

УДК 533.95+550.388+550.834

## АКУСТИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ ПРИ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ

© 2000 г. В. В. Кузнецов, В. В. Плоткин, С. Ю. Хомутов

Представлено академиком А.С. Алексеевым 27.02.98 г.

Поступило 04.08.98 г.

1. Механизмы акустического и электромагнитного взаимодействия литосферы, атмосферы и ионосферы при землетрясениях, мощных взрывах, извержениях вулканов, цунами, торнадо и прочих аномальных явлениях достаточно далеки до полного понимания [1–3]. Положение осложняется тем, что регистрируемые изменения акустического, электрического, магнитного полей и ионосферные возмущения в этих случаях часто трудно выделить на фоне помех и идентифицировать как отклик или предвестник исследуемых событий в силу их случайного характера и эпизодичности. В связи с этим определенным интересом представляет исследование механизмов возбуждения указанных геофизических возмущений в управляемом эксперименте, в частности, при вибросейсмическом зондировании. В работе [4] описан эффект возбуждения упругих поверхностных волн акустическим излучением инфразвуковых частот в атмосфере от вибрационного сейсмического источника. Такой эффект, названный авторами [4] акустосейсмической индукцией, связывается с появлением цуга колебаний поверхностных волн со временем прихода 57–60 с на расстоянии 20 км от сейсмодатчика. Детальное исследование этого эффекта, а также других геофизических эффектов, сопровождающих работу мощных сейсмодатчиков, требует одновременной регистрации изучаемых параметров. В настоящей работе описываются результаты экспериментальных исследований взаимосвязей явлений в акустических, магнитных, электрических и сейсмических процессах, а также результаты доплеровских наблюдений ионосферы при вибросейсмическом зондировании.

2. Измерительная аппаратура, источники вибросигналов. Используемый полевой измерительный комплекс включает 5 датчиков (сейсмический, два акустических, электрический и магнитный). Низкочастотный сейсмоприемник для измерений вертикальной компоненты имеет плоскую АЧХ во всем исследуемом частот-

ном диапазоне и его чувствительность позволяет достаточно уверенно регистрировать сейсмический сигнал на удалении до 50 км от источника. Измерения вертикальной составляющей атмосферного электрического поля выполнялись с помощью датчика струнного типа с малым порогом чувствительности порядка 1 В/м, что ограничило его применение лишь небольшими расстояниями от сейсмодатчика. Для магнитных наблюдений использовался датчик индукционного типа, имеющий чувствительность не хуже 0.001 нТл, позволяющий выделять магнитный сигнал на удалении до 50 км от сейсмодатчика. Измерения акустических колебаний инфразвукового диапазона выполнялись с помощью двух датчиков: гидрофона и датчика с тензочувствительным элементом. Полоса частот, обеспечиваемая усилительными трактами датчиков и АЦП, составляла 0–9 Гц.

На удалении 49 км от сейсмодатчика в обсерватории ИГФ СО РАН “Ключи” установлен цифровой ионозонд “Парус”, позволяющий проводить доплеровские измерения в диапазоне частот 1–20 МГц и высот отражения до 450 км. Длительность непрерывного единичного сеанса доплеровского зондирования составляет до 320 с.

Сейсмодатчики, установленные на Быстровском вибросейсмическом полигоне СО РАН, представляют собой стационарные виброисточники дебалансного типа с амплитудой силы до 100 т (ЦВ-100) и до 40 т (ЦВ-40), а также гидрорезонансный вибратор ГРВ-50 с амплитудой силы 50 т. Все три вибратора работали как в режиме монохроматического излучения с переключением частоты непосредственно в течение сеанса, так и в свип-режиме в диапазоне частот 5–10 Гц.

В большинстве случаев сигналы, возбуждаемые при работе вибратора и регистрируемые датчиками, являются многомодовыми (имеются в виду моды с различными путями и временами распространения, способом возбуждения). По этой причине свип-режим работы сейсмодатчика является чрезвычайно эффективным средством, позволяющим разделить моды по времени их прихода к датчику. Синхронизация таймера в пунктах регистрации осуществлялась по сигналам точного времени с точностью  $\pm 1$  с.

