Эпицентральное расстояние, град.	A _{max} , мкм	Номер волны										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
			Первая строка - время запаздывания в условных единицах с осреднением до целых начиная с волны № 6, вторая строка - относительная амплитуда										
Иркутск													
17.10.69	30	12,0			4	8,5		19	24		32	38	
					0,34	0,58		0,23	0,08		0,20	0,22	
14.11.70	32	4,0	2		4,5	11,5		18	20				
			0,13		0,09	0,45		0,13	0,03				
30.07.70	36	8,0	2	5	10			22	27	33			
			0,14	0,10	0,10			0,04	0,06	0,05			
12.04.70	40	11,9			9			21				35	
					0,27			0,48				0,27	
5.02.70	42	14,7		4	9,5		15	22	26			38	
				0,20	0,36		0,04	0,25	0,19			0,09	
13.11.70	42	2,6	2		10		19						
			0,38		0,08		0,22						
10.01.70	49	47,4		7			19		25				
				0,50			0,08		0,03				

Дата	Эпицентральное расстояние, град.	A _{max} , мкм	Номер волны									
			12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
			Первая строка - время запаздывания в условных единицах с осреднением до целых начиная с волны № 6, вторая строка - относительная амплитуда									
Иркутск												
17.10.69	30	12,0	46		54	61		70	73		80	88
			0,21		0,10	0,13		0,23	0,28		0,36	0,34
14.11.70	32	4,0			54	62		69		77	84	
					0,05	0,15		0,27		0,18	0,25	
30.07.70	36	8,0	44	48	54	60	66	70		76	81	87
			0,21	0,10	0,08	0,11	0,20	0,10		0,07	0,15	0,05
12.04.70	40	11,9		50			64	67			84	88
				0,30			0,19	0,03			0,13	0,09
5.02.70	42	14,7	45	49		59	63	66	74	76	82	87
			0,05	0,13		0,08	0,18	0,17	0,14	0,09	0,18	0,05
13.11.70	42	2,6	45	48		59	62			75		88
			0,11	0,19		0,38	0,04			0,11		0,34
10.01.70	49	47,4		51		62		71			79	88
				0,14		0,21		0,12			0,08	0,03

Таблица 4 (продолжение)

Дата	Эпицентрально- ное расстояние, град.	A _{max} мкм	Номер волны										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
			Первая строка - время запаздывания в условных единицах с осреднением до целых начиная с волны № 6, вторая строка - относительная амплитуда										
Средняя относительная амплитуда			7	21	21	23	23	12	13	12	12		16
Среднее абсолютное уклонение			5	9	10	10	8	5	10	9	6		4
Кабанск													
24.02.70	22	23,5	2	3		9,5	13	17	24	29	33	38	41
			0,12	0,06		0,30	0,44	0,32	0,08	0,10	0,37	0,26	0,26
6.12.70	27	7,7	1	3	5	10	13	16	24	28		35	43
			0,06		0,11	0,02	0,36	0,09	0,10	0,05		0,22	0,40
19.03.70	40	5,0	1	3			12					35	43
			0,14	0,05			0,34					0,10	0,06
13.11.70*	41	2,9					13		20	24	33	34	
							0,35		0,07	0,34	0,35	0,41	
13.11.70**	41	3,2				9	13	15					
						0,09	0,28	0,22					
30.03.70	48	28,4		3			14		23			36	43
				0,15			0,37		0,10			0,09	0,13
12.04.70	49	47,4			7				19	25			
					0,50				0,08	0,03			

Дата	Эпицентрально- ное расстояние, град.	A _{max} мкм	Номер волны									
			12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
			Первая строка - время запаздывания в условных единицах с осреднением до целых начиная с волны № 6, вторая строка - относительная амплитуда									
Средняя относительная амплитуда			13	16	12	12	12	12	12	10	11	12
Среднее абсолютное уклонение			4	4	7	5	3	6	6	3	6	8
Кабанск												
24.02.70	22	23,5		51	56	60		70	74		84	87
				0,10	0,30	0,28		0,18	0,18		0,26	0,10
6.12.70	27	7,7	48		55	61		69		78	83	87
			0,08		0,11	0,19		0,14		0,14	0,07	0,18
19.03.70	40	5,0		52			64		74		84	88
				0,19			0,15		0,06		0,22	0,04
13.11.70*	41	2,9	46		59		69	73			81	87
			0,20		0,28		0,31	0,33			0,20	0,43
13.11.70**	41	3,2		49		62		70	75			
				0,19		0,16		0,16	0,19			
30.03.70	48	28,4	48		58	63				77		88
			0,05		0,12	0,12				0,17		0,08
12.04.70	49	47,4		51		62		71		79		
				0,15		0,21		0,11		0,07		

Таблица 4 (продолжение)

Дата	Эпицентрально- ное расстояние, град.	A _{max} , мкм	Номер волны											
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
			Первая строка - время запаздывания в условных единицах с осреднением до целых начиная с волны № 6, вторая строка - относительная амплитуда											
31.03.65	58	22,1	1 0,42	3 0,40	5 0,30	7,5 0,75	12 0,28	15 0,31				31 0,48		42 0,51
13.02.70	58	16,3		2 0,27	7 0,09	12,5 0,26	15 0,31	17 0,38	20 0,18	28 0,15	31 0,13	35 0,15	42 0,14	
8.08.69	61	10,7		2 0,10	7 0,10	10,5 0,23	13 0,31	16 0,31	19 0,11	25 0,09	29 0,07	33 0,23	43 0,14	
31.10.70	66	21,7		2 0,35	5 0,10		12 0,13	16 0,20	19 0,21	28 0,04	31 0,13	34 0,35	39 0,23	
29.12.70	78	6,1					11 0,36		22 0,15	28 0,03		36 0,18	42 0,05	
26.01.70	83	8,0		3 0,15			11 0,30			26 0,10	32 0,14	36 0,09		
Среднее время запаздывания			1,3	2,6	6,0	9,8	12,7	16	21	27	31	35	42	
Среднее абсолютное уклонение			0,4	0,5	1,0	1,1	0,9	1	2	2	1	1	1	
Средняя относительная амплитуда			18	19	19	25	28	22	10	8	20	17	17	
Среднее абсолютное уклонение			11	10	12	16	4	7	3	5	12	7	10	

Дата	Эпицентрально- ное расстояние, град.	A _{max} , мкм	Номер волны										
			12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
			Первая строка - время запаздывания в условных единицах с осреднением до целых начиная с волны № 6, вторая строка - относительная амплитуда										
31.03.65	58	22,1	48 0,14	53 0,35	57 0,47	61 0,13		70 0,41		77 0,20	80 0,25	88 0,18	
13.02.70	58	16,3			57 0,12	61 0,13	65 0,07		74 0,12	78 0,05	82 0,04		
8.08.69	61	10,7	47 0,09				63 0,10	70 0,09	73 0,22	76 0,08	85 0,06	88 0,09	
31.10.70	66	21,7										87 0,11	
29.12.70	78	6,1	48 0,11				66 0,08	70 0,08			83 0,10		
26.01.70	83	8,0			54 0,09	60 0,24	65 0,06		73 0,26			87 0,17	
Среднее время запаздывания			48	51	56	60	64	70	74	77	83	87	
Среднее абсолютное уклонение			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Средняя относительная амплитуда			7	16	17	15	6	14	14	9	11	11	
Среднее абсолютное уклонение			2	3	10	4	2	6	5	4	6	6	

