

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/289966631>

Study of geophysical disturbances on vibroseismic sounding

Article in *Geologiya i Geofizika* · January 1999

CITATIONS

3

READS

31

7 authors, including:



Vladimir V. Kuznetsov

The Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation

22 PUBLICATIONS 75 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Valery Plotkin

A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS

80 PUBLICATIONS 228 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Sergey Y. Khomutov

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation of the Far East...

68 PUBLICATIONS 155 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Magnetic observatories: devices, measurements and data processing [View project](#)



Modern high-precision Overhauser magnetometers [View project](#)

ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ ВИБРОСЕЙСМИЧЕСКОМ ЗОНДИРОВАНИИ

В. В. Кузнецов, В. В. Плоткин, С. Ю. Хомутов, О. М. Грехов,
А. Ф. Павлов, А. Н. Федоров, В. И. Струминский

*Объединенный институт геологии, геофизики и минералогии СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. акад. Коптюга, 3, Россия*

С помощью комплекса аппаратуры, включающего магнитный индукционный датчик, два датчика атмосферного электрического поля, акустический датчик и вертикальный сейсмограф, были исследованы электромагнитные и акустические явления, сопровождающие работу мощных сейсмовибраторов, установленных на полигоне Быстровка СО РАН (Новосибирск) и работающих как в свип-режиме, так и монохроматическом в диапазоне частот 5—10 Гц. Экспериментально доказано существование акустических и сейсмических сигналов с близкими временами прихода на расстояниях до 50 км от сейсмовибратора. Установлено существование электромагнитной волны, излучаемой на частоте вибратора. По результатам доплеровских наблюдений на цифровом ионозонде „Парус“, установленном на станции Ключи ИГФ СО РАН, в периоды работы сейсмовибратора с амплитудой силы 100 т были зарегистрированы возмущения в ионосфере. Эффект отмечался только во время дневных сеансов по отражениям от устойчивого *E*-слоя и отсутствовал в ночное время при зондировании *F*- или спорадического *Es*-слоя. Временное запаздывание между излучаемым свип-сигналом и соответствующим его проявлением в ионосфере оценивается в 7—8 мин, что согласуется с временем распространения акустического сигнала до высот радиотражений.

Сейсмовибраторы, электрическое и магнитное поля, инфразвук, ионосфера

STUDY OF GEOPHYSICAL DISTURBANCES ON VIBROSEISMIC SOUNDING

V. V. Kuznetsov, V. V. Plotkin, S. Yu. Khomutov, O. M. Grekhov, A. F. Pavlov,
A. N. Fedorov, and V. I. Struminskii

Using a complex equipment including a magnetic induction transducer, two transducers of the atmospheric electric field, an acoustic transducer, and a vertical seismograph, we have studied the electromagnetic and acoustic phenomena accompanying the operation of powerful seismic vibrators on the Bystrovka test ground (Novosibirsk), functioning in the sweep and monochromatic regimes in the frequency range of 5—10 Hz. An experimental proof is given for the existence of acoustic and seismic signals with close arrival times at the distances as great as 50 km from the seismic vibrator. Also, the existence of an electromagnetic wave radiated at the vibrator frequency is established. Doppler observations on the digital ionosonde "Parus" at the Klyuchi station permitted registration of the ionosphere disturbances during the operation of a seismic 100-tons vibrator. The effect was detected only in the day time, by the wave reflection from the stable *E* layer, and was missing at night on sounding the *F* or sporadic *Es* layer. The time lag between the radiated sweep signal and the similar signal in the ionosphere is estimated at 7—8 min, which agrees with the time of acoustic-signal propagation to the heights of radio-wave reflection.

Seismic vibrators, electric and magnetic fields, infrasound, ionosphere

ВВЕДЕНИЕ

Механизмы акустического и электромагнитного взаимодействия литосферы, атмосферы и ионосферы при землетрясениях, мощных взрывах, извержениях вулканов, цунами, торнадо и прочих аномальных явлениях активно изучаются, однако еще далеки от полного понимания. Одна из наиболее существенных причин этого — свойства источников регистрируемых возмущений акустического, электрического, магнитного полей. Такие естественные источники, как землетрясения, извержения вулканов, торнадо, грозовые разряды, болиды и т. п. случайны и эпизодичны как во времени, так и по своему географическому распределению. Кроме того, энергетические характеристики этих явлений зачастую неизвестны и трудны для оценки. Искусственные источники, подобные ядерным и обычным взрывам при испытаниях или взрывах в карьерах и шахтах, также редки и, что особенно важно, экологически небезопасны. Альтернативный путь управляемого воздействия на геофизическую среду — это применение мощных сейсмовибраторов, являющихся источником сейсмических волн на частотах 5—12 Гц. Особый интерес вызывают возникающие при этом акустические и электромагнитные возмущения.

В данной статье изучаются акустические и электромагнитные взаимодействия между различными геофизическими средами при вибросейсмическом возмущении земной поверхности. Рассматривается постановка задачи, вытекающая из проблемы физики и прогноза землетрясений,

краткий обзор исследований в этой области. Описываются измерительная система и используемые методы анализа данных, а также представлены предварительные результаты комплексных экспериментальных измерений, выполненных в течение полевого сезона 1997—1998 гг.

ОБЗОР И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Проблема сейсмичности Земли и физики землетрясения, несмотря на интенсивное изучение этого явления природы многими учеными во многих странах, остается нерешенной. Колоссальные разрушения и гибель людей, живущих в сейсмоактивных районах, делают проблему сейсмической опасности все более актуальной и требующей от научного сообщества ее решения. Особое социальное значение в освещении различных аспектов обсуждаемой проблемы имеет прогноз землетрясений. В настоящее время в таких странах, как Япония, США и Китай, уже созданы и функционируют системы, предназначенные для раннего предупреждения о грядущем событии. Принято решение создать такую систему и в России. Однако, как показал печальный мировой опыт, несмотря на развитые сети непрерывного мониторинга различных геофизических параметров в сейсмоактивных районах, предугадать события, произошедшие в зоне наблюдений, пока не удастся. В качестве примера можно привести недавние землетрясения в Кобе (Япония, 1995) и Нортридже (США, Калифорния, 1994) и ряд других сильных и разрушительных событий, произошедших буквально „на глазах“ у сейсмологов.

Все системы прогноза базируются, как правило, на использовании уже сравнительно давно выявленных признаков. Трудно назвать какой-либо из них, о котором не было бы написано в известной книге Т. Рикитаки [1], вышедшей еще в 1979 г. Среди „прогнозных“ признаков, предлагаемых к обсуждению, особую роль играют признаки, основанные на использовании электромагнитных полей. Сюда можно отнести: а) регистрацию электромагнитного излучения (эмиссии) — ЭМИ из зоны очага; б) возрастание сейсмoeлектрической активности, регистрируемой в теллурических токах; в) изменение величины атмосферного электрического поля и, возможно, связанные с ним явления свечения неба и даже воды [2] перед сильными землетрясениями; г) изменения в магнитном поле Земли и д) изменения, фиксируемые в ионосфере. Кроме того, имеет смысл упомянуть о регистрации акустических („подземный гул“) и сейсмических (форшоки) сигналов перед сильными событиями. Можно отметить признаки, связанные с изменением наклона земной поверхности, величины силы тяжести, амплитуды деформаций и т. п. Перечисляя признаки, нельзя не остановиться и на серии так называемых реологических, регистрирующих, например, отношение скоростей продольных и поперечных волн и т. д.

Ни один из признаков готовящегося землетрясения не получил пока ясной интерпретации и связи его с процессом подготовки землетрясения, да и с самим явлением. Дело в том, что до сих пор так и нет понимания ни природы сейсмичности, ни физики землетрясения. Известные в настоящее время модели очага землетрясения в той или иной форме связаны с генерацией сейсмических волн. Ни одна из моделей не обходится без использования механизма „лавиного“ трещинообразования. Совершенно неясен физический механизм этого явления, но, если что-либо подобное происходит в земных недрах, и это „что-то“ связано с интенсивным образованием (раскрытием) трещин, то, очевидно, что очаг землетрясения можно уподобить источнику сейсмических волн. Известна модель очага, в которой он просто источник сейсмических волн, а разрушения на земной поверхности обязаны их усилению за счет интерференции [3]. Разрабатываемая одним из авторов этой статьи ударно-волновая модель очага землетрясения [4], предполагает возникновение в земных недрах когерентной волновой структуры: акустически активной среды, на стадии подготовки в генерации основного „толчка“ — собственно землетрясения. „Толчок“ является результатом возникновения ударной волны (УВ) в гипоцентре, распространения УВ до земной поверхности, отражения ее и генерацию при этом волны разгрузки—разрушения. Согласно этой модели, в акустически активной среде возникают сейсмические волны, которые могут быть зафиксированы и как „подземный шум“, и как микросейсмы. Более того, из этой модели следует такая особенность, как возникновение в зоне очага когерентной структуры, обладающей „дальним порядком“. Это открывает возможность для привлечения к объяснению физики происходящих процессов таких явлений, как возникновение электрических полей от раскрывающихся трещин при их когерентном „сложении“, изменение величины магнитного поля при упорядочении ферромагнитных структур и т. п. Кроме этого, здесь могут иметь место различного рода сейсмoeлектрические и сейсмoмагнитные эффекты как результат воздействия сейсмической волны на упругую среду, являющуюся „носителем“ магнитных и электрических „зарядов“.