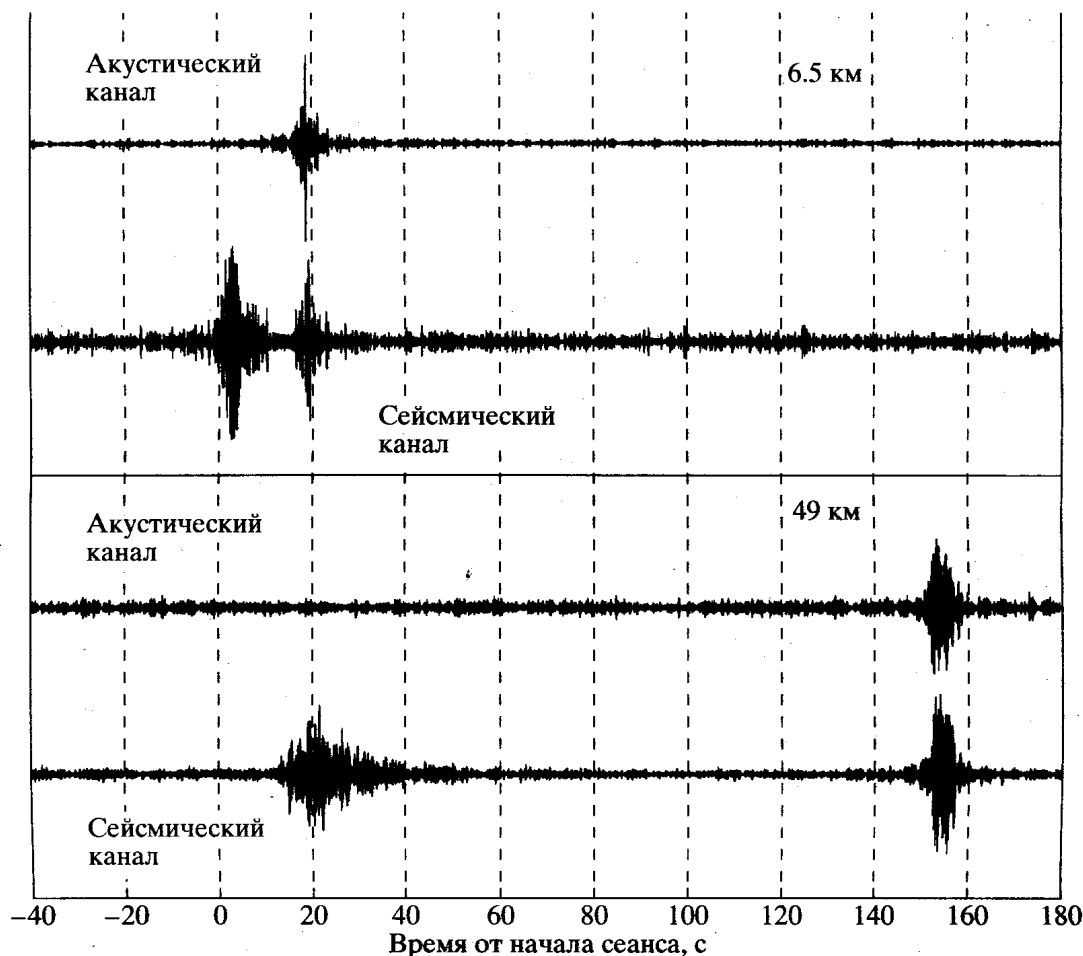


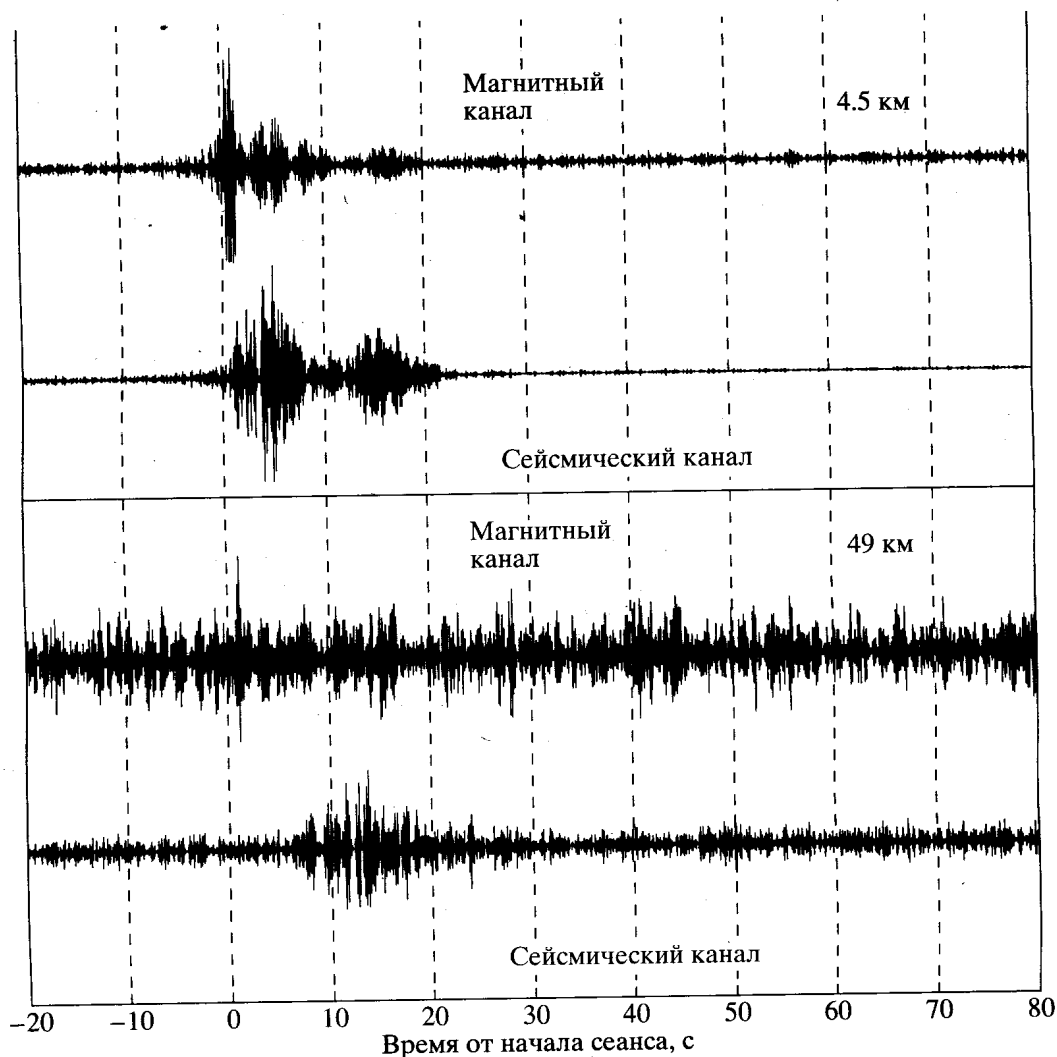
Рис. 1. Корреляционные функции между опорным свип-сигналом и акустическими и сейсмическими сигналами. Сейсмовибратор ЦВ-100, свип-режим (пробег частоты 6.25–9.57 Гц, длительность сеанса 47 мин).

В июле–ноябре 1997 г. были выполнены комплексные измерения на малых расстояниях непосредственно в районе полигона, в пунктах Быстровка и Озерки, удаленных на 4–7 км, а также на большом удалении (49 км; обсерватория “Ключи”) от вибраторов (всего более 60 сеансов, в том числе около 50 для ЦВ-100, около 10 для ЦВ-40 и 6 сеансов для ГРВ-50). Доплеровское зондирование ионосферы проводилось при 12 сеансах работы ЦВ-100 в монорежиме и 16 сеансах в свип-режиме. Сейсмические задачи, на решение которых направлено использование вибраторов, обуславливают выбор ночного времени как преимущественного в силу существенно более низкого уровня шумов. Для ионосферных исследований дневное время является более предпочтительным, поскольку в ночное время, как правило, отсутствует E-слой ионосферы (высоты около 100 км).

3. Результаты. Акустический и сейсмический сигналы. Получен ряд синхронных записей акустического и сейсмического датчиков при свип-режиме работы сейсмовибратора. На рис. 1 представлены примеры корреляционных функций между опорным свип-сигналом

и сигналами, зарегистрированными на расстояниях 6.5 км и 49 км. Первая мода сейсмического сигнала представляет собой группу продольных и поперечных волн с кажущимися скоростями несколько км/с и детально исследованных в [5]. Особый интерес вызывает наличие в сейсмическом и акустическом сигналах мод с приблизительно равными временами прихода. Задержки по времени прихода сейсмических мод согласуются с приведенными в [4] для расстояния 20 км. Можно отметить увеличение амплитуды второй сейсмической моды от дневного сеанса к ночному (ночью ее амплитуда превосходила амплитуду первой моды). Акустическая мода на расстоянии 49 км наблюдается не всегда, что, вероятно, связано с метеоусловиями вдоль трассы распространения инфразвука. Вторая сейсмическая мода при отсутствии акустического сигнала не регистрируется.

