

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

А В Т О М Е Т Р И Я

2006, том 42, № 5

УДК 551.24 : 504.55.06

**ОБРАБОТКА ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ
С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНЫХ ЭФФЕКТОВ ИЗЛУЧЕНИЯ
И РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН**

Б. М. Глинский, М. С. Хайретдинов, Г. Ф. Седухина

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск
E-mail: marat@opg.sscs.ru*

Рассматривается роль нелинейных эффектов излучения и распространения упругих колебаний в повышении качества обработки данных экспериментов. Проводится анализ сейсмических волн без потери общности результатов по отношению к волнам иной природы. Используются данные сейсмофизических экспериментов, связанных с глубинным зондированием Земли упругими колебаниями, порождаемыми мощными поверхностными вибраторами, разработанными научными организациями Сибирского отделения РАН. Эффективность предлагаемого подхода к обработке данных обосновывается повышенной точностью измерения параметров сейсмических волн и впервые полученными результатами, относящимися к выделению суточных и полусуточных периодичностей лунно-солнечных приливов в параметрах сейсмического поля.

Введение. Результативность научных исследований в области геофизической информатики может быть значительно повышена благодаря учету нелинейных волновых явлений, развивающихся на этапах излучения и распространения волн в различных средах: земле, атмосфере, воде. Изучение природы этих явлений и получение численных оценок результатов их проявлений представляют не только чисто научный интерес, но и имеют практическое приложение к решению задач активного сейсмического мониторинга сред с целью слежения за развивающимися геодинамическими процессами, предшествующими природным и техногенным катастрофам. При этом под активным мониторингом подразумевается регулярный во времени процесс просвечивания среды волновыми полями, порождаемыми в земле мощными сейсмическими вибраторами, с одновременным измерением информативных параметров откликов и слежением за их временной динамикой. Благодаря высоким метрологическим показателям виброрейсмических источников, поддерживаемых по отношению к амплитуде возмущающей силы (около $\pm 5\%$), частоте (на уровне 10^{-5}) и фазе излучаемых колебаний (отклонения по фазе в пределах $1,0-1,5^\circ$), обеспечивается возможность применения помехоустойчивых методов измерения параметров откликов среды, которые позво-

ляют отслеживать тонкую пространственно-временную динамику ее геофизических характеристик, обусловленных геодинамическими процессами.

Целью данной работы является повышение эффективности метода вибросейсмического мониторинга среды с учетом нелинейных волновых эффектов, возникающих на этапах излучения и распространения сейсмических волн.

Нелинейные эффекты излучения и распространения сейсмических колебаний. Нелинейные физические эффекты излучения сейсмических колебаний, развивающиеся в зоне вибратора, приводят к появлению низших и высших гармоник в излучаемом сейсмическом поле. Такие эффекты обуславливаются процессами взаимодействия источника с подстилающим грунтом и характеристиками жесткости последнего, особенностями конструкции конкретного типа источника и т. д. [1]. Проявление нелинейного эффекта в процессе взаимодействия источника со средой может быть обосновано с помощью уравнения

$$m\ddot{u} + R_{\text{н}}\dot{u} + k(u)u = F \sin \omega t + P_0, \quad (1)$$

описывающего колебания сейсмического вибратора в монохроматическом режиме излучения. Здесь m – масса вибратора; F – возбуждающая сила воздействия вибратора на грунт; $P_0 = mg$ – вес вибратора; $k(u)$ – жесткость среды; $R_{\text{н}}$ – активное сопротивление излучения; u – смещение платформы вибратора. В случае когда $F > P$, происходит отрыв излучающей платформы вибратора от грунта. В момент отрыва смещение вибратора $u = 0$. При $u < 0$ источник совершает свободный полет. Условие неразрывности источника и среды определяется условием $u \geq 0$. Отрыв вибратора от среды обычно возникает в области резонанса системы «вибратор – грунт» и является причиной возникновения гармоник в излучаемых сейсмических колебаниях. Причина нелинейности проявляется и в случае, когда условие неразрывности источника и среды соблюдено, но жесткость подстилающей среды является нелинейной функцией смещения. Экспериментально эффекты нелинейности излучения по отношению к основным типам мощных вибраторов оценивались с помощью спектрально-временных функций свип-сигналов $F(f, t)$, которые регистрировались в земле вблизи источника. Так, центробежным вибратором ЦВ-100 [2] такого типа сигнал формировался в полосе частот 6,25–9,50 Гц с длительностью развертки во времени 600 с. Спектрально-временная функция сигнала представлена на рис. 1, а. Ее расчет осуществляется в скользящем по времени окне длительностью 10 с. Подобная функция для другого типа источника – гидрорезонансного вибратора ГРВ-50 [2] – представлена на рис. 1, б. Здесь функция получена для свип-сигнала с полосой частот 5–7 Гц и длительностью 1400 с. В обоих случаях, хотя и в разной мере, хорошо видны кратные вторые и даже третьи гармоники в спектре излучаемых колебаний.