Таблица 4 (продолжение)

Дата	Эпицентрально- ное расстояние, град.	Λ_{max} мкм	Номер волны										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
			Первая строка - время запаздывания в условных единицах с осреднением до целых начиная с волны № 6, вторая строка - относительная амплитуда										
Кякта													
31.03.69	23	24,7			6		14		26	32			
					0,04		0,23		0,02	0,10			
24.05.68	26	30,0	3	6	10	14	17		25			38	
			0,30	0,03	0,14	0,26	0,01		0,02			0,09	
17.06.68	27	35,3	2,5	5		15		20	28				
			0,28	0,08		0,19		0,04	0,07				
31.03.65	58	20,1		5	9	14		19	29		36		
				0,11	0,13	0,05		0,04	0,04		0,15		
5.07.69	58	5,0	5	7	9	13		22	26	31		39	
			0,08	0,12	0,08	0,12		0,06	0,08	0,06		0,05	
11.08.65 04 ч.	84	25,4			9			21				39	
					0,13			0,12				0,08	
19.01.69***	85	10,4	2,5	6	11,5				28				
			0,14	0,19	0,19				0,07				
19.01.69****	85	20,8	4,5	7	10	14	17	23	26		34		
			0,25	0,01	0,26	0,10	0,16	0,03	0,04		0,03		

Дата	Эпицентрально- ное расстояние, град.	Λ_{max} мкм	Номер волны									
			12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
			Первая строка - время запаздывания в условных единицах с осреднением до целых начиная с волны № 6, вторая строка - относительная амплитуда									
Кякта												
31.03.69	23	24,7			55				72		85	
					0,01				0,02		0,15	
24.05.68	26	30,0	45	50		60		71	76	83	87	
			0,05	0,10		0,14		0,02	0,01	0,06	0,07	
17.06.68	27	35,3		50		61		69	75		88	
				0,07		0,09		0,03	0,11		0,01	
31.03.65	58	20,1	45			58	66	72	77		88	
			0,09			0,09	0,03	0,15	0,06		0,03	
5.07.69	58	5,0	45		59	63	67		77	83	88	
			0,03		0,12	0,08	0,09		0,04	0,06	0,06	
11.08.65 04 ч.	84	25,4			54	62		72	76		88	
					0,04	0,01		0,05	0,10		0,11	
19.01.69***	85	10,4	45		56	62			77	80	87	
			0,18		0,25	0,15			0,18	0,42	0,05	
19.01.69****	85	20,8	43	51	54		64	73		84	88	
			0,09	0,01	0,13		0,07	0,04		0,08	0,07	

Таблица 4 (продолжение)

Дата	Эпицентрально- ное расстояние, град.	А _{тах'} мкм	Номер волны										
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
			Первая строка - время запаздывания в условных единицах с осреднением до целых начиная с волны № 6, вторая строка - относительная амплитуда										
19.01.69 *****	85	18,6	3 0,18	5,5 0,18	11 0,28	15 0,10		19 0,16	28 0,08				
11.08.65 22 ч.	85	30,7			12 0,05		17 0,05		29 0,03		35 0,06		
Среднее время запаздывания			3,4	5,9	10,2	14,2	17	21	27	32	35	39	
Среднее абсолютное уклонение			0,9	0,6	1,0	0,5		1	1	1	1	1	
Средняя относительная амплитуда			20	8	16	15	7	7	5	8	7	7	
Среднее абсолютное уклонение			7	5	6	7	6	4	2	2	4	2	
Закаменск													
5.03.69	27	11,9	2 0,14	4 0,39	8 0,27	13 0,16	17 0,18	22 0,03	27 0,12	29 0,07	32 0,03	34 0,07	39 0,09
5.09.70	30	25,3	1 0,26	2 0,08	7 0,05	9 0,04	14 0,14	20 0,07		29 0,04	32 0,06	36 0,05	41 0,08
30.07.70	36	4,3		3 0,26	5 0,21	10 0,09	14 0,67	19 0,23	25 0,37	29 0,30		35 0,09	38 0,63
12.04.70	38	16,0			6 0,24		14 0,16			28 0,02			

Дата	Эпицентрально- ное расстояние, град.	А _{тах'} мкм	Номер волны										
			12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
			Первая строка - время запаздывания в условных единицах с осреднением до целых начиная с волны № 6, вторая строка - относительная амплитуда										
19.01.69 *****	85	18,6	44 0,10	49 0,02	56 0,14		65 0,11				77 0,06		85 0,03
11.08.65 22 ч.	85	30,7				60 0,09					76 0,04		88 0,03
Среднее время запаздывания			44	50	56	61	65			72	76	82	87
Среднее абсолютное уклонение			1	1	1	1	1			1	1	1	1
Средняя относительная амплитуда			9	5	11	9	5			5	7	6	6
Среднее абсолютное уклонение			3	3	6	3	3			3	4	1	3
Закаменск													
5.03.69	27	11,9	47 0,07		54 0,04				66 0,04		75 0,05		87 0,10
5.09.70	30	25,3	46 0,03	51 0,08	54 0,05		64 0,04			72 0,06	76 0,04	82 0,07	85 0,10
30.07.70	36	4,3	44 0,09	49 0,28	52 0,37	56 0,09	62 0,37	66 0,28			76 0,23	82 0,09	85 0,09
12.04.70	38	16,0	44 0,02		52 0,11					72 0,04	75 0,08	82 0,21	88 0,10

Таблица 4 (окончание)

Дата	Эпицентрально- ное расстояние, град.	A _{max} ' мкм	Номер волны													
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
			Первая строка - время запаздывания в условных единицах с осреднением до целых начиная с волны № 6, вторая строка - относительная амплитуда													
19.03.70	42	10,8		2 0,02				16 0,04			27 0,06					
27.03.70	52	5,9		4 0,10		11 0,05				24 0,11		31 0,08			41 0,03	
13.02.70	57	12,2		3 0,16		8 0,12	13 0,15	18 0,05	24 0,07				34 0,06	37 0,02		
28.12.70	70	5,6		3 0,18		10 0,11	15 0,25	21 0,18						42 0,05		
Среднее время запаздывания			1,5	3,0	6,5	10,2	15	20	25	28	32	35	40			
Среднее абсолютное уклонение			0,5	0,6	1,0	1,3	1	1	1	1	1	1	2			
Средняя относительная амплитуда			20	16	18	9	21	10	15	9	5	6	5			
Среднее абсолютное уклонение			6	9	7	3	12	6	9	7	2	1	2			

Дата	Эпицентрально- ное расстояние, град.	A _{max} ' мкм	Номер волны										
			12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
			Первая строка - время запаздывания в условных единицах с осреднением до целых начиная с волны № 6, вторая строка - относительная амплитуда										
19.03.70	42	10,8				57 0,09	64 0,11					82 0,06	88 0,08
27.03.70	52	5,9		48 0,02				63 0,03					88 0,05
13.02.70	57	12,2	47 0,06	50 0,07	55 0,04	58 0,03	64 0,03		72 0,02	77 0,08	83 0,07		
28.12.70	70	5,6				56 0,05	63 0,05	68 0,05			75 0,09	83 0,07	88 0,07
Среднее время запаздывания			46	49	53	57	63	67	72	76	82	87	
Среднее абсолютное уклонение			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
Средняя относительная амплитуда			5	10	10	5	9	11	4	8	8	7	
Среднее абсолютное уклонение			2	7	8	3	8	9	1	4	3	1	

* Длина сигнала 16 сек; ** длина сигнала 78 сек; *** длина сигнала 13 сек; **** длина сигнала 28 сек; ***** длина сигнала 68 сек.