Очевидно, что сейсмическая волна, выходя на земную поверхность, будет генерировать акустическую волну. Она, распространяясь в атмосфере, способна переносить информацию об очаге, например, на ионосферные высоты, где, взаимодействуя с ионизированным воздухом, вызывать возмущения. Другим возможным „переносчиком“ возмущений в атмосфере от земной поверхности

вплоть до ионосферных высот, вызываемых готовящимся землетрясением, может быть электрическое поле. Как показано в [5], электрическое поле может проникать из хорошо проводящей земной коры в плохо проводящую атмосферу за счет преобразования вертикальных компонент поля в тангенциальные и обратно на границе этих сред. Возможно, действие именно этого механизма „обязано“ появление таких электрических явлений перед землетрясениями, как свечение неба, воды и т. п. Электрическое поле способно проникать и на ионосферные высоты [6], где может вызывать те самые явления, которые фиксируются как ионосферные предвестники землетрясения.

Землетрясения, по-видимому, представляют собой наиболее распространенный естественный источник акустических и электромагнитных возмущений, которые активно изучаются. Считается, что при землетрясениях источником акустических возмущений в атмосфере является рэлеевская волна, распространяющаяся вдоль земной поверхности со скоростью нескольких километров в секунду [7]. В этом случае акустическая волна излучается в атмосферу почти вертикально. Периоды акустических колебаний по измерениям [8] составляют десятки секунд. Инфразвуковые волны столь низких частот испытывают весьма малое поглощение в атмосфере, распространяются на большие расстояния и оказывают акустическое воздействие на ионосферу [9, 10].

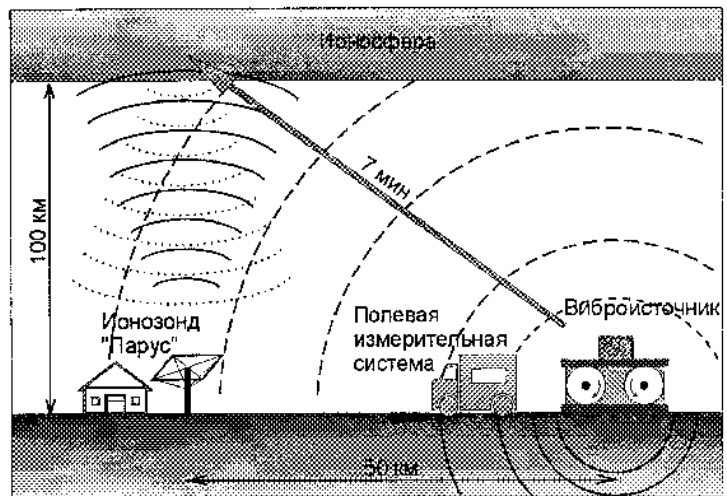
Однако землетрясения, особенно сильные, происходят нечасто, случаются случайно, и детально изучить сопровождающие их явления трудно. Это же относится и к таким естественным источникам акустических и сейсмических колебаний как болиды [11, 12]. Поэтому другой важный путь изучения сейсмоионосферных явлений связан с искусственным возбуждением сейсмических колебаний земной поверхности и применением всех возможных способов излучения инфразвука. Инфразвук хорошо распространяется в приземном волноводе, испытывая отражения от различных слоев атмосферы. В исследованиях дальнего распространения инфразвука принято называть лучи, отражающиеся в тропосфере — звуком первого рода, отражающиеся вблизи озонового слоя на высотах 40—50 км — звуком второго рода, а если поворот луча осуществляется в термосфере на высотах 100 км и более, то говорят о звуке третьего рода. При этом выводы делаются на основании оценок времени распространения регистрируемых акустических сигналов. Автором работы [13] регистрировался аномальный звук третьего рода от полетов сверхзвуковых самолетов на горизонтальных удалениях от 165 до 1000 км. Излучатели инфразвука, применявшиеся в установках радиоакустического зондирования, имели частоты не ниже 80 Гц [14], поэтому их дальность не превышала 3 км по высоте. Интересные инфразвуковые и сейсмические возмущения наблюдались во время старта и посадки американских космических аппаратов „Шатл“ [10, 12]. Обзор явлений, наблюдаемых в верхней атмосфере при излучении инфразвука различными природными и искусственными источниками, дан в [15].

Хорошую возможность для изучения сейсмоионосферных связей предоставляют явления, наблюдавшиеся при мощных взрывах (см., например, [16—18]). В [17] приведена простая физическая модель, объясняющая наблюдаемые искажения доплеровских спектров радиоволн, распространяющихся через область спорадического *E*-слоя ионосферы, возмущаемого мощным наземным взрывом. В соответствии с этой моделью акустическая волна в ионосфере на высотах ~100 км распространяется почти горизонтально во все стороны от области над эпицентром взрыва. Различные аспекты взаимодействия акустических и сейсмических волн, наблюдаемых при атмосферных (на высотах 4, 6 и 8 км), наземных и подземных взрывах, рассмотрены в работе [19].

Электромагнитные эффекты, сопровождающие рассматриваемые явления, также представляют большой интерес и достаточно подробно рассматриваются в монографиях [20, 21]. Отметим работу [22], посвященную наблюдению геомагнитных возмущений, сопровождавших сильное землетрясение в Кобе (Япония) в 1995 г. Эти эффекты интенсивно изучаются сейчас в связи с проблемой поиска предвестников готовящихся землетрясений. Большое внимание к ним уделялось также с целью выяснения возможности идентификации ядерных, обычных взрывов и землетрясений. В [23] описывается серия измерений параметров низкочастотного электромагнитного излучения при ядерных и химических взрывах и установлено, что электромагнитные импульсы (ЭМИ), порождаемые этими взрывами, существенно различаются. Только при ядерном взрыве наблюдаются относительно короткие импульсы в магнитном поле в момент дсонации, обусловленные гамма-излучением. Природа последующих сигналов в магнитном и электрическом полях как при ядерных, так и при обычных взрывах, остается пока неясной. Один из возможных механизмов связан с разделением зарядов при образовании разрывов в породах [24—26].

В связи со сказанным, существенный интерес представляет исследование механизмов возбуждения указанных геофизических возмущений в управляемом эксперименте, в частности, при вибросейсмическом зондировании. Сейсмовибраторы, разработанные для исследования земных недр, предлагается использовать также как инструмент, предназначенный для предупреждения о готовящемся землетрясении. В проектах и в уже действующих системах, использующих сейсмовибраторы, предполагается выявлять незначительные изменения в скоростях, фазах и амплитудах сейсмических волн, прошедших зону подготавливаемого землетрясения. Сейсмовибратор — это управляемый

Рис. 1. Схема проведения измерений: относительное расположение возмущаемых геофизических сред и ожидаемых каналов распространения сигналов от виброисточника.



когерентный источник сейсмических волн с частотами излучения 5—10 Гц [27], регистрируемых на расстояниях больше 1000 км. В этом плане он может быть уподоблен несильному землетрясению с управляемыми параметрами. Нам представляется, что мощная сейсмическая волна, по крайней мере в окрестности вибратора, может оказывать влияние на такие явления, как теллурические токи и приводить к изменению их интенсивности, может оказывать влияние на земные электрические и магнитные поля, может быть источником мощного акустического излучения в инфразвуковом диапазоне.

Таким образом, речь идет о тех же самых физических явлениях, которые используются в качестве прогнозных для землетрясений. Известны результаты исследований сейсмоакустических [28] и сейсмамагнитных [29] эффектов, сопровождающих работу мощных сейсмодвижителей. В работе [28] описан эффект возбуждения упругих поверхностных волн акустическим излучением инфразвуковых частот в атмосфере от вибрационного сейсмического источника. Такой эффект, названный авторами [28] акустосейсмической индукцией, связывается с появлением цуга колебаний поверхностных волн со временем прихода 57—60 с на расстоянии 20 км от сейсмодвижителя. О регистрации магнитного сигнала на частоте вибратора на удалении 7 км сообщается в [29]. В этой работе приведены результаты в случае работы сейсмодвижителя в монохроматическом режиме, когда трудно разделить сейсмамагнитный сигнал и эффект, обусловленный сейсмическими колебаниями индукционного датчика в магнитном поле Земли.