Наблюдаемое явление в [4] связывается с акустосейсмической индукцией – возбуждением колебаний в упругом полупространстве под действием акустической волны. На наш взгляд, следует



**Рис. 2.** Корреляционные функции между опорным свип-сигналом и магнитными и сейсмическими сигналами. Сейсмодвижитель ЦВ-100, свип-режим (4.5 км – пробег частоты 6.25–9.57 Гц, длительность сеанса 47 мин, сеанс с компенсирующей системой колец Гельмгольца; 49 км – пробег частоты 5.469–8.496 Гц, длительность сеанса 43 мин, сеанс без системы компенсации геомагнитного поля).

также принимать во внимание возможность генерации сейсмодвижителем различного класса поверхностных волн, которые могут распространяться на границе воздух–упругое полупространство (волны Стоули, “вытекающие” волны и т.п. [6]).

Магнитный и сейсмический сигналы. При свип-режиме сейсмодвижителя получены синхронные записи магнитного и сейсмического датчиков. На рис. 2 представлены примеры корреляционных функций между опорным свип-сигналом и сигналами, зарегистрированными на расстояниях 4.5 км и 49 км. Ось магнитного индукционного датчика ориентирована перпендикулярно к направлению на вибратор. В магнитном канале выделяется мода с практически нулевым запаздыванием (в пределах точности синхронизации таймера измерительной системы). Ее амплитуда убывает обратно пропорционально первой степени расстояния, что позволяет гово-

рить об электромагнитной волне, излучаемой при работе сейсмодвижителя.

Вторая и третья магнитные моды на расстоянии 4.5 км на рис. 2 по времени прихода приблизительно совпадают соответственно с первой и второй модами сейсмического сигнала. Отсюда можно предположить, что вторая и третья магнитные моды возникают вследствие механических колебаний магнитного датчика в постоянном магнитном поле Земли под действием сейсмических волн. Такой эффект хорошо известен для индукционных магнитных датчиков с высокой чувствительностью. Для исключения такого ложного “сейсмоманитного” эффекта использовался свип-режим, позволяющий разделить сигналы во времени, а также применялась упругая подвеска магнитного датчика и компенсация внешнего геомагнитного поля с помощью колец Гельмгольца. Величина тока компенсации в кольцах подбиралась

с помощью чувствительного феррозонда. Отметим, что данные, приведенные на рис. 2 (для 4.5 км), получены с включенной системой компенсации. При этом амплитуды второй и третьей магнитных мод все же оказываются не равными нулю, что может быть связано с влиянием некомпенсированных горизонтальных составляющих геомагнитного поля.

Электрический и сейсмический сигналы. Возмущения атмосферного электрического поля с помощью датчика струнного типа удалось зафиксировать лишь на расстояниях менее 700 м от сейсмовибратора. На таких небольших расстояниях трудно оценить, малые временные задержки между модами даже в свип-режиме с максимальной длительностью сеанса 47 мин 32 с. Оценка амплитуды электрического поля вблизи сейсмовибратора в монохроматическом режиме приводит к значениям менее 1 В/м. Выявлены характерные возмущения электрического поля в атмосфере, появляющиеся примерно за одну минуту до выхода сейсмовибратора ЦВ-100 на рабочий режим, вероятно, связанные с включением силовых установок питания сейсмовибратора. Следует отметить, что возмущения электрического поля на частоте сейсмовибратора обнаружены как при работе вибраторов ЦВ-100 и ЦВ-40, так и при работе гидрорезонансного вибратора ГРВ-50, имеющего пневматический привод. Последнее указывает на геофизическое происхождение возмущений электрического поля в атмосфере, а не на связь его с работой вибратора как технического устройства.

Доплеровское зондирование ионосферы. Особый интерес вызывают результаты доплеровского зондирования ионосферы в связи с возможным воздействием на нее акустического излучения сейсмовибраторов. Акустические волны инфразвукового диапазона способны распространяться на большие расстояния и при благоприятных условиях (малом затухании и рассеянии, слабой рефракции в атмосфере) достигать ионосферных высот [3]. Прохождение такой акустической волны через область отражения зондирующей ионосферу радиоволны должно приводить к фазовой модуляции последней на частоте вибратора. Для усиления эффекта зондирование желательно осуществлять на радиочастотах, отражаемых нижними слоями ионосферы (E-слой, высоты 90–140 км). К сожалению, в ночное время, когда чаще всего работал сейсмовибратор, E-слой на ионограммах отсутствует. Нерегулярно возникающий спорадический Es-слой из-за его частичной прозрачности, некогерентности отражений, независимости действующей высоты от частоты и т.п. не позволяет предполагать простого характера его взаимодействия с акустической волной, приводящего к фазовой модуляции зон-

дирующей радиоволны. Поэтому наибольший интерес вызывали доплеровские измерения по отражениям от регулярного E-слоя.