Выводы

1. Для определения динамических параметров сейсмических волн при гальванометрической регистрации можно и нужно в общем случае применять метод численного интегрирования.

2. Результаты расчетов подтверждают предположения, лежащие в основе алгоритма. Алгоритм разработан до степени, при которой программа уже может служить средством для сейсмологических исследований.

3. Для рассмотренных типов приборов сейсмограммы не совпадают существенно по форме с истинным видом зависимости движения "почвы" в сейсмической волне при высокой стабильности формы продольной волны на разных сейсмостанциях.

4. По сейсмограммам электродинамических сейсмографов с гальванометрической регистрацией истинное смещение "почвы" уверенно восстанавливается по методу численного интегрирования до периодов волн, в 4-5 раз больших периода сейсмоприемника, т.е. по сравнению с аппаратными возможностями (сейсмограф записывает смещение при $T_{\omega} \ll T_1$) граница возможности определения смещения по сейсмограмме расширяется по периоду волны примерно на порядок.

Рассмотрение различных способов определения по сейсмограммам электродинамических сейсмографов с гальванометрической регистрацией истинного вида движения "почвы" в сейсмической волне показывает, что из всех способов решение, полученное методом преобразования Лапласа при самых общих предположениях относительно неизвестной функции $x(t)$, не содержит принципиальных ограничений и в этом смысле является совершенно точным.

Приближенный характер оно приобретает при переходе к численному интегрированию и отысканию коэффициентов корректирующего полинома. В домашнем периоде это играло решающую роль в ограничении его применения. Теперь имеются столь мощные средства (ЭВМ) для фактического выполнения счетной работы, что это ограничение становится второстепенным, так что возможно перейти к решению обратной задачи сейсмометрии в точной постановке.

Высокая стабильность рассчитанного по независимым данным волнового поля в продольной волне для землетрясения от 31.03.1965 г., однозначность определения вторичного волнового поля обменных волн, образующегося под станцией наблюдения, — все это позволяет предполагать, что существующая аппаратура может удовлетворить запросы динамики.

По-видимому, операция перехода от сейсмограмм электродинамических сейсмографов с гальванометрической регистрацией к истинному виду движения "почвы", смещению (скорости или ускорению), должна занять свое место в схеме анализа потока сейсмологических данных, предлагаемой в работе В.И.Кейлис-Борока (1968).

Автор глубоко благодарен покойному А.А.Трескову, своим содействием и вниманием к работе поощрявшему автора во все годы ее выполнения; Д.П.Кирносу, принявшему живейшее участие в обсуждении результатов расчетов истинного смещения; Е.Ф.Саваренскому, отнесшемуся к этим результатам с большим вниманием; А.С.Алексееву, замечания которого о некорректности численного дифференцирования привели к значительному улучшению алгоритма. Автор признателен О.Е.Старовойту за предоставление материалов наблюдений.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, ВСТРЕЧАЮЩИХСЯ В ТЕКСТЕ

- A - длина оптического рычага;
- D_1 - постоянная затухания сейсмоприемника;
- D_2 - постоянная затухания гальванометра;
- k_1 - момент инерции маятника сейсмоприемника;
- k_2 - момент инерции рамки гальванометра;
- l - приведенная длина маятника сейсмоприемника;
- n_1 - круговая частота свободных колебаний сейсмоприемника;
- n_2 - круговая частота свободных колебаний гальванометра;
- T_1 - период свободных колебаний сейсмоприемника;
- T_2 - период свободных колебаний гальванометра;
- T_ω - период сейсмической волны;
- ϵ_1 - коэффициент затухания сейсмоприемника;
- ϵ_2 - коэффициент затухания гальванометра;
- ν - угол поворота маятника сейсмоприемника;
- ϕ - угол поворота рамки гальванометра;
- $\sigma^2 = \sigma_1 \sigma_2$ - коэффициент связи;
- k - переводной множитель гальванометрической регистрации;
- V_0 - индикаторное увеличение сейсмографа.

```

begin integer a, b, N, i, j, f, l1, l2, cp, cp1, cn, n, ic, r,
l, k, T, Ay, Ay0, iy, H, H1, Amx, Too, chigM, L, Cc, Il, Icp,
Ih, T1, T2; real c, m, p, q, s, t, h, h1, h2, mig, Tmig, xmig,
mx, mx1, Tmx, Tmx1, igmx, igmx1, igM, igM1, igigM, igM2, my,
igy, ty, v, migy, tv, Lcn; array R[1:50];
Mm: p0042(N, h, L, ic, cp, Lcn, Cc, Il, Icp, Ih, T); p1041(N,
h, L, ic, cp, Lcn, Cc, Il, Icp, Ih, T); cp1:=cp; h1:=h; l2:=0;
begin real d1, d2, t1, t2, k1, k2, ig2, A, l, pi;
array a[1:9];
procedure cI;
begin d1:=a[1]; d2:=a[2]; t1:=a[3]; t2:=a[4]; k1:=a[5]; k2:=
a[6]; ig2:=a[7]; A:=a[8]; L:=a[9]; pi:=3.14159; c:=1/(4*pi*A*
sqrt(4*d1*d2*k1*ig2/(t1*t2*k2))); m:=4*pi*c*(d1/t1 + d2/t2);
p:=4*pi*t1*t2*c*(1/t1*t2 + 1/t2*t2 + 4*d1*d2*(1-ig2)/(t1*t2)); q:=
16*pi*t1*t2*c*(d1/(t1*t2*t2)+d2/(t1*t2*t2)); s:=8*pi*t4*c/(t1*t2)t2;
p1041(c, m, p, q, s)
end;
p0105(30, a[1], Kp, 0); Kp: p0105; p0105(52, a[1], 542, a[9]);
p1041(a); cI
end;
begin real yc, y0, y1, y2, y3, t, t0, t1, t2, t3, y0j;
array y[-500:1200];
procedure Control;
begin if abs(y[i-1])>abs(y[i+1]) then y1:=abs(y[i-1]) else
y1:=abs(y[i+1]); y3:=2 y1; y2:=abs((y[i-1]+y[i+1])/2-y1);
if y2<y1 or (y2<y3 and sign(y[i-1])#sign(y[i+1])) then else
y[i]:=(y[i-1]+y[i+1])/2
end;