Землетрясение как явление включает в себя сложный комплекс широкого класса явлений из различных областей физики. По всей видимости, в настоящее время не представляется возможным в одной модели охватить весь широчайший ассортимент процессов и явлений. Пока даже нет возможности выделить то главное явление, которое лежит в основе землетрясения. В такой ситуации остается единственный путь: изучать это явление „по частям“. Предлагаемый в настоящей статье материал следует рассматривать именно под таким углом зрения. Основная цель исследований состоит в том, чтобы разобраться с комплексом процессов воздействия на геофизическую среду мощного сейсмического сигнала (рис. 1). Мы считаем, что нам следует ответить на такие вопросы: как происходит генерация инфразвука? как инфразвук распространяется вдоль земной поверхности и до ионосферных высот? что является причиной модуляции атмосферного электрического поля? что происходит с магнитным полем при воздействии вибратора? воздействует ли сейсмическая волна от вибратора на теллурические токи и может ли она быть причиной возникновения так называемой „сейсмоэлектрической активности“? Это принципиальные вопросы как с точки зрения физики землетрясений, так и в плане построения систем их прогноза. Мы надеемся, что эксперименты, проводимые на Быстровских сейсмодвижителях, позволят нам приблизиться к их решению.

ИСТОЧНИКИ ВИБРОСИГНАЛОВ, ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Установленные на Быстровском вибросейсмическом полигоне СО РАН (Новосибирская обл.), сейсмодвижители 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 [27, 28]. Все три вибратора работали как в режиме монохроматического излучения с переключением частоты непосредственно в течение сеанса, так и в свип-режиме. Частотный диапазон составлял от 5 до 12 Гц, точность задания частоты не хуже 10^{-7} . Продолжительность сеанса — от 20 до 48 мин. В свип-режиме частота изменяется линейно в заданных пределах (например, пробег частоты при наиболее часто используемом свипе для ЦВ-100 составляет 6,25—9,57 Гц за 47 мин).

Используемый нами в 1997 г. полевой измерительный комплекс включал пять датчиков (сейсмический, два акустических, электрический и магнитный), 12-разрядный четырехканальный АЦП с аналоговым фильтром высоких частот на входе, ЭВМ типа IBM PC 386SX и программное обеспечение для управления сбором и обработкой информации. Полоса частот, обеспечиваемая

усилительными трактами датчиков и АЦП, составляла 0—9 Гц (частота дискретизации 18 Гц). Система позволяла опрашивать последовательно любые два канала с задержкой между каналами 20 мс. В 1998 г. комплекс был модернизирован: дополнительно включен более чувствительный датчик электрического поля, установлен более совершенный АЦП (16 разрядов, 8 дифференциальных каналов, максимальная частота опроса до 100 кГц) и использовалась ЭВМ РС 486DX. Фильтрация высоких частот осуществлялась с помощью программно-реализованного фильтра непосредственно при опросе датчиков. Частота измерений была принята равной 25 Гц.

Низкочастотный сейсмоприемник ВЭГИК для измерений вертикальной компоненты с чувствительностью 5 В·с/м имеет плоскую скоростную АЧХ в частотном диапазоне 1—20 Гц. Измерения вертикальной составляющей атмосферного электрического поля преимущественно были выполнены с помощью датчика струнного типа с порогом чувствительности порядка 1 В/м, предназначенного для регулярных обсерваторских наблюдений больших изменений электрического поля, что ограничило его применение лишь незначительными расстояниями от сейсмодатчика (первые сотни метров). В 1998 г. дополнительно использовался электрометр с чувствительностью порядка 1 мВ/м, реализованный в виде приемника с вертикальной штыревой антенной длиной около 30 см. Для магнитных наблюдений применялся датчик индукционного типа, имеющий чувствительность не хуже 0,001 нТл. Измерения акустических колебаний инфразвукового диапазона выполнялись с помощью двух датчиков. Гидрофон с пьезодатчиком ПДС-7 (чувствительность порядка 0,001 Па), любезно предоставленный Б. М. Пушным (ВЦ СО РАН, г. Новосибирск), позволял регистрировать акустический сигнал от сейсмодатчика на удалении до 50 км. Другой датчик с тензочувствительным элементом с меньшим порогом чувствительности (разработка ЛВМСИ ИГФ СО РАН) использовался для наблюдений на малых расстояниях от сейсмодатчика. Привязка начала измерений относительно сеанса вибратора осуществлялась по сигналам точного времени с секундной точностью.

В качестве примера получаемых первичных данных на рис. 2 и 3 представлены фрагменты записей акустических, магнитных и электрических сигналов при смене рабочей частоты гидрорезонансного вибратора ГРВ-50 (монохроматический режим) и в моменты его включения и выключения. Приведены также спектры этих сигналов. Отметим, что сейсмодатчик ГРВ-50 с пневматическим приводом не имеет каких-либо мощных питающих электрических цепей, которые могли бы быть

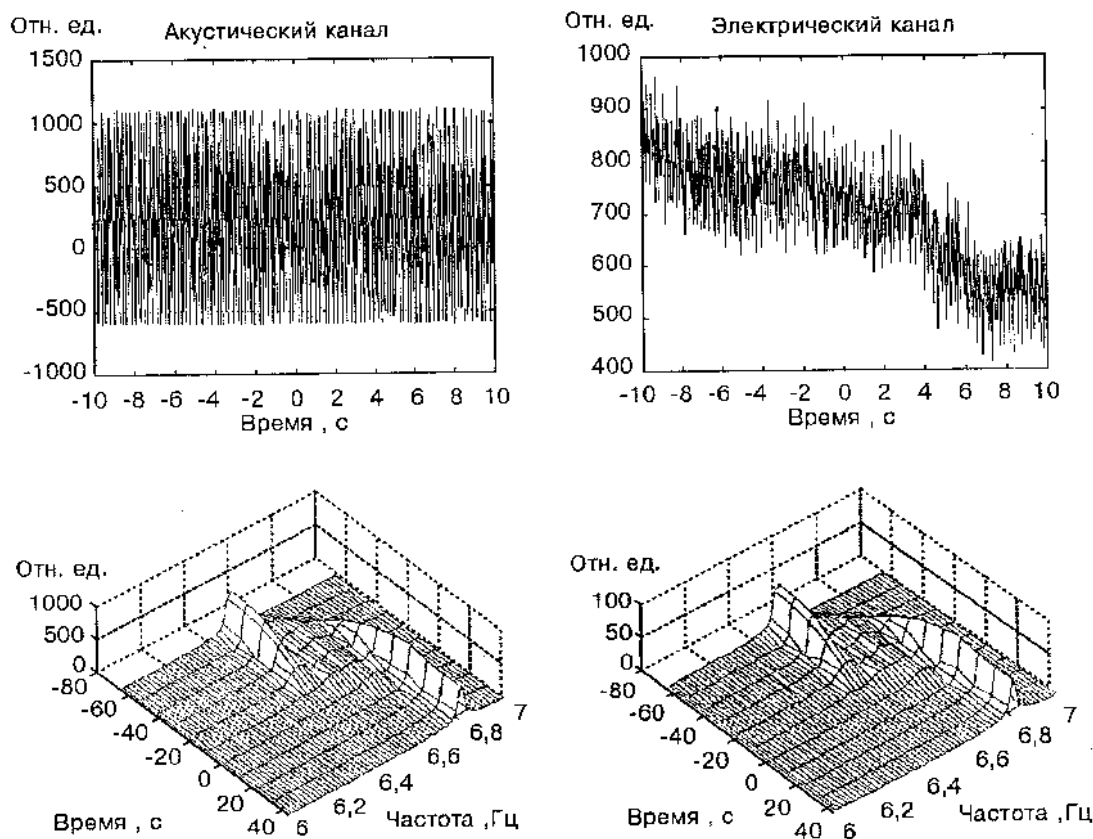


Рис. 2. Примеры записей акустического и электрического сигналов (вверху) и их спектры в скользящем окне (внизу) во время смены частоты сейсмодатчика ГРВ-50 с 6,5 Гц на 6,8 Гц на расстоянии около 300 м.