Удаленность ионозонда от сейсмовибратора, наличие посторонних спектральных компонент в рабочем диапазоне частот, ограниченная длительность единичного доплеровского сеанса (320 с) осложняют наблюдения и анализ результатов. Для обнаружения эффекта измерения проводились во время свип-режима работы сейсмовибратора. Построив в координатах доплеровская частота–время изолинии оценок спектральной плотности, полученных в скользящем временном окне, можно ожидать проявления эффекта в виде прямой, проведенной через области повышенной плотности. Наклон этой прямой должен совпадать с наклоном аналогичной линии, полученной по сейсмическим данным, а сдвиг по оси времени отображать время прихода акустической волны от земной поверхности в область отражения зондирующей радиоволны в ионосфере.

Нами зарегистрировано два таких случая в трех проведенных дневных свип-сеансах ЦВ-100. Результаты для одного сеанса представлены на рис. 3. На данных, полученных с сейсмического и акустического датчиков, легко увидеть прямые, характеризующие изменение рабочей частоты сейсмовибратора. Аналогичная осредненная прямая, полученная по данным доплеровского зондирования, отображающая наблюдавшееся со временем изменение частоты спектральной составляющей доплеровского спектра, приведена в левой части. Справа также показана прямая, изображающая изменение рабочей частоты сейсмовибратора в момент наблюдения. Смещение по оси времени оказывается порядка 7 мин, что соответствует вертикальной скорости распространения акустической волны около 330 м/с.

4. Таким образом, экспериментально доказано существование акустических и сейсмических сигналов с приблизительно равными временами прихода на расстояния до 50 км от сейсмовибратора. Наблюдаемое явление можно связать: с акусто-сейсмической индукцией – возбуждением колебаний в упругом полупространстве под действием акустической волны и процессами трансформации волн на границе атмосферы с Землей, возникающими при отражениях волн от этой границы; с генерацией сейсмовибратором различного класса поверхностных волн, которые могут распространяться на границе жидкость–упругое полупространство (волн Стоули, “вытекающих” волн и т.п.).

С помощью индукционного магнитного датчика экспериментально установлено существование электромагнитной волны, излучаемой на рабочей частоте мощным сейсмовибратором при вибросейсмическом зондировании. Это явление