```

```

procedure Filtr;
begin for i:=1 step 1 until N-1 do
  begin if i=1 then
    begin y1:=y[i-1]; y2:=y[i]; y3:=y[i+1]
    end else begin y1:=y2; y2:=y3; y3:=y[i+1] end; y[i]:=
    (y1+2*y2+y3)/4
  end
end;

procedure Ch;
begin if h>.01 and h<=.015 then h:=.01; if h>.015 and h<=.025
then h:=.02; if h>.025 and h<=.055 then h:=.05; if h>.055 and
h<=.15 then h:=.1; if h>.15 and h<=.25 then h:=.2; if h>.25
and h<=.55 then h:=.5; if h>.55 and h<=1.5 then h:=1; if h>
1.5 and h<=2.5 then h:=2; if h>2.5 then h:=5
end;

procedure Interpol;
begin t:=t+h; l:=entier(t/h1); t0:=(l-1) h1; t1:=t0+h1; j:=j-
500; t2:=t1+h1; t3:=t2+h1; y0:=y[l-1]; y1:=y[l]; y2:=y[l+1];
y3:=y[l+2]; t0:=t-t0; t1:=t-t1; t2:=t-t2; t3:=t-t3; y0j:=y1+
(y2-y1)*t1/h1; y[j]:=((y0+y3)*t1*t2+y1*t2*(t3-2*t0)+y2*t1*(t0-
2*t3))/(2*h1)2; if y0j=0 then
  begin if y[j]=0 then else go to P
  end else if abs((y0j-y[j])/y0j) <=.05 then else
P: begin y0j:=((-y0*t1+y1*t0)*t2*t3+(y3*t2-3*y2*t3)*t0*t1)/(6*h14
3); if y[j]=0 then begin if y0j=0 then else go to P1 end else
P1: begin y[j]:=y0j; p1024(3,t) end
end; j:=j+500
end;

for i:=0 step 1 until 1200 do y[i]:=0.7777; p0105(30, y[0], B, 0);
B: t:=0.7777; N:=0; B0: N:=N+1; if y[N]≠t then go to B0;
p0105; p0105(52, y[0], 542, y[1200]); T2:=H:=H1:=1000;
for i:=0 step 1 until 2 do begin if H=y[i] then go to B1 end;

```

```

go to B2; B1: N:=N-3; for i:=3 step 1 until N do y[i-3]:=y[i];
H:=H1:=0; y[0]:=0; B2: for i:=0 step 1 until N do y[i]:=y[i]/L;
for i:=1 step 1 until N-1 do Control; p1023(1, y[0], y[N]);
Filtr; p1023(2, y[0], y[N]); Ch; i:=entier((N-20)*h1/h); if i≤
1200 then N:=i; if H=0 then
begin t:=y[-500]:=0; if h>h1 then go to PO else
  begin yc:=y[1]*h/h1; t:=h; for j:=2 step 1 until N do
    Interpol; y[-499]:=yc; go to PO1
  end; PO: for j:=1 step 1 until N do Interpol; go to PO1
end; t:=9*h; for j:=0 step 1 until N do Interpol; PO1: for j:=
N step -1 until 0 do y[j]:=y[j-500]; h1:=h; t:=N*h; p1041(h,t);
p1023(3, y[0], y[N]); if H=0 then
begin p1050(143, 902, y[0], y[N]); i:=1; y0:=y1:=y2:=y3:=0;
  Ct0: yc:=0; Ct: i:=i+1; if sign(y[i])=sign(y[i-1]) then
    begin if abs(y[i]) > yc then begin yc:=abs(y[i]); T1:=i end;
    go to Ct
  end else
begin y0:=y1; y1:=y2; y2:=y3; y3:=yc; if y0=0 then go to Ct1;
    if y0>y1 and y0>y2 and y0>y3 then go to Ct2; Ct1: i:=i+1;
    if sign(y[i])=sign(y[i-1]) then go to Ct1 else go to Ct0
  end; Ct2: T1:=entier(T1/2)
end else p1050(143, 900, y[0], y[N]); p1024(4, N)
end;
M: k:=entier(T/h); l1:=l:=entier(k/2);
M1: iy:=2*l+1; if l=l1 then Cn:=entier(Lcn*.1*i*y/4)*4; n:=
entier((N-iy)/cn); my:=cn*h; migy:=iy*h; p1041(migy, my);
M2: f:=0; Ay0:=Ay:=900; my:=migy:=mx:=mx1:=igm:=igm1:=igmM:=0;
M3: begin real s1, s2, s3, s4, s6, y3, y5, yc, igyc, tyc;
  iy+1 do begin y[k]-y3-y5*t; t:=t+h end
end;
procedure It;
begin Call; P1: k:=0; if H=0 then I[k]:=0 else I[k]:=c

```

```

((y[2*k-2]-8*y[2*k-1]-y[2*k+2])/(12*h)+(y[2*k+1]-y[2*k-1])/
(2*h))/2+m*y[2*k]; s1:=s2:=s3:=0; for k:=1 step 1 until 1 do
Ifunc; p1023(6,I[1-4],I[1]); if abs(I[1])<=.1 then go to
P2; if H=0 then
begin y5:=I[1]/(2*(1*h)4+2*(p+q*2*1*h/3+s*2*(1*h)4/3));
  t:=0; for k:=-2 step 1 until iy+1 do
  begin y[k]:=y[k]-y5*t; t:=t+h
  end; p1024(7,y5); go to P1
end else Correct; p1024(7,y3,y5); go to P1; P2: if (6*x1)>
1800 then
begin l2:=1; h2:=h; l:=entier(1/2); cn:=cn/2; for i:=1
  step 1 until 1 do I[i]:=I[2*i]; h:=2*h
end; p1023(8,I[0],I[1]); p1050(142,2400,I[0],I[1]);
p1041(h,h)
end; It
end;
begin real b1, c, t1; array P,I[0:1], t[1:2*cp+1], T[1:cp+1],
a[1:cp+2,1:cp+2],ab[1:cp+1,1:cp+1], A[0:cp];
procedure Matr;
begin T:=0; t:=1; for i:=0 step 1 until 1 do T[1]:=T[1]+
I[i]; for r:=2 step 1 until 2 cp+1 do
begin t[r]:=0; if r<=cp+1 then T[r]:=0;
  for i:=0 step 1 until 1 do
  begin t1:=2*i*x*.1; t[r]:=t[r]+t1(r-1); if r<=cp+1 then
    T[r]:=T[r]+I[i]*t1(r-1)
  end
end
array I[0:1], y[-2:iy+1];
procedure Call;
begin Ay:=Ay0+f*cn; go to B1; B00: p0105(0,0,0,Bk); B01:
  p0105(57,402,0,0); B02: p0105(50,411,0,y[1]); B03: p0105
  (144,0,0,0); B04: p0105(130,0,0,0); B1: p0105(61,iy,B03,
  k); p0105(13,B02,k,B3); p0105(14,103,B01,B2); p0105(13,