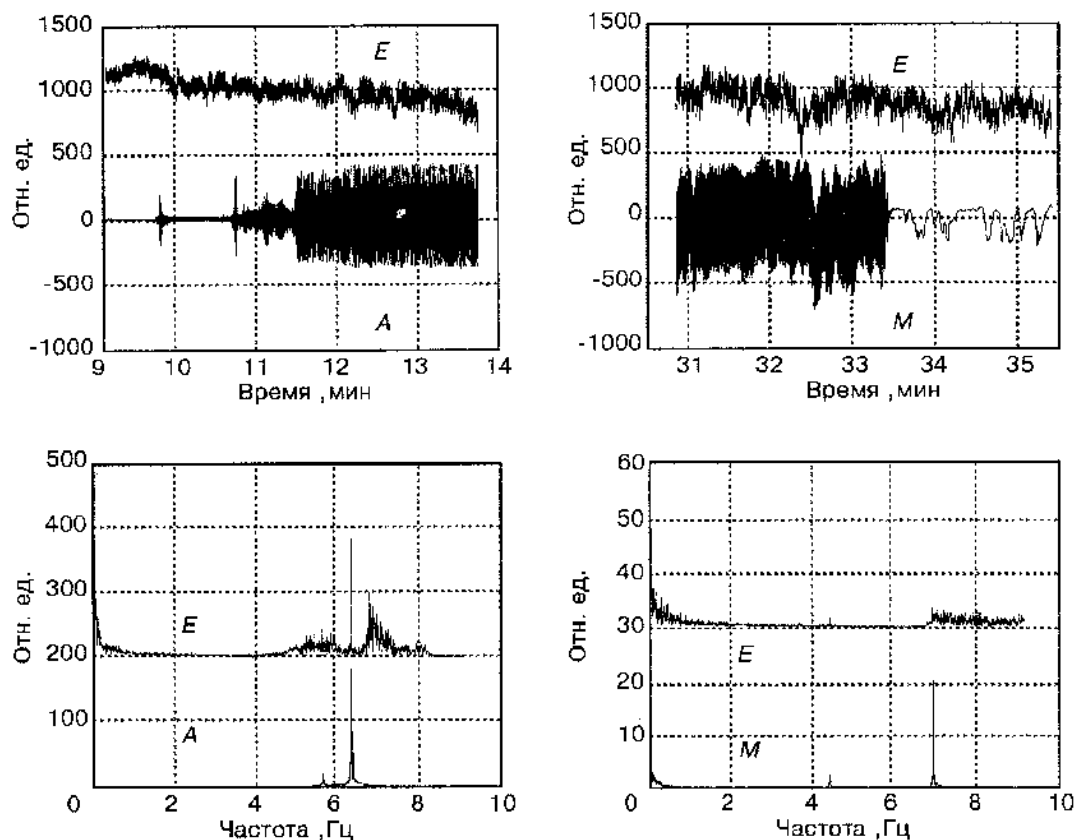


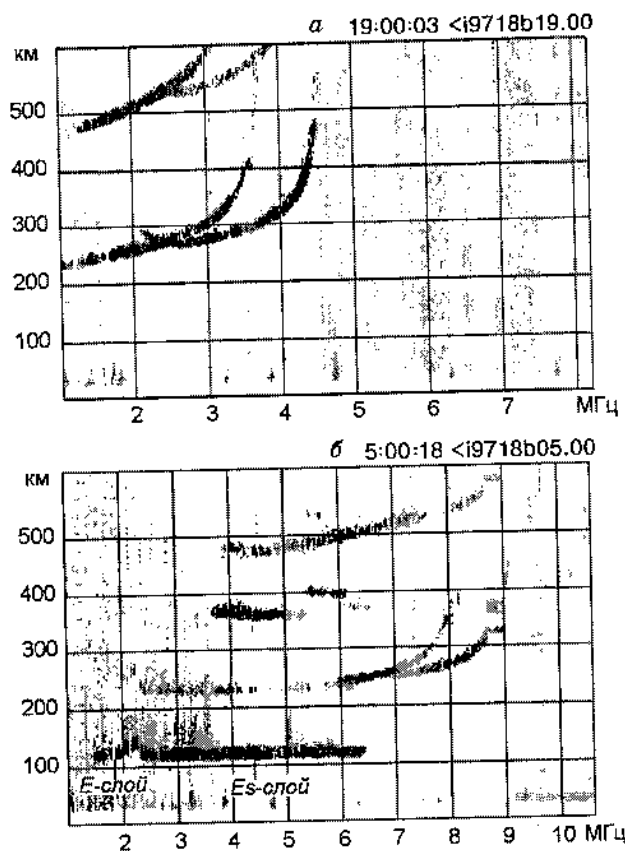
Рис. 3. Примеры записей электрического, акустического и магнитного сигналов (вверху) и их спектры (внизу) при включении (слева; рабочая частота 6,3 Гц) и выключении (справа; рабочая частота 6,9 Гц) сейсмовибратора ГРВ-50 на расстоянии около 700 м.

источником возмущений электрического или магнитного полей. В спектрах вертикальной компоненты электрического поля в атмосфере на рис. 3 наблюдается узкополосный шум, не связанный с работой сейсмовибратора, который, возможно, обусловлен глобальными шумановскими резонансами полости Земля—ионосфера.

На удалении 49 км от сейсмовибратора в обсерватории ИГФ СО РАН Ключи установлен цифровой ионозонд „Парус“ (разработка ИЗМИРАН, г. Москва), работающий в режиме непрерывного мониторинга состояния ионосферы. Он позволяет получать как ионограммы (в цифровом виде), так и проводить доплеровские измерения циклами по заранее установленной с помощью ЭВМ сетке радиочастот (в диапазоне 1—20 МГц) и кажущихся высот отражения (до 450 км). По измеренным эхо-сигналам от отражающих слоев ионосферы вычислялись квадратурные составляющие и доплеровский спектр. Частота послышки радиоимпульсов составляет 50 Гц, что уверенно перекрывает рабочий частотный диапазон сейсмовибраторов. Длительность непрерывного единичного сеанса доплеровского зондирования, состоящего из максимально возможного количества (16 000) отсчетов, составляет 320 с, время его начала фиксируется с точностью до 1 с. Примеры ночной (а) и дневной (б) ионограмм, полученных ионозондом, приведены на рис. 4. Отметим, что самый низкий регулярный ионосферный E-слой, присутствующий в дневное время на высотах 90—140 км, где проявление сейсмоионосферного эффекта наиболее вероятно, отсутствует в ночное время. На рис. 5 показан пример доплеровского спектра (вверху) и его фрагменты в рабочей полосе частот, полученные в дневное время в ноябре по данным зондирования за 20 с при работе сейсмовибратора ЦВ-100 в свип-режиме.

Экспериментальные работы проводились в июле—ноябре 1997 г. и апреле—июне 1998 г. Были выполнены комплексные измерения на малых расстояниях в несколько сотен метров, на удалении 4—7 км, а также на удалении 49 км от вибраторов (всего более 90 сеансов, в том числе около 67 — для ЦВ-1000, около 22 — 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 (из них только 4 днем, включая один сеанс работы ЦВ-40).

Рис. 4. Примеры ночной (а) и дневной (б) ионограмм.



По вертикальной оси отложена кажущаяся высота радиотражений в км, по горизонтали — несущая частота в МГц. Над ионограммой приводится время измерения по Гринвичу. В верхней части ионограмм видны сигналы кратных отражений.

МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Предварительная обработка исходных данных заключалась в общей оценке характера поведения сигнала и шума во временной и частотной областях. Данные о спектральном составе использовались в дальнейшем для фильтрации помех техногенного происхождения, а также помех, связанных с колебательными движениями датчиков при использовании упругих подвесов. В монохроматическом режиме работы сейсмовибраторов основное внимание было уделено анализу амплитудно-фазовых характеристик наблюдаемых сигналов, в том числе их вариаций со временем. При свип-режиме использование спектрально-временного анализа (СВАН), заключающегося в последовательных оценках спектра, позволяло выделять и наглядно отображать изменение частоты наблюдаемых сигналов. Длина фрагментов исходного ряда, используемых для вы-

числения спектра с помощью БПФ, выбиралась из соображений соответствия разрешения спектра по частоте изменениям частоты свип-сигнала на временном интервале рассматриваемых фрагментов. Для определения временных задержек вычислялась корреляционная функция между зарегистрированными сигналами и опорным свип-сигналом, излучаемым вибратором.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Акустический и сейсмический сигналы. Для исследования акустического поля на близких расстояниях (около 300 м) от сейсмовибратора ЦВ-100 были проведены фазовые измерения при его работе в монохроматическом режиме на двух частотах 6 и 7 Гц. Акустический датчик последовательно устанавливался в трех точках (схема расположения точек по отношению к направлению на сейсмовибратор приведена в нижней части рис. 6). Моменты перестановки датчика указаны заштрихованными прямоугольниками. Стабильность системного таймера порядка 10^{-4} позволяла выполнить фазовые измерения с точностью $\sim 1^\circ$. Скользящие оценки амплитуд и фаз на фиксированной частоте выполнялись методом наименьших квадратов. Соответствующие изменения фазы между пунктами 1 и 2 (вдоль направления на сейсмовибратор), пересчитанные во временные интервалы, составляют величину порядка 17—19 мс, и они практически отсутствуют между пунктами 1 и 3 (в перпендикулярном направлении). Следовательно, можно говорить, что уже на этом расстоянии от сейсмовибратора наблюдаемая картина не противоречит представлению поля одной акустической волной, распространяющейся со скоростью 320—340 м/с. Это позволяет заключить, что размер области генерации инфразвука вблизи сейсмовибратора не превышает 300 м.