Распространение сейсмических колебаний в среде на расстояниях, намного больших, чем их длина волны, также сопровождается нелинейными процессами, приводящими к появлению высших гармонических составляющих в спектре сигнала. Рассматриваемые процессы при определенных условиях могут существенно проявляться даже при распространении в Земле волн малых деформаций, для которых традиционно используется принцип линейного приближения. Обоснование этого явления может быть выполне-

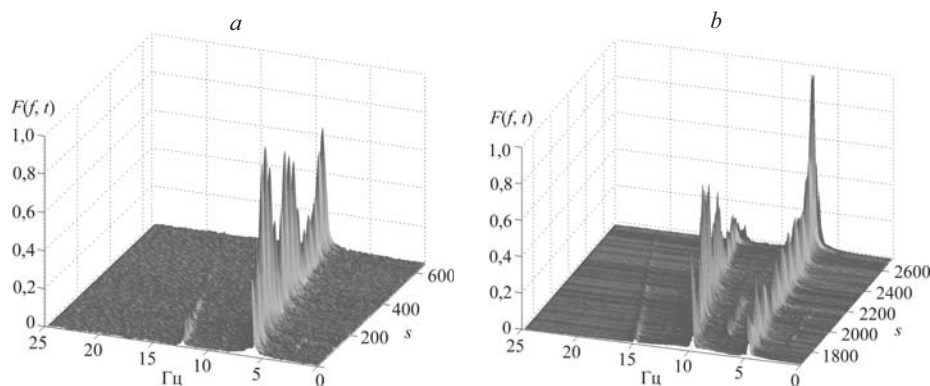


Рис. 1

но с учетом [3] на примере распространения в среде простейшей одномерной волны $u(x, t)$. Процесс распространения описывается уравнением

$$\frac{\delta u}{\delta t} + Lu = -\varepsilon u \frac{\delta u}{\delta x}, \quad (2)$$

где ε – параметр нелинейности; L – линейный оператор, соответствующий определенной дисперсии линейных волн. Параметр нелинейности оценивается как $\varepsilon = v/c$ (v – амплитуда скорости колебаний частиц среды, а c – фазовая скорость волны). В общем случае условие малости параметра ε , т. е. $\varepsilon \ll 1$, для обеспечения линейного приближения является необходимым, но не достаточным. На количественные характеристики эффекта нелинейности в среде оказывают влияние процессы диссипации энергии и дисперсии волн. Пусть среда с дисперсией волн определяется дисперсионным соотношением $\omega_k = \omega(k)$, характеризующим зависимость частоты колебания от волнового числа k . Известно, что Земля как среда распространения волн характеризуется крайними случаями проявления дисперсии: слабой выраженностью ее внутри продольных и поперечных волн и вырожденным случаем, приводящим к резким различиям скоростей обоих типов волн между собой. Причем, как известно, эта разница увеличивается с расстоянием. С учетом этого остановимся на анализе решения уравнения (2) в виде разложения по малому параметру ε : $u = \varepsilon u_1 + \varepsilon^2 u_2 + \varepsilon^3 u_3 + \dots$. Для членов с ε^2 уравнение (2) относительно второй гармоники u_2 примет вид

$$\frac{\delta u_2}{\delta t} + Lu_2 = -u_1 \frac{\delta u_1}{\delta x} \quad (3)$$

при начальном условии $u_2(x, 0) = 0$. Его решением будет [3]

$$u_2 = -2ika_1^2 \frac{\sin(\Delta\omega t/2)}{\Delta\omega} \exp\left[i\left(2kx - \frac{\omega_{2k} + 2\omega_k}{2} t\right)\right] + \text{к.с.}, \quad (4)$$