```


B2,B00,B2); p0105(61,Ay,B04,k); p0105(13,B3,k,B3); p0105
 (0,B3,0,B4); B2: p0105(1,0,0,0); B3: p0105(1,0,0,0);
 p0105(70,y[-2],B4,a); B4: p0105(1,0,0,0); p0105(70,y[-2],
 B5,b); B5: if a#b then go to B3; Bk: p0105(1,0,0,0)

end;

procedure Ifunc;

begin s1:=s1+h*(y[2*k-2]+4*y[2*k-1]+y[2*k])/3; s2:=s2+2*h^2*
 ((k-1)*y[2*k-2]+2*(2*k-1)*y[2*k-1]+k*y[2*k])/3; s3:=s3+
 4*h^3*(k-1)^2*y[2*k-2]+(2*k-1)^2*y[2*k-1]+k^2*y[2*k])/3;
 s4:=2*k*h*s1-s2; s6:=4*(k*h)^2*s1-4*k*h*s2+s3; y3:=(y[2*k+
 1]-y[2*k-1])/(2*h); y5:=(y[2*k-2]-8*y[2*k-1]+8*y[2*k+1]-
 y[2*k+2])/(12*h); yc:=c*(y3+y5)/2; tyc:=(k+fx*cn/2)*2*h;
 igyc:=sqrt((y3*c-yc)^2+(y5*c-yc)^2); if abs(yc)>abs(my)
then begin my:=yc; igy:=igyc; ty:=tyc end; if abs(igyc)>
 abs(migy) then begin v:=yc; migy:=igyc; tv:=tyc end; I[k]:=
 yc+mxy[2*k]+p*s1+q*s4+s*s6; y3:=mxy[2*k]; y5:=p*s1; s4:=
 q*s4; s6:=s*s6; p1024(5,yc,y3,y5,s4,s6)

end;

procedure Correct;

begin s1:=(p+q*1*h/2+s*(1*h)^2/3)*1*h; s3:=(p+q*1*h+s*(1*h)^
 2*4/3)*1*2*h; s2:=(p+q*1*h/3+s*(1*h)^2/6)*(1*h)^2/2; s4:=
 (p+q*1*h*2/3+s*(1*h)^2*2/3+s*(1*h)^2*2/3)*(1*h)^2*2; s6:=
 s1*s4-s2*s3; k:=entier(1/2); y3:=(s4 I[k]-s2*I[1])/s6;
 y5:=(s1*I[1]-s3*I[k])/s6; t:=0; for k:=-2 step 1 until
end; p1024(9,t,T); for i:=1 step 1 until cp+1 do
for r:=1 step 1 until cp+i+1 do
begin j:=-r-i+1; if r<cp+i+1 then
begin b:=3+i-r; if b>0 then a[i,j]:=(t[r]/t[i+3])/10^b;
if b=0 then a[i,j]:=1; if b<0 then
begin k:=-b; a[i,j]:=(t[r]/t[i+3])*10^k
end
end else a[i,j]:=(T[i]/t[i+3])/10^3

```

end; p1024(10,a)
end;
procedure Apol;
begin if H=0 then
  begin for i:=1 step 1 until cp+1 do
    for j:=1 step 1 until cp+1 do ab[i,j]:=a[i+1,j+1];
    p1024(10,ab); p1052(cp+1,cp,ab); for i:=1 step 1 until
    cp do A[i]:=ab[i,cp+1]; A[0]:=0
  end else
  begin p1052(cp+2,cp+1,a); for i:=1 step 1 until cp+1 do
    A[i-1]:=a[i,cp+2]
  end
end;
procedure Xt;
begin if H=0 then
  begin k:=0; Pc: k:=k+1; if k≤T1 then
    begin if sign(I[k-1]-I[k])=sign(I[k]-I[k+1]) then
      go to Pc
    end else
    begin k:=0; Pc0: k:=k+1; if k≤T1 then
      begin if sign(I[k]-2×I[k-1]+I[k-2])=sign(I[k+1]-
      2×I[k]+I[k-1]) then go to Pc0
      end else go to Pc1
    end; j:=k; b1:=(4×I[1]-I[2])/(4×h); t1:=2×j×h; P[j]:=
    A[0]; for i:=1 step 1 until cp do P[j]:=P[j]+A[i]×t1↑i;
    c:=(P[j]-b1×t1)/t1↑2; for k:=1 step 1 until j-1 do
    begin t1:=2×k×h; P[k]:=(b1+c×t1)×t1; I[k]:=I[k]-P[k]
    end; T2:=0; go to Pc2; Pc1: j:=T2:=1; Pc2:
    for k:=j step 1 until l do
    begin t1:=2×k×h; P[k]:=A[0]; for i:=1 step 1 until cp do
    P[k]:=P[k]+A[i]×t1↑i; I[k]:=I[k]-P[k]
    end

```

```

end else
begin I[0]:=I[0]-A[0]; for k:=1 step 1 until l do
  begin t1:=2*k*xh; P[k]:=A[0]; for i:=1 step 1 until cp do
    P[k]:=P[k]+A[i]*t1↑i; I[k]:=I[k]-P[k]
  end
end; p1024(12,j,I); p1024(8,P)
end;
p1050(132,2400,I); Matr; Apol; p1024(11,A); Xt; p1050(142,
2400,I)
end;
begin integer c,m,p, q, kk, rr, Tk; real TO, X, Ic, igX, igX1,
r1, igI; integer array ch[0:l]; array x,I,Mx,igx[0:l];
procedure IntrI;
begin for j:=r step 1 until k-1 do
  begin if sign(I[j])=sign(I[j+1]) then else
    begin b:=b+1; if b=1 then i:=j else ch[b]:=j-1; i:=j
  end
end; for j:=2 step 1 until b do Tk:=Tk+ch[j]; Tk:=Tk/(b-1);
b:=ch[1]:=0; for j:=r step 1 until k-1 do
  begin if sign(x[j+cn/2])=sign(x[j+1+cn/2]) then else
    begin b:=b+1; if b=1 then i:=j else ch[b]:=j-1; i:=j
  end
end; for j:=2 step 1 until b do ch[1]:=ch[1]+ch[j];
ch[1]:=ch[1]/(b-1); Tk:=entier((Tk+ch[1])/4)
end;
procedure CR;
begin for j:=r step 1 until k do
  begin X:=X+x[j+cn/2]; Ic:=Ic+I[j]
  end; X:=X/(k-r); Ic:=Ic/(k-r); igX:=igI:=0;
  for j:=r step 1 until k do
    begin igX:=igX+(x[j+cn/2]-X)↑2; igI:=igI+(I[j]-Ic)↑2
  end; igX:=sqrt(igX); igI:=sqrt(igI); R[f]:=0;

```

```

    for j:=r step 1 until k do R[f]:=R[f]+(x[j+cn/2]-X)
      (I[j]-Ic); R[f]:=R[f]/(igX*igI)
    end;
  procedure CigM;
  begin for j:=r step 1 until k do
    begin ch[j]:=ch[j+cn/2]+1; Mx[j]:=((ch[j]-1)*x[j+cn/2]+
      I[j])/ch[j]; if ch[j]=2 then igMx[j]:=sqrt((x[j+cn/2]-
      Mx[j])2+(I[j]-Mx[j])2) else igMx[j]:=sqrt((ch[j]*
      (ch[j]-2)*igx[j+cn/2]2+(ch[j]-1)*(x[j+cn/2]-I[j])2)/
      (ch[j]*(ch[j]-1)))
    end; igM:=0; for j:=r step 1 until k do igM:=igM+igMx[j];
    igM:=igM/(k-r); p1024(14,igM)
  end;
  procedure CigigM;
  begin chigM:=f; if f=1 then igM1:=igM else igM2:=((chigM-1)
    igM1+igM)/chigM; if f=2 then igigM:=sqrt((igM1-igM2)2+
    (igM-igM2)2); if f>2 then igigM:=sqrt((chigM*(chigM-2)*
    igigM2+(chigM-1)*(igM1-igM)2)/(chigM*(chigM-1)));
    if f≠1 then igM1:=igM2; p1024(15,igM1)
  end;
  procedure FrMx;
  begin if r≥2 then for j:=rr step 1 until r-1 do
    begin Mx[j]:=x[j+cn/2]; igMx[j]:=igx[j+cn/2]; ch[j]:=ch[j+
      cn/2]
    end
  end;
  procedure FkMx;
  begin if kk=q then for j:=k+1 step 1 until kk do
    begin Mx[j]:=I[j]; igMx[j]:=0; ch[j]:=1
    end; if kk=m-cn/2 then for j:=k+1 step 1 until kk do
    begin Mx[j]:=x[j+cn/2]; igMx[j]:=igx[j+cn/2]; ch[j]:=
      ch[j+cn/2]
    end
  end