Инфразвуковые измерения, выполненные в свип-режиме на различных расстояниях, показали, что акустический сигнал, генерируемый при работе сейсмовибраторов, может быть надежно зафиксирован, по крайней мере, на удаленностях до 50 км. На рис. 7 представлены примеры корреляционных функций (имеющих смысл восстановленных импульсных сейсмограмм) между опорным свип-сигналом и акустическими и сейсмическими записями, полученными на расстояниях 6,5 км (рис. 7,а) и 49 км (см. рис. 7,б, в). Акустический сигнал, который на рис. 7 имеет вид пакета волн (моды), на близком расстоянии устойчив и выделяется надежно. На большом удалении его амплитуда сильно изменяется от сеанса к сеансу: от величины отношения сигнал/шум порядка 5—10 до полного отсутствия полезного сигнала. Временные задержки прихода сигнала на рис. 7,а, в соответствуют

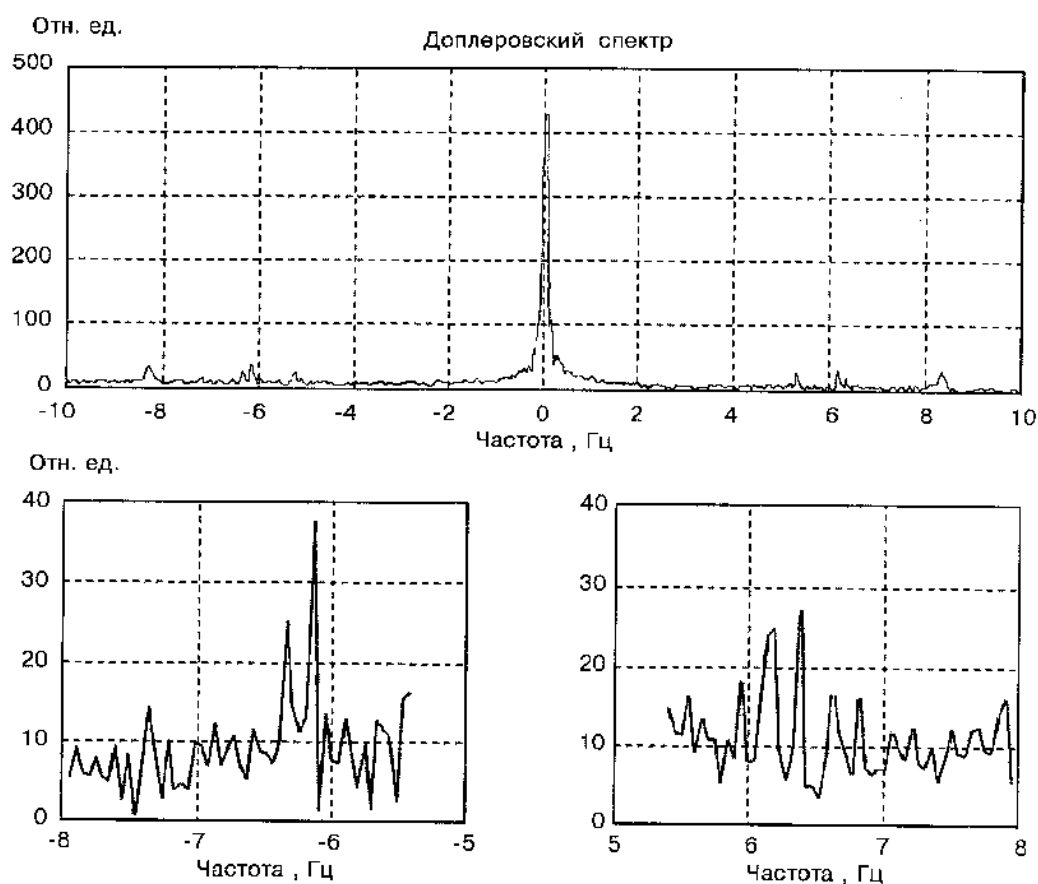


Рис. 5. Пример доплеровского спектра отраженных от ионосферы радиоволн во время работы 100-тонного сейсмовибратора в свип-режиме.

Пробег частоты за сеанс продолжительностью 47 мин составлял 6,25—9,57 Гц.

скоростям около 330 м/с при условии приземного распространения. В случае, приведенном на рис. 7,б, при такой же скорости, оцениваемая длина трассы составляет около 51 км, что позволяет предположить дугообразную траекторию с максимальной высотой 5—8 км. Условия распространения инфразвука, по-видимому, определяются метеоусловиями вдоль трассы [36].

Анализ измерений, сделанных с помощью вертикального сейсмографа, показал, что в ряде случаев сейсмический сигнал, генерируемый сейсмовибратором, имеет две моды. Всегда присутствующая первая мода — это пакет продольных и поперечных сейсмических волн, распространяющихся с кажущимися скоростями в несколько км/с [30]. Кроме того, в сейсмическом канале иногда выделяется вторая мода. Она появляется, если соответствующий ей акустический сигнал имеет достаточную амплитуду (см. рис. 7,а, б), и может отсутствовать, если амплитуда последнего мала (см. рис. 7,в). Вторая сейсмическая мода ни разу не была зарегистрирована при отсутствии акустической моды. Можно отметить наблюдавшееся нами увеличение от дневного сеанса к ночному амплитуды второй сейсмической моды. Ночью ее амплитуда превосходила амплитуду первой моды. Задержки по времени прихода сейсмических мод не расходятся с приведенными в [28], где они получены для расстояния 20 км.

Наблюдаемое явление в [28] связывается с акустосейсмической индукцией — возбуждением колебаний в упругом полупространстве под действием акустической волны. Моделирование такой индукции в простейшем варианте приведено в работе [31]. В более общем случае следует рассматривать процессы трансформации волн на границе атмосферы с Землей, возникающие при отражениях волн от этой границы. При этом следует учитывать как возможные не только случаи падения акустической волны из атмосферы на упругое полупространство, но и отражение упругих волн, выходящих из глубины упругого слоя на поверхность Земли и трансформирующиеся в атмосфере в акустические сигналы [32]. Более того, следует принять во внимание и возможность генерации сейсмовибратором различного класса поверхностных волн, которые могут распространяться на границе жидкость—упругое полупространство (в частности, волны, на которые впервые указал

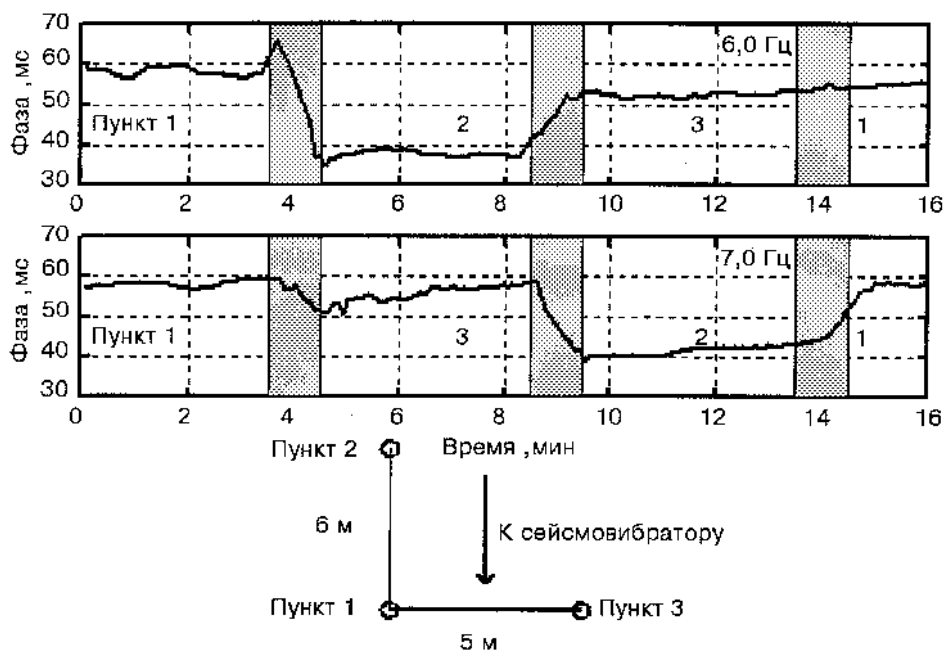


Рис. 6. Примеры фазовых акустических измерений на дистанции 300 м от сейсмовибратора ЦВ-100 при его работе в монохроматическом режиме на рабочей частоте 6,0 Гц (верхняя кривая) и 7,0 Гц (нижняя кривая).