где a_1 – амплитуда смещения частиц среды, вызываемая первичной волной; к.с. – слагаемое, комплексно-сопряженное с первым членом. Как следует из

уравнения (4), с уменьшением расстройки $\Delta\omega = 2\omega_k - \omega_{2k}$ уровень второй гармоники возрастает, приближаясь при $\Delta\omega \rightarrow 0$ (случай бездисперсионных волн, т. е. $\omega_{2k} = 2\omega_k$) к максимальному значению. При этом выражение (4) примет вид

$$u_2(x, t) = -ika_1^2 t \exp[i(2kx - \omega_{2k} t)] + \text{к.с.} \quad (5)$$

Из (5) видно, что уровень второй гармоники растет пропорционально времени пробега волны, так что линейное приближение при сколь угодно малом ε становится неверным.

Накопление нелинейного эффекта в пространстве определяется зависимостью амплитуды второй гармоники от расстояния, описываемой соотношением [4]:

$$a_2 = \frac{K_c r \omega^2 a_1^2}{8c_p^2}. \quad (6)$$

Здесь r – длина пробега волны; K_c – коэффициент нелинейности среды, определяемый выражением $K_c \approx \rho v (\Delta v / \Delta p) \approx (\Delta v / v) \Delta \theta$ (ρ – плотность, $\Delta \theta$ – изменение объемной деформации, Δp – изменение давления); a_1 – амплитуда первой гармоники; c_p – скорость продольной волны. Значение коэффициента $K_c \approx 10^3$ [5, см. библиографию].

Итак, с учетом данных рис. 1 и уравнений (4), (6) при вибрационном просвечивании среды могут наблюдаться разные по характеру нелинейные волновые процессы, конечным проявлением которых будет возникновение высших гармоник в спектре регистрируемых сейсмических колебаний. Их энергетический вклад в суммарное волновое поле может дать эффект в двух направлениях: во-первых, повышение качества выделения основных типов волн, и прежде всего продольных (первичных) волн P на вибрационных сейсмограммах; во-вторых, образование дополнительного информативного показателя, отражающего геодинамические процессы в среде, прежде всего в сейсмовулканоопасных районах.

Для оценивания практической значимости первого эффекта на вибрационных сейсмограммах были получены оценки амплитуд сейсмических волн основных и вторых гармоник. Последние вычислялись как оценки максимумов значений взаимокорреляционной свертки вида

$$R(m) = \sum_{i=0}^N u(t_i) v(t_{i-m}), \quad m=1, \dots, M, \quad (7)$$

зарегистрированных сейсмических сигналов $u(t_i)$ с двумя опорными свип-сигналами $v_1(t_i)$, $v_2(t_i)$, где $v_1(t_i) = A \cos(\omega_0 t_i + \beta t_i^2 / 2)$, $v_2(t_i) = A \cos(2\omega_0 t_i + \beta t_i^2 / 2)$, β – скорость развертки по частоте. В данном случае сигнал $v_1(t_i)$ занимал диапазон зондирования на основных частотах (5,5–8,5 Гц), $v_2(t_i)$ – на вторых гармониках (11–17 Гц). Таким образом, были получены вибрационные сейсмограммы (рис. 2), соответствующие расстояниям источник–приемник 20 и 50 км. Параметры сейсмограмм приведены на рисунке. Дополнительно здесь указываются амплитуды преобладающих волн в дискретных единицах АЦП. Из рисунка очевидно, что первичные волны вторых гармо-

ник с временами прихода 4,9 с на 20 км и 7,5 с на 50 км отличаются более высокой контрастностью вступления в сравнении с волнами основных частот, что способствует повышению точности оценивания их времен прихода. С точки зрения сейсмофизики более высокая контрастность вступления волн P обусловлена их насыщенностью высокими частотами, содержащимися в области вторых гармоник.