```

```

end
end;
procedure Max;
begin i:=0; p0105(20,2, 0,i); if (Cc=0 and f=n) or (Cc≠0 and
f=Cc) or i=1 then i:=k else i:=cn/2-1; for j:=rr step 1
until i do
begin if igMx[j]> mig then
begin mig:=igMx[j]; xmig:=Mx[j]; Tmig:=(j+cn/2*f)*2*h
end; if abs(Mx[j])>mx and igMx[j] >0 then
begin mx:=Mx[j]; igmx:=igMx[j]; Tmx:=(j+cn/2*f)*2*h
end
end; p1024(16, mig, xmig, Tmig, mx, igmx, Tmx)
end;
procedure Smr;
begin p1050(132,2400,I); i:=0; j:=1; Mk: if sign(I[j])=sign
(I[j-1]) then begin j:=j-1; go to Mk end; if f=0 then
begin if H≠0 then
begin Mn: if sign(I[i])=sign(I[i+1]) then
begin I[i]:=0; i:=i+1; go to Mn
end; I[i]:=0
end; c:=0; m:=j; p1050(142,3000,I[c],I[m]);
for k:=0 step 1 until l do begin ch[k]:=1; igx[k]:=0 end;
p1050(142,3600,ch); p1050(143,105,igx); Amx:=600*ic;
H:=1000; go to Mp
end; p1050(132,3000,x[c],x[m]); p:=1; q:=j; if q>=m-cn/2
then begin k:=m-cn/2; kk:=q end else begin k:=q; kk:=m-
cn/2 end; if c≤cn/2-1 then
begin p1050(142,Amx,x[c],x[cn/2-1]); if H1≠0 then TO:=
0; p1041(TO); Amx:=Amx+cn/2; c:=cn/2
end; r:=rr:=p; b:=Tk:=0; Intri; Xi:=Ic:=0; p1050(132,3600,
ch); p1050(133,105,igx); i:=r; for j:=r step 1 until r+Tk do
begin if abs(I[j]-x[j+cn/2])>=abs(I[j+1]-x[j+cn/2+1]) then

```

```

i:=j+1 else go to PrO
end; PrO: r:=i; i:=k; for j:=k step -1 until k-Tk do
begin if abs(I[j]-x[j+cn/2]) $\geq$ abs(I[j-1]-x[j+cn/2-1])
then i:=j-1 else go to PrOc
end; PrOc: k:=i; CR; FrMx; CigM; CigigM; FkMx; Max; p1050
(142,Amx,Mx[rr],Mx[cn/2-1]); Amx:=Amx+cn/2; m:=kk; p1050
(142,3600,ch); p1023(17,Mx[rr],Mx[kk]); rr:=rr+f*cn/2; kk:=
kk+f*cn/2; r:=r+f*cn/2; k:=k+f*cn/2; p1024(18,r,k,rr,kk);
i:=0; p0105(20,2,0,i); if (Cc=0 and f=n) or (Cc $\neq$ 0 and f=Cc)
or i=1 then
begin p1023(13,R[1],R[f]); x[0]:=c; x[1]:=m; p1050(142,
100,x[0],x[1])
end; Mp: if (6 $\times$ 12) $>$ 1800 then begin h:=h2; cn:=cn $\times$ 2;
1:=12 end; if f=0 then begin f:=f+1; go to M3 end
end;
Smr
end;
f:=f+1; i:=0; p0105(20,2,0,i); if i=1 then go to M6; if Cc=0
then begin if f $\neq$ n+1 then go to M3 end else if f $\leq$ Cc then go to M3
M6: begin integer c, m, T; array x[1:600];
procedure Call;
begin T:=Amx; Amx:=600 $\times$ ic; T:=T-Amx-1; go to B1; B00: p0105
(0,0,0,Bk); B01: p0105(57,402,0,0); B02: p0105(50,410,0,x[1]);
B03: p0105(144,0,0,0); B04: p0105(130,0,0,0); B1: p0105(61,
T,B03,k); p0105(13,B02,k,B3); p0105(14,103,B01,B2); p0105
(13,B2,B00,B2); p0105(61,Amx,B04,k); p0105(13,B3,k,B3); p0105
(o,B3,0,B4); B2: p0105(1,0,0,0); B3: p0105(1,0,0,0); p0105
(70,x[1],B4,a); B4: p0105(1,0,0,0); p0105(70,x[1],B5,b);
B5: if a $\neq$ b then go to B3; Bk: p0105(1,0,0,0)
end;
p1050(132,100,x[1],x[2]); c:=x[1]; m:=x[2]; Call; p1050(132,
3000,x[T+2],x[T+m+2-c]); p1041(mig,xmig,Tmig,mx,igmx,Tmx);

```

```

p1041(my,igy,ty,v,migy,tv); p1041(T2,T2,T2);
for i:=2 step 1 until T+m+2-c do
begin if abs(x[i])>1000 then x[i]:=x[i-1]+x[i+1]/2
end; i:=0; p105(20,3,0,1); if I=1 then
begin k:=T+m+2-c;
begin array y[1:k];
for i:=1 step 1 until k do y[i]:=x[i]; p0040(y)
end
end; p1023(20,x[1],x[T+m+2-c]); p1041(igm1,igigm,chigm)
end; if I1=0 then go to Sp; if l=11 then
begin l:=2 l1; if H1=0 then H:=0; go to M1
end; if l=2*l1 then
begin l:=l1; Sp: if Icp=0 then go to Sh; if cp=cp1 then
begin cp:=cp1+1; if H1=0 then H:=0; go to M1
end; if cp=cp1+1 then
begin cp:=cp1; Sh: if Ih=0 then go to St; if h=h1 then
begin h:=2*h1; if H1=0 then H:=0;
begin array y[0:N];
if H=0 then p1050(133,902,y[0],y[N]) else p1050
(133,900,y[0],y[N]); N:=entier(N/2); for k:=1 step 1
until N do y[k]:=y[2*k]; if H=0 then p1050(143,902,
y[0],y[N]) else p1050(143,900,y[0],y[N])
end; go to M
end
end
end
end; St: stop; go to Mm
end

```

Алексеев А.С. Обратные динамические задачи сейсмоки. - Сб. "Некоторые методы и алгоритмы интерпретации геофизических данных". М., "Наука", 1967.