В нижней части показана схема пунктов, где проведены фазовые измерения.

Р. Стовли [33], распространяющиеся в данной ситуации со скоростью меньшей скорости звука в воздухе; волны, относящиеся к классу „вытекающих“ волн [34], распространяющиеся со скоростью, превышающей скорость звука в атмосфере). Поэтому существенный интерес с точки зрения понимания происхождения регистрируемых „медленных“ акустических и сейсмических сигналов с одинаковым временем прибытия представляет сопоставление скорости распространения указанных сигналов со скоростью звука в атмосфере, измерение угла прихода акустической и сейсмической волн, а также изучение высотного поведения амплитуды волн и их поляризации. Эксперименты с сейсмовибраторами важны для понимания природы подобных волновых явлений, наблюдающихся при взрывах („air-blast wave“, „air-coupled Rayleigh wave“ [35]).

Магнитный и сейсмический сигналы. При свип-режиме сейсмовибратора получены синхронные записи магнитного и сейсмического датчиков. Максимум диаграммы направленности магнитного датчика сориентирован в направлении на вибратор. На рис. 8 приведены корреляционные функции между опорным свип-сигналом и магнитными и сейсмическими сигналами, зарегистрированными во время работы сейсмовибратора ЦВ-100. На рис. 8,а показаны результаты, полученные при удалении 4,5 км от вибратора. Сейсмический сигнал в этом сеансе также двухмодовый, как описано выше. В магнитном канале наблюдается несколько мод. Выделяется первая мода с весьма малым временем прихода, практически соответствующим моменту начала работы сейсмовибратора и, по-видимому, распространяющаяся со скоростью, близкой к скорости света (для определения времени прихода и скорости этой волны необходимы специальные устройства синхронизации). Отметим, что такая же мода с практически нулевым запаздыванием предположительно зарегистрирована нами на удалении 49 км от сейсмовибратора. Здесь ее амплитуда приблизительно в 10 раз меньше, чем на расстоянии 4,5 км и, следовательно, можно считать, что убывает обратно пропорционально расстоянию. В связи с этим можно говорить об электромагнитной волне, излучаемой при работе сейсмовибратора.

Вторая и третья магнитные моды на рис. 8,а по времени прихода приблизительно совпадают соответственно с первой и второй модами сейсмического сигнала. Аналогичная магнитная мода (см. рис. 8,б) зарегистрирована нами также на расстоянии 49 км. Отсюда можно заключить, 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. Поэтому необходимы специальные меры для исключения такого ложного „сейсмамагнитного“ эффекта. В частности, это может быть работа в свип-режиме, позволяющая разделить сигналы во времени, как показано на рис. 8. Кроме того, с целью уменьшения внешнего геомагнитного поля, а значит и эффекта

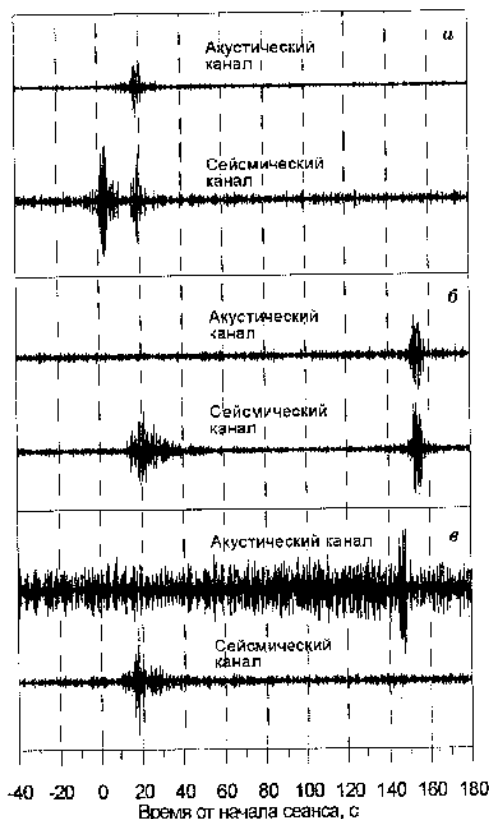


Рис. 7. Корреляционные функции между опорным свип-сигналом и акустическими и сейсмическими сигналами.

Сейсмовибратор ЦВ-100, свип-режим (пробег частоты 6,25—9,57 Гц за сеанс продолжительностью 47 мин): а — расстояние 6,5 км, б, в — расстояние 49 км.

механических колебаний датчика в этом поле, нами применялась упругая подвеска магнитного датчика и размещение его внутри колец Гельмгольца, компенсирующих вертикальную компоненту земного магнитного поля. Наибольший „сейсмомагнитный“ эффект дает компонента внешнего магнитного поля, перпендикулярная продольной оси сердечника датчика индукционного типа. В наших условиях вертикальная компонента геомагнитного поля составляет около 56 000 нТл и заметно превосходит его горизонтальные составляющие. Поэтому ось индукционного датчика располагалась в горизонтальной плоскости, а вертикальная компонента геомагнитного поля компенсировалась с помощью системы колец Гельмгольца. Величина тока компенсации в кольцах подбиралась с помощью чувствительного феррозонда, контролирующего величину поля внутри колец. Изменение амплитуды магнитного сигнала при включении (или выключении) тока компенсации должно свидетельствовать о наличии или отсутствии переменной составляющей магнитного поля при измерениях. Следует отметить, что с приближением пункта регистрации к вибратору подобный некомпенсированный „сейсмомагнитный“ эффект может существенно исказить оценки истинного магнитного поля, возбуждаемого работой сейсмовибратора, особенно в режиме монохроматического излучения. Добавим, что на рис. 8,а приведены данные, полученные с включенной системой компенсации геомагнитного поля. 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. Измерения вертикальной составляющей атмосферного электрического поля в 1997 г. были выполнены с помощью электрометра струнного типа. Из-за его низкой чувствительности возмущения поля регистрировались в монохроматическом режиме только на расстоянии несколько сотен метров от виброисточника (см. рис. 2, 3). Оценка амплитуды этих

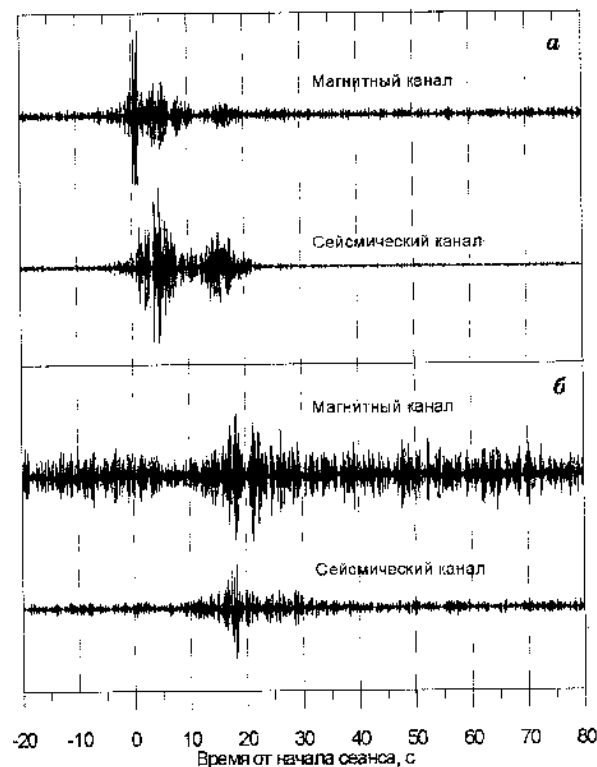


Рис. 8. Корреляционные функции между опорным свип-сигналом и магнитными и сейсмическими сигналами, зарегистрированными во время работы сейсмовибратора ЦВ-100 в свип-режиме.

а — расстояние 4,5 км, пробег частоты 6,25—9,57 Гц за сеанс продолжительностью 47 мин с компенсирующей системой колец Гельмгольца; б — расстояние 49 км, пробег частоты 6,25—9,57 Гц за сеанс продолжительностью 47 мин без системы компенсации геомагнитного поля.