Накопление нелинейного эффекта, определяемого (4), (6), в средах с диссипацией энергии и рассеянием на неоднородностях было обнаружено в ряде экспериментов по вибрационному зондированию Земли на дальностях источник–приемник в сотни километров [5]. В качестве иллюстрации на рис. 3 представлены спектрограммы $F_1(f)$ и $F_2(f)$, отражающие выделение на фоне многократно превышающих помех монохроматического сигнала, соответствующего основной частоте зондирования $f_0 = 6,3$ Гц (рис. 3, *a*) и его второй гармонике (12,6 Гц) (рис. 3, *b*) на дальности источник–приемник 355 км. Спектрограммы нормированы по отношению к максимальному уровню: для частоты 6,3 Гц он составляет 301,4, для 12 Гц – 243,4. Таким образом, уровень второй гармоники относительно основной составляет 0,48. В то же время, как показано на рис. 4, *a*, такое соотношение в зоне излучения составляет в среднем 0,25. При этом следует заметить, что уменьшение первоначальной

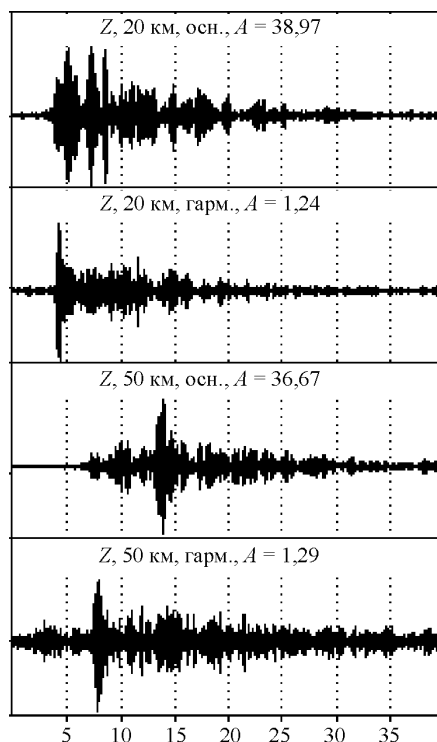


Рис. 2

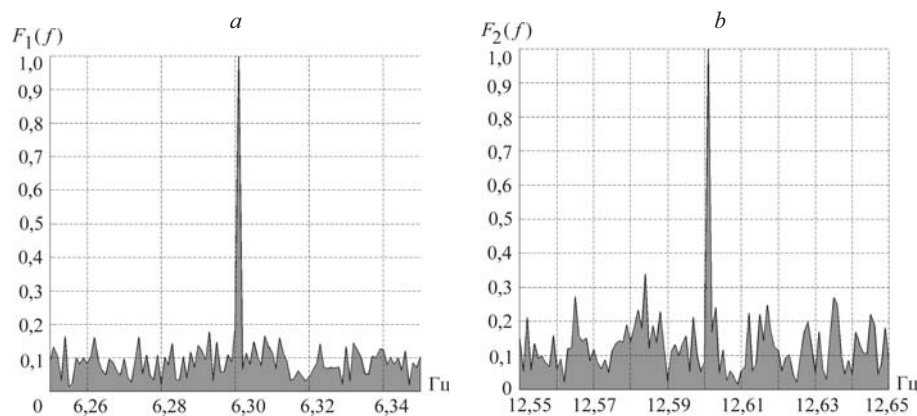


Рис. 3

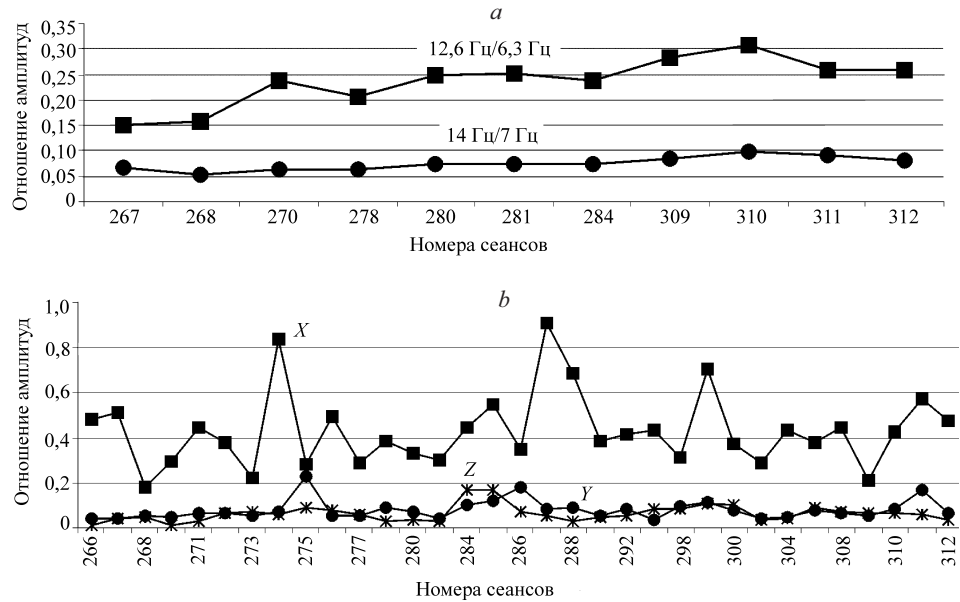


Рис. 4

чального соотношения второй и основной гармоник a_{02}/a_{01} , наблюдаемое в зоне источника, в зависимости от расстояния r уменьшается по закону

$$\frac{a_{f_2}(r)}{a_{f_1}(r)} = \frac{a_{02}}{a_{01}} \exp[-(\alpha_2 - \alpha_1)(r - r_0)], \quad (8)$$

где a_{01}, a_{02} – амплитуды обоих колебаний вблизи источника на границе сферы радиуса r_0 ; a_{f_1}, a_{f_2} – амплитуды основной и второй гармоник на удалении r от границы сферы радиуса r_0 ; $\alpha_{1,2} \approx 2,5 \cdot 10^{-4} f_{1,2}$ (1/км) – коэффициенты поглощения среды по отношению к колебаниям частот f_1, f_2 .

Так, например, на расстоянии 355 км рассматриваемое соотношение для частоты зондирования $f_1 = 6,3$ Гц и второй гармоники $f_2 = 12,6$ Гц составит $a_{12,6}(355)/a_{6,3}(355) \approx 0,57 a_{02}/a_{01}$. Это означает, что доля вторых гармоник уменьшится в 1,75 раза и соответственно вклад эффекта нелинейности излучения в волновое поле в дальней зоне составит около 0,14, что значительно меньше вклада, вносимого средой распространения волн. Таким образом, представляется естественным учесть вклад высших гармоник в информативный показатель, характеризующий динамику развития геофизических процессов в среде, в первую очередь