Андреев С.С. Изучение глубинного строения земной коры при помощи обменных волн PS, регистрируемых при землетрясениях. - Изв. АН СССР, серия геофиз., 1957, № 1.

Антонова Л.В., Аптикаев Ф.Ф., Курочкина Р.И., Нерсесов И.Л., Раутиан Т.Г., Халтурин В.И. Основные экспериментальные закономерности динамики сейсмических волн. М., "Наука", 1968.

Аронович З.И., Вилькович Е.В., Долгополов Д.В. Амплитудные характеристики сейсмографа при нестационарных входных сигналах и оценка погрешностей, связанных с применением амплитудных характеристик для стационарных гармонических колебаний. - Сб. "Вычислительная сейсмология", вып. 1. М., "Наука", 1966.

Архангельский В.Т. Методы изменения увеличения электродинамического сейсмографа при сохранении его частотной характеристики. - Труды ИФЗ АН СССР, 1961, № 19 (186).

Архангельский В.Т. О параметрах собственного движения электродинамического сейсмографа с гальванометрической регистрацией. - Труды ИФЗ АН СССР, 1964, № 35 (202).

Архангельский В.Т., Кириос Д.П., Москвина А.Г., Соловьев В.Н., Федосеевко Н.Е., Фрейд В.М., Шебакин Н.В. Аппаратура и методика наблюдений на сейсмических станциях СССР. М., Изд-во АН СССР, 1962.

Архангельский В.Т., Кириос Д.П. Широкополосные сейсмографы общего типа. - Труды ИФЗ АН СССР, 1964, № 35 (202).

Бакушинский А.Б. О некотором численном методе решения интегральных уравнений Фредгольма первого рода. - "Вычислительные методы и программирование". Сборник работ ВЦ МГУ, вып.5, 1966.

Березин И.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. М., Физматгиз, 1959.

Берзон И.С., Епинатьева А.М., Парийская Г.Н., Стародубская С.П. Динамические характеристики сейсмических волн в реальных средах. М., Изд-во АН СССР, 1962.

Будлен К.Е. Введение в теоретическую сейсмологию. М., "Мир", 1966.

Бутовская Е.М. О волнах P+S от местных землетрясений. - Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1952, № 16.

Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М., Физматгиз, 1962.

Вольвовский Б.С., Вольвовский И.С., Егоркин А.В., Рябой В.З. Применение ГСЗ для изучения строения земной коры Средней Азии. Методика, техника и результаты геофизической разведки. М., "Недра", 1967.

Гамбурцева Н.Г., Винник Л.П., Поликарпов А.М. О методике выделения обменных волн PS по записям удаленных землетрясений. - Геология и геофизика, 1970, № 9.

Гарднер М.Ф., Бэрнс Дж. Переходные процессы в линейных системах. М., Физматгиз, 1961.

Гласко В.Б., Зайкин П.Н. О программе регуляризирующего алгоритма для уравнения Фредгольма первого рода. - "Вычислительные методы и программирование." Сборник работ ВЦ МГУ, вып. 5, 1966.

Голенецкий С.И., Одегова М.В., Анисимова Л.В. Оценка погрешностей кривых увеличения сейсмографов на примере Иркутской сейсмической станции. - Геология и геофизика, 1968, № 8.

Голицын Б.Б. Доклад о способах изучения сейсмических явлений. - Изд. Российск. АН, 1902, 5 серия, т. 26, № 1.

Голицын Б.Б. Лекции по сейсмометрии. Изд. Российск. АН, 1912.

Голицын Б.Б. Избранные труды. М., Изд-во АН СССР, 1960.

Гольцман Ф.М., Троян В.Н. Оптимальные алгоритмы разделения интерферирующих сейсмических волн. - Изв. АН СССР, Физика Земли, 1967, № 8.

Грудева Н.П., Малиновская Л.Н., Наймарк Б.М. Приближенное вычисление спектров сейсмических колебаний. - Сб. "Вычислительная сейсмология", вып. 3. М., "Наука", 1967.

Данциг Л.Г., Дергачев А.А. Жадин В.В., Сенюков В.А. О возможности выделения обменных волн на записях удаленных землетрясений. Методика сейсмических исследований. М., "Наука", 1969.

Демидович В.Б. Восстановление функции и ее производных по экспериментальной информации. - "Вычислительные методы и программирование". Сборник работ ВЦ МГУ, вып. 8, 1967.

Демидович Б.П., Марон И.А., Шувалова Э.З. Численные методы анализа. М., Гос. изд-во ФМЛ, 1962.

Дёч Г. Руководство к практическому применению преобразования Лапласа. М., "Наука", 1965.

Долгополов Д.В., Буденный А.П. О решении обратной задачи сейсмометрии. - Изв. АН СССР, Физики Земли, 1966, № 1.

Долгополова Т.Ф., Иванов В.К. О численном дифференцировании. - Ж. вычисл. матем. и матем. физики, 1966, т. 6, № 3.

Дросте З., Гибович С., Гордеюк Ю. Анализ первых смещений сейсмической волны на сейсмограммах. - *Studia geophys. et geod.*, 1959, v. 7, № 2.

Дросте З., Гордеюк Ю. Упрощенный метод определения частотной характеристики U для $\sigma^2 > 0$. - *Studia geophys. et geod.*, 1960, № 3.

Жигальцев А.А. Динамические характеристики обменных волн. - Труды ИФЗ АН СССР, 1962, № 125 (192).

Касахара К. О природе сейсмических источников. - Сб. "Слабые землетрясения". М., ИЛ, 1961.

Кейли-Борок В.И. Сейсмология и логика. - Сб. "Вычислительная сейсмология", вып. 4. М., "Недра", 1968.

Кирнос Д.П. Основы теории и расчета вибрографов. - Труды Сейсмолог. ин-та, 1938, № 81.

Кирнос Д.П. Некоторые вопросы инструментальной сейсмологии. - Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1955, № 27.

Кирнос Д.П., Кондорская Н.В. О вычислении истинного значения первой амплитуды движения почвы при вступлении сейсмической волны. - Изв. АН СССР, серия геофиз., 1958, № 12.

Кирнос Д.П., Харин Д.А., Рулев Б.Г. Сейсмограф ВЭГИК для работы по инженерной сейсмологии и регистрации близких землетрясений. - Труды ИФЗ АН СССР, 1961, № 16 (183).

Кирнос Д.П., Харин Д.А., Шебалин Н.В. История развития инструментальных сейсмических наблюдений в СССР. - Сб. "Землетрясения в СССР". М., Изд-во АН СССР, 1961.

Колесников Ю.А., Соловьев В.Н. Установка для цифрования сейсмограмм. - Труды ИФЗ АН СССР, 1964, № 35 (202).

Крылов С.В., Мишенькин В.П., Крупская Г.В., Петрик Г.В., Якушевич Т.А. Строение земной коры по профилю ГСЗ через Байкальскую рифтовую зону. - Геология и геофизика, 1970, № 1.

Кухтикова Т.И., Французова В.И. О соответствии между преобладающими периодами и спектрами поверхностных волн. - Труды Ин-та сейсмостойкого стрит. и сейсмологии АН ТаджССР, 1964, т. 12.