возмущений дает величину менее 1 В/м на расстоянии до 700 м. Из-за сложной структуры полей в ближней зоне сейсмовибратора фазовые измерения оказались неэффективными.

Возмущения электрического поля на частоте сейсмовибратора (полезный сигнал) обнаружены как при работе электромеханических вибраторов, так и вибратора с пневматическим приводом. Последнее указывает на геофизическое происхождение этих возмущений, а не на связь его с работой сейсмовибратора как технического устройства. В то же время отметим, что кроме полезного сигнала на рабочей частоте примерно за одну минуту до выхода сейсмовибратора ЦВ-100 на штатный режим наблюдаются характерные изменения электрического поля в атмосфере, вероятно, связанные с включением силовых установок питания.

В июне 1998 г. измерения электрического поля были выполнены двумя электрометрами в свип-режиме сейсмовибратора ЦВ-100 на расстоянии около 700 м (рис. 9), где также представлены корреляционные функции между опорным сигналом и данными других датчиков. Оба электрометра зарегистрировали единственную моду с практически нулевым запаздыванием. Это позволяет предположить, что возмущения электрического поля не связаны с акустическими или сейсмическими колебаниями в окрестности датчиков, а возбуждаются процессами, происходящими вблизи сейсмовибратора.

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. Прохождение такой акустической волны через область отражения зондирующей ионосферу радиоволны должно приводить к фазовой модуляции последней на частоте вибратора. Поэтому была поставлена задача обнаружения в доплеровском спектре зондирующей ионосферу радиоволны боковых спектральных составляющих на частоте вибратора (см., например, на рис. 5). Поскольку наибольший эффект ожидается на нижних слоях ионосферы, то предпочтение отдавалось случаям отражения радиоволн от *E*-слоя ионосферы (высоты 90—140 км). К сожалению, в ночное время, когда чаще всего работают сейсмовибраторы, отражения от этого слоя на ионограммах отсутствуют (см. рис. 4, а). Они появляются лишь при наличии спорадического слоя *E_s*, который не характеризуется какими-либо регулярными закономерностями. Кроме того, такие его особенности, как частичная прозрачность, независимость действующей высоты

отражения от частоты и т. п., не позволяют предполагать простого характера взаимодействия *E_s*-слоя с акустической волной, приводящего к фазовой модуляции зондирующей радиоволны. Исследования доплеровских спектров показали их сложную структуру в рассматриваемом диапазоне от 0 до 25 Гц, в частности, регулярное наличие отдельных спектральных компонент в диапазоне рабочих частот сейсмовибратора. Другая особенность доплеровского зондирования связана с тем, что ионозонд „Парус“ размещен в 49 км от сейсмовибратора и осуществляет вертикальное зондирование ионосферы. Для обнаружения обсуждаемого сейсмоионосферного эффекта, очевидно, необходимо, чтобы акустическая волна от источника прошла через область ионосферы внутри диаграммы направленности ионозонда. В связи со сказанным, и в силу его слабости эффект трудно обнаружить. Кроме того, из-за

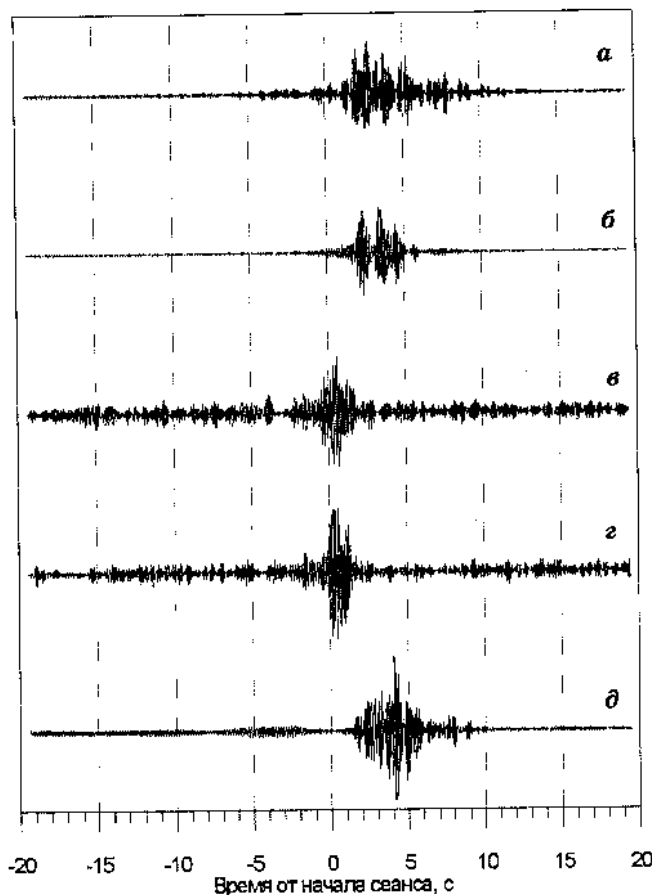


Рис. 9. Корреляционные функции между опорным свип-сигналом и физическими сигналами: сейсмическим (а), акустическим (б), электрическими (в — электрометр с антенной, г — электрометр струнного типа) и магнитным (д).

Сейсмовибратор ЦВ-100, свип-режим (пробег частоты 6,25—9,57 Гц за сеанс продолжительностью 47 мин), расстояние от вибратора около 700 м.

ограниченности единичного доплеровского сеанса временным интервалом 320 с невозможно осуществить длительное накопление полезного сигнала и использовать обработку, которая применялась для данных с других датчиков. Поэтому удобнее вести наблюдения во время свип-сеансов. Как уже указывалось, пример полученных в этом случае данных показан на рис. 5. Используются данные с частотой дискретизации 50 Гц продолжительностью 20 с. Начало доплеровской серии приходится на 9,5 мин позже начала сеанса работы сейсмодвибратора (соответствующее изменение свип-частоты составляет 6,91—6,94 Гц). Радиозондирование проводилось на частоте 1,785 МГц и высоте отражающего ионосферного слоя 140 км. В нижней части рисунка представлены фрагменты доплеровского спектра в диапазоне рабочих частот сейсмодвибратора. Видно, что сигнал превышает уровень шума в диапазоне 6,25—6,30 Гц. Отличие от текущего значения свип-частоты сейсмодвибратора обусловлено временем распространения акустической волны до ионосферы, которое по этим данным составляет около 8—9 мин. Поскольку из-за слабости эффекта результаты, полученные по единичному доплеровскому сеансу, недостаточно надежны, для обнаружения эффекта применялся спектрально-временной анализ.

Последовательные оценки амплитудного доплеровского спектра в координатах „доплеровская частота—время“ представляют собой поверхность, изолинии которой отображают динамику этого спектра. При наличии эффекта, очевидно, должна „прорезаться“ область повышенной спектральной плотности в виде наклонной прямой линии, соответствующей изменению рабочей частоты сейсмодвибратора в ходе сеанса. Наклон этой прямой должен совпадать с наклоном аналогичной линии, полученной по сейсмическим данным, а ее сдвиг по оси времени — отображать время прихода акустической волны от земной поверхности к области отражения зондирующей радиоволны в ионосфере. За весь период измерений нами зарегистрировано всего два таких случая (из трех