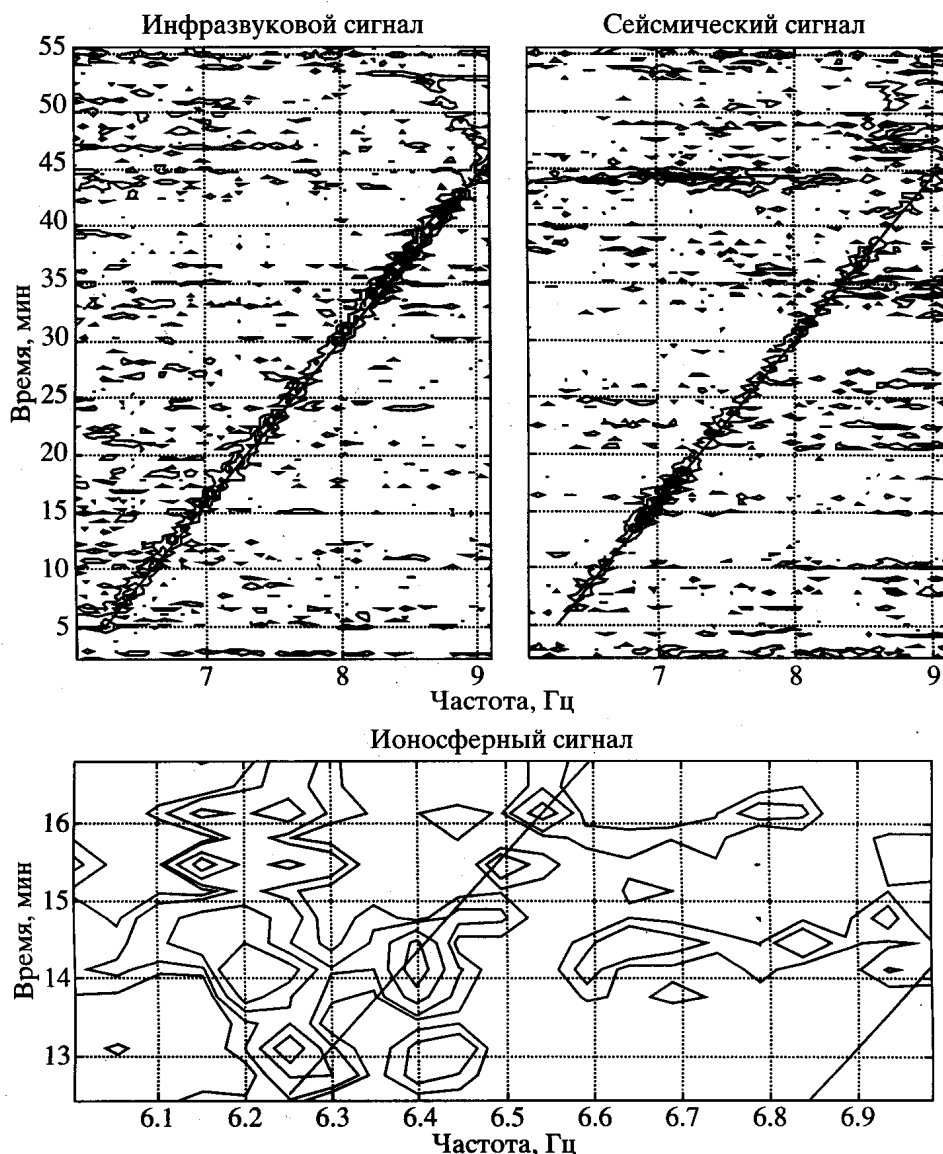


Рис. 3. Спектрально-временные диаграммы сейсмических, акустических наблюдений (6.5 км) и доплеровских наблюдений (49 км). Сейсмодвижитель ЦВ-100, свип-режим, пробог частоты 6.25–9.57 Гц, длительность сеанса 47 мин. Доплеровское зондирование на частоте 1785 кГц с высоты 140 км.

может быть связано с возбуждением токов на частоте сейсмодвижителя в атмосфере и в литосфере под действием акустической и сейсмической волн. В отличие от работы [7], где сообщается о регистрации сейсмоманнитного эффекта в монохроматическом режиме, наши измерения проведены в свип-режиме, что позволило определить временные задержки между модами.

Экспериментально обнаружено воздействие на ионосферу акустической волны, возбуждаемой при работе мощного сейсмодвижителя в диапазоне инфразвуковых частот. Оно проявляется в дополнительной фазовой модуляции и изменениях доплеровского спектра зондирующей ионосферу радиоволны на рабочих частотах сейсмодвижителя. Эффект выявлен в дневных условиях

при отражении от E-слоя ионосферы, возмущаемого сейсмодвижителем. Время прихода акустической волны на высоте E-слоя составляет около 7 мин.

Экспериментальные результаты показывают возможность применения мощных сейсмодвижителей для изучения связи между акустическими, сейсмическими, электрическими, магнитными и ионосферными явлениями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 96-05-66055). Сеансы вибросейсмического зондирования были организованы и в значительной степени финансированы ВЦ СО РАН.

Мы благодарим наших коллег В.С. Селезнева, А.Ф. Еманова, В.Н. Кашуна, Б.М. Глинского,

Б.М. Пушного, В.В. Ковалевского, А.Е. Резникова, А.Л. Карпенко, В.И. Юшина, В.В. Маньковского, Г.В. Егорова, В.М. Носова, А.Н. Федорова, О.М. Грехова и А.Ф. Павлова за помощь при проведении экспериментов на сейсмовибраторах, предоставление аппаратуры и обсуждение полученных результатов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гохберг М.Б., Моргунов В.А., Похотелов О.А. Сейсмoeлектромагнитные явления. М.: Наука, 1988. 174 с.
2. Сидорин Л.Я. Предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 192 с.
3. Литерветский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М.: Наука, 1992. 304 с.
4. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Дряхлов С.И. и др. // ДАН. 1996. Т. 346. № 5. С. 664–667.
5. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Еманов А.Ф. и др. // Тр. ВЦ СО РАН. В. 4. Новосибирск, 1996. С. 3–17.
6. Бреховских Л.М. Волны в слойстых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
7. Глинский Б.М., Ивакин А.Н., Ковалевский В.В. и др. // Развитие методов и средств эксперим. геофизики. 1996. В. 2. С. 226–234.