Левин Г.Е., Серяпин Н.М. Коррекция записей сейсмических приборов с помощью аналоговой вычислительной машины. - Изв. АН СССР, Физика Земли, 1968, № 3.

Магницкий В.А. Внутреннее строение и физика Земли. М., "Недр", 1965.

Малиновская Л.Н., Чечель Н.И. Об искажении нестационарных колебаний при гальванометрической регистрации. - Труды ИФЗ АН СССР, 1962, № 20.

Нерсесов И.Л. О коэффициенте связи системы сейсмограф - гальванометр. - Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1956, № 36.

Оперативный сейсмологический бюллетень, № 9. Изд. ИФЗ АН СССР, 1965.

Перепелица В.А. К расчету постоянных электродинамического сейсмографа при полной идентификации. - Геология и геофизика, 1965, № 8.

Перепелица В.А. Об определении истинного движения почвы методом почленного интегрирования. - Геология и геофизика, 1967, № 5.

Перепелица В.А. Определение истинного вида смещения почвы методом почленного интегрирования. - Изв. АН СССР, Физика Земли, 1972, № 2.

Петрашень Г.И. Элементы динамической теории распространения сейсмических волн. - Сб. "Вопросы динамической теории распространения сейсмических волн", вып. 3. Изд-во ЛГУ, 1959.

Померанцев И.И. Исследование страсбургской сейсмограммы 24.06.1901. - Изв. Пост. центр. сейсмич. комиссии. СПб., 1902.

Померанцев И.И. Некоторые опыты с искусственной сейсмической платформой. - Изв. Пост. центр. сейсмич. комиссии. СПб., 1905.

Померанцева И.В., Мозженко А.Н. и др. Применение сейсмологических станций "Земля" при изучении строения юго-востока Русской платформы. - Докл. АН СССР, 1965, т. 163, № 1.

Рихтер Ч.Ф. Элементарная сейсмология. М., ИЛ, 1963.

Саваренский Е.Ф., Кирнос Д.П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. Изд. 1-е. М.-Л., ГИТТЛ, 1949.

Саваренский Е.Ф., Кирнос Д.П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. Изд. 2-е. М., ГИТТЛ, 1955.

Саваренский Е.Ф., Федоров С.А., Гогичайшвили Б.В. Определение истинного движения почвы и его спектра по сейсмограмме. - Изв. АН СССР, серия геофиз., 1963, № 9.

Смирнов И.В. Курс высшей математики, т. 4. М., Гос. изд-во ФМЛ, 1958.

Тихонов А.Н. О решении некорректно поставленных задач и методе регуляции. - Докл. АН СССР, 1963а, т. 151, № 3.

Тихонов А.Н. О регуляризации некорректно поставленных задач. - Докл. АН СССР, 1963б, т. 153, № 1.

- Тихонов А.Н. О некорректно поставленных задачах. - "Вычислительные методы и программирование". Сборник работ ВЦ МГУ, вып. 8, 1967.
- Харин Д.А. Определение первой амплитуды истинного движения почвы. - Труды Сейсмолог. ин-та АН СССР, 1938, № 79.
- Харкевич А.А. Спектры и анализ. М., Физматгиз, 1962.
- Шебалин Н.В. Опыт инструментальных наблюдений на центральной сейсмической станции "Москва". - Труды Геофиз. ин-та АН СССР, 1955, №30.
- Шебалин Н.В. К расчету вариаций параметров электродинамического сейсмографа. - Труды ИФЗ АН СССР, 1961, № 19.
- Шербакова Б.Е., Волхонин В.С., Крупская Г.В., Линькова Т.М., Луценко Т.Н., Мелехин В.И., Семенова Г.И. Результаты изучения глубинного строения Юго-Восточного Прибайкалья с помощью станций "Земля". - Советская геология, 1969а, № 6.
- Шербакова Б.Е., Бережнова О.Ф., Волхонин В.С., Гришанова Л.П., Линькова Т.М., Лобачевский И.В., Мелехин В.И., Штугин И.М., Крупская Г.В. Результаты изучения строения земной коры и верхней мантии на северо-востоке Иркутского амфитеатра с помощью станций "Земля". - Сб. "Прикладная геофизика", вып. 57, М., "Недра", 1966.
- Berckheimer H., Schneider G. Near earthquakes recorded with longperiod seismographs. - Bull. Seismol. Soc. America, 1964, v. 54, N 3.
- Dyk K. On the reduction of seismograms obtained in shaking table tests. - Bull. Seismol. Soc. America, 1935, v. 25.
- Gutenberg B. - Bull. Seismol. Soc. America, 1944, v. 34, N 2, 85.
- Sharpe J. A. Motion of the surface of earth in the compressional phase of a deep-focus earthquake, and the effects of a layered crust. - Bull. Seismol. Soc. America, 1935, v. 25.
- Toby a š V. The influence of the galvanometer reaction on the equivalent constants of electromagnetic seismographs. - Studia geophys. et geod., 1963a, v.7, N 1.
- Toby a š V. Calculation of constants of broad-band electromagnetic displacement seismograph in case of non-negligible reaction of galvanometer. - Studia geophys. et geod., 1963b, v. 7, N 4.
- Toby a š V. Calculation of constants of broad-band electromagnetic accelerographs in case of non-negligible reaction of galvanometer. - Studia geophys. et geod., 1964, v. 8, N 2.
- Toby a š V. Calculation of constants of electromagnetic seismographs for recording velocity in case of non-negligible galvanometer reaction. - Studia geophys. et geod., 1966, v. 10, N 10.
- Toby a š V. The partial identity of the amplitude characteristics of broad-band electromagnetic seismographs. - Studia geophys. et geod., 1967a, N 11.
- Toby a š V. Broad-band electromagnetic seismographs with maximum sensitivity. - Studia geophys. et geod., 1967b, N 11.
- Tsuboi C. On the possibility of finding the permanent crust dislocation caused by an earthquake by means of its seismograms. - Proc. Imp. Acad. Tokyo, 1931, N 7.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. Существующие методы определения истинного вида движения "почвы" по сейсмограмме	5
Формулировка задачи	5
Непосредственная запись сейсмографом различных кинематических элементов движения "почвы"	6
Определение истинного смещения по спектру записи	9
Моделирование	10
Способ почленного интегрирования	12
Решение уравнений движения сейсмографа операторным методом	16
Глава 2. Решение обратной задачи сейсмометрии методом преобразования Лапласа	18
Метод, условия применимости	18
Решение и результат	19
Коэффициенты слагаемых в функции $I(t)$ для различных типов сейсмографов	21
Некоторые выводы	22
Глава 3. Описание алгоритма и результатов расчетов истинного смещения	23
Принципиальная вычислительная схема	23
О корректности численного метода	24
Краткое описание программы	26
Результаты расчета истинного смещения по сейсмограммам	27
Некоторые сейсмологические приложения результатов расчета истинного смещения: выделение проходящих обменных волн PS при удаленных землетрясениях	42
Выводы	58
Заключение	59
Приложение 1. Список основных обозначений, встречающихся в тексте	60
Приложение 2. Программа на языке АЛГОЛ-60	61
Литература	72

45 коп.

86233

Д4

40059