в зонах назревания природных катастроф (в сейсмовулканоопасных зонах и др.). Естественным тестом, связанным с изучением деформационных процессов в земной коре и верхней мантии, являются лунно-солнечные приливы. Как известно, последние характеризуются суточными и полусуточными периодичностями. В связи с этим были построены временные ряды наблюдений параметров сейсмического волнового поля, полученные в результате регулярного вибрационного зондирования среды на трассе «вибратор ЦВ-100–приемник» протяженностью 355 км. Зондирование осуществлялось с помощью периодически повторяющихся (с пе-

риодом 3 ч) сеансов излучения монохроматических колебаний. Каждый сеанс состоял из последовательно излучаемых 20-минутных колебаний на частотах 6,3 и 7,0 Гц. Такие сеансы непрерывно повторялись в течение 96 часов, что достаточно для выделения периодичностей в рассматриваемых рядах. По результатам первичной обработки записей сейсмических сигналов, состоявшей в применении квадратурного алгоритма измерений амплитуд и начальных фаз установившихся колебаний [6], были построены временные ряды в виде оценок этих параметров, полученных на частотах основных и вторых гармоник колебаний. Дополнительно были построены ряды в виде отношений вторичных и первичных оценок для данных одновременной регистрации по компонентам X, Y, Z сейсмических полей в пунктах излучения и приема. Факт одновременной регистрации по трем компонентам сейсмического поля говорит о том, что соответствующие сейсмические датчики являются векторными, причем компоненты X, Y горизонтальные и взаимно ортогональные (X ориентирована в направлении на вибратор (источник)), Z – вертикальная компонента. Ряды значений полученных отношений для источника и приемника представлены графиками на рис. 4, a, b . Соответствие их основным частотам, гармоникам и компонентам отмечено специальными линиями. По оси абсцисс отложены номера сеансов, по оси ординат – значения отношений амплитуд вторых и основных гармоник. Как следует из графиков, относящихся к источнику (см. рис. 4, a), наибольшие значения отношений проявляются на частоте зондирования 6,3 Гц. Здесь они колеблются в пределах 15–30%. На частоте зондирования 7,0 Гц эти значения лежат в пределах 5–10%. Полученные оценки характеризуют коэффициент нелинейности формы излучаемых колебаний.

На рис. 4, b приведены аналогичные соотношения, полученные в точке приема на удалении 355 км от источника и соответствующие компонентам X, Y, Z и частоте зондирования 6,3 Гц. Из анализа графиков следует, что наибольшие значения отношений амплитуд проявляются по компоненте X , минимальные – по компонентам Y, Z .

Выделение скрытых периодичностей в рядах, отнесенных к пункту приема, производилось с использованием дискретного преобразования Фурье и весовой функции, сглаживающей края рядов наблюдений с ограниченной выборкой. Результаты такого выделения, отнесенные к рядам наблюдений на частотах зондирования 6,3 и 7,0 Гц, представлены на рис. 5, a, b соответственно. Оба графика принадлежат рядам наблюдений, соответствующим компоненте Z . Как следует из приведенных графиков, суточная периодичность уверенно выделяется в пределах временного ряда $\gamma_1 = a_{12,6}(355)/a_{6,3}(355)$, а полусуточная – в пределах $\gamma_2 = a_{14,0}(355)/a_{7,0}(355)$. Отсюда можно сделать вывод о целесообразности оптимизации выбора частоты зондирования для выделения преобладающей периодичности в земных приливах.

Достоинством приведенной схемы выделения периодичностей в многодневных рядах наблюдений является ее инвариантность по отношению к флуктуациям вибровозбуждающей силы $F(1)$ на источнике. В подтверждение этого вывода на рис. 6 представлены абсолютные значения силы F , которые развивались вибратором ЦВ-100 в описанных многосуточных сеансах зондирования. Как видно, наблюдаются 5-кратные флуктуации силы, обусловленные в данном случае аппаратной нестабильностью работы источника. В то же время соотношение амплитуд упругих колебаний вторичных и основных частот, порождаемых в зоне источника, отличается намного большей устойчивостью (см. рис. 4, a).

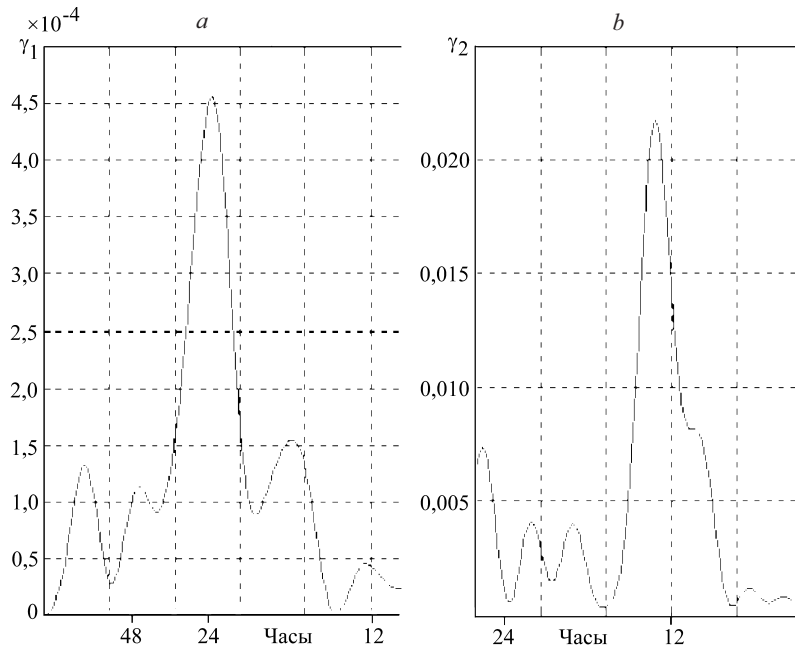


Рис. 5

В связи с этим необходимо отметить, что в проблеме активного сейсмического мониторинга, когда анализируется временная динамика параметров геофизических процессов в области зарождающегося очага природной катастрофы, принципиально важно выбрать параметры волнового поля, устойчивые к неизбежным сезонным и аппаратным флуктуациям силовых характеристик поля излучения при сохранении высокой чувствительности этих параметров к малым вариациям напряжений в земной коре. Это обстоятельство определяет перспективность учета характеристик нелинейности волнового поля в проблеме активного вибросейсмического мониторинга.

Проверка чувствительности предложенного метода мониторинга в описанном выше эксперименте, основанная на учете нелинейных параметров волнового поля, показала возможность обнаружения относительных приливных деформаций на уровне 10^{-5} – 10^{-6} , что на 2 порядка лучше достигнутого ранее [5, см. библиографию].

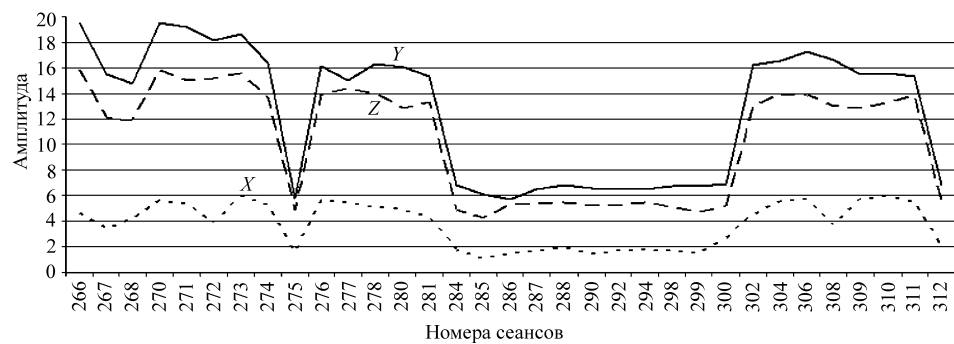


Рис. 6

Заключение. Предложен и проанализирован подход к повышению информативности экспериментальных исследований, связанных с распространением упругих волн, на основе изучения и учета нелинейных волновых явлений. На базе изучения сейсмических волновых явлений, лежащих в основе активного мониторинга сейсмовулканоопасных зон с помощью мощных вибраторов, предложена новая методика анализа данных, учитывающая соотношения уровней вторичных и основных гармоник сейсмического волнового поля, регистрируемого на выходе среды в области зарождающегося и развивающегося очага природных катастроф. Доказано, что при таком способе анализа, с одной стороны, результаты мониторинга оказываются устойчивыми к неизбежным сезонным и аппаратным флуктуациям силовых характеристик поля излучения на входе среды; с другой стороны, те же результаты обладают высокой чувствительностью к малым вариациям параметров геодинамических процессов в очаговых зонах (т. е. на выходе среды). Соответствующие им уровни относительных приливных деформаций составили 10^{-5} – 10^{-6} , что на два порядка лучше достигнутых ранее (см. библиографию в [5]). Параметры нелинейности сейсмических волновых полей могут оказаться перспективными при решении проблемы выбора интегральных предвестников надвигающейся сейсмической опасности [7]. Предложенная методика анализа данных может быть использована по отношению к полям иной природы, например к акустическим, при изучении нелинейных волновых процессов в верхней и нижней атмосфере с помощью мощных вибрационных источников [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Glinsky V. M., Khairtdinov M. S., Kovalevsky V. V.** Nonlinear wave effects in the powerfull seismic vibrators zones // 16th Intern. Symp. on Nonlinear Acoustics. M.: Moscow State University, 2002. Vol. 1. P. 327.
2. **Алексеев А. С., Глинский Б. М., Ковалевский В. В. и др.** Активная сейсмология с мощными вибраторами. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2004.
3. **Бреховских Л. М., Гончаров В. В.** Введение в механику сплошных сред. М.: Наука, 1982.
4. **Зарембо Л. К., Красильников В. А.** Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966.
5. **Glinsky V. M., Khairtdinov M. S., Kovalevsky V. V.** Relationship of wave fields of powerful vibrators with atmospheric and geodynamic processes // *Geology and Geophysics*. 1999. **40**, N 3. P. 431.
6. **Хайретдинов М. С.** Методы распределенной обработки вибросейсмических сигналов // *Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Информационные системы и технологии»*. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. Том 3. С. 607.
7. **Алексеев А. С., Белоносов А. С., Петренко В. Е.** Определение интегрального предвестника землетрясений с использованием многодисциплинарной модели и активного вибросейсмического мониторинга // *Тр. ИВМиМГ СО РАН. Сер. Математическое моделирование в геофизике*. Новосибирск: Изд. ИВМиМГ СО РАН, 1998. Вып. 7. С. 3.

Поступила в редакцию 6 октября 2005 г.