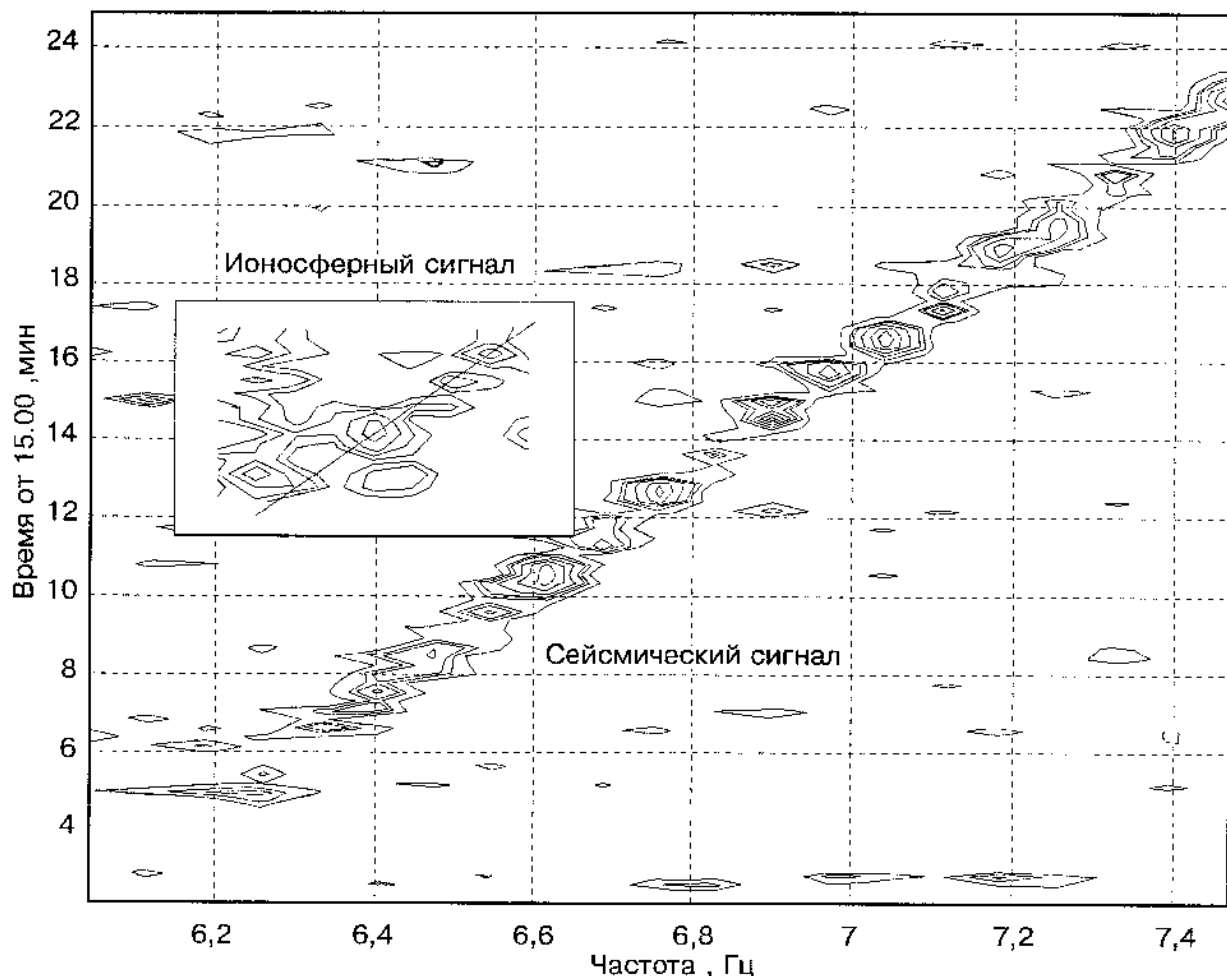


Рис. 10. Примеры свип-сигналов, зарегистрированных вертикальным сейсмометром и цифровым ионозондом „Парус“.

Спектрально-временные диаграммы сейсмических (расстояние 6,5 км) и доплеровских (расстояние 49 км) измерений, построенные в одних и тех же осях. Сейсмодвибратор ЦВ-100, пробег частоты 6,25—9,57 Гц за сеанс продолжительностью 47 мин. Доплеровское радиозондирование проводилось на частоте 1,785 МГц с высоты 140 км.

дневных свип-сеансов ЦВ-100), удовлетворяющих указанным требованиям. Результаты одного из них показаны на рис. 10 (отметим, что доплеровские данные на рис. 5 отражены для этого же случая). По данным, полученным с сейсмического датчика, прямая, характеризующая изменение рабочей частоты сеймовибратора, видна очень хорошо. Аналогичная осредненная прямая, полученная по данным доплеровского зондирования, отображающая наблюдавшееся со временем изменение частоты спектральной составляющей доплеровского спектра, показана в прямоугольной вставке на рис. 10 (в тех же осях, что и сейсмоданные). Наклоны указанных прямых совпадают, а смещение по оси времени оказывается порядка 7 мин, что соответствует вертикальной скорости распространения акустической волны 333 м/с.

ВЫВОДЫ

Измерения с помощью полевого аппаратного комплекса и цифрового ионозонда „Парус“ показали, что мощные сеймовибраторы являются источниками не только сейсмических колебаний, но и акустических, электрических, магнитных и ионосферных возмущений.

В свип-режиме на расстояниях до 50 км от сейсмического источника возмущений был зарегистрирован акустический сигнал, а в ряде случаев и сейсмический сигнал с тем же временем запаздывания. Наблюдаемое явление можно связать: 1) с акустосейсмической 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, 2) с генерацией сеймовибратором различного класса поверхностных волн, которые могут распространяться на границе жидкость — упругое полупространство (в частности, волн Стоули, „вытекающих“ волн и т. п.). Эксперименты с сеймовибраторами показали их важность для понимания природы подобных волновых явлений, наблюдающихся при взрывах („air-blast wave“, „air-coupled Rayleigh wave“). Для детального исследования явлений необходимы дальнейшие измерения временных задержек и скоростей распространения различных мод, амплитудных соотношений и анализ характера затухания волн на различных расстояниях от сеймовибратора. В дальнейшем предполагается привлечение данных о температуре воздуха в приземном слое, атмосферном давлении, влажности, направлении и скорости ветра в этом районе для анализа условий распространения акустического сигнала.

С помощью индукционного магнитного датчика и электрометров двух типов экспериментально установлено существование электромагнитной волны, излучаемой на рабочей частоте мощным сеймовибратором при вибросейсмическом зондировании. Это явление может быть связано с возбуждением токов на частоте сеймовибратора в атмосфере и в литосфере под действием акустической и сейсмической волн.

Экспериментально обнаружено воздействие на ионосферу акустической волны, возбуждаемой при работе мощного сеймовибратора в диапазоне инфразвуковых частот. Оно проявляется в дополнительной фазовой модуляции и изменениях доплеровского спектра зондирующей ионосферу радиоволны на рабочих частотах сеймовибратора. Эффект выявлен в случаях отражения зондирующей радиоволны в дневных условиях от высот *E*-слоя ионосферы, возмущаемой сеймовибратором. Измеренное в свип-режиме среднее время прихода акустической волны на высоты *E*-слоя ионосферы приблизительно равно 7 мин.

Мы благодарим наших коллег за помощь при проведении экспериментов на сеймовибраторах, предоставление аппаратуры и обсуждение полученных результатов: В. С. Селезнева, А. Ф. Еманова и В. Н. Кашуна — директора и сотрудников Геофизической службы СО РАН; Б. М. Глинского, Б. М. Пушного и В. В. Ковалевского — сотрудников ВЦ СО РАН; В. И. Юшина, В. В. Маньковского, Г. В. Егорова и В. М. Носова — сотрудников Института геофизики СО РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 96-05-66055).

ЛИТЕРАТУРА

1. Рикитаке Т. Предсказание землетрясений. М., Мир, 1979, 390 с.
2. Моргунов В. А. Электрические явления, предшествующие Шикотанскому землетрясению и его афтершокам // Докл. РАН, 1998, т. 359, № 1, с. 102—105.
3. Rial J. A., Saltzman N. G., Ling H. Earthquake-induced resonance in sedimentary basins // Amer. Sci., 1992, v. 80, Nov.—Dec., p. 566—578.
4. Кузнецов В. В. Физика земных катастрофических явлений. Новосибирск, Наука, 1992, 95 с.
5. Плоткин В. В. Ионосфера как нагрузка глобальной атмосферной электрической цепи // Изв. вузов. Сер. радиофиз., 1992, т. 35, № 11—12, с. 900—913.
6. Kuznetsov V. V., Plotkin V. V., Izraileva N. I. et al. The investigation of electromagnetic interactions between regions surrounding the Earth // J. Atmos. Terr. Phys., 1995, v. 57, № 13, p. 1639—1660.

7. Suzuki R. K., Yuen P. C., Weaver P. F. Continuous travelling coupling between seismic waves and the ionosphere evident in May 1968 Japan Earthquake Data // *J. Geophys. Res.*, 1969, v. 74, No 9, p. 2256—2264.
8. Ichinose T., Takagi K., Tanaka T. et al. HF Doppler observations of acoustic waves excited by the earthquake // *Middle atmosphere program, Handbook for MAP*, 1982, v. 18, p. 310—318.
9. Липеровский В. А., Похотелов О. А., Шалимов С. Л. Ионосферные предвестники землетрясений. М., Наука, 1992, 304 с.
10. Calais E., Minster J. B. GPS, earthquakes, the ionosphere, and the Space Shuttle // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1998, v. 105, p. 167—181.
11. Re Velle D. O., Whitaker R. W., Armstrong W. T. Infrasonic observations of Bolides on October 4, 1996 // *Characteristics and Consequences of orbital debris and natural space impactors II*. SPIE, San Diego, July 28—Aug. 1, 1997, Pap. LA-UR-972481, 1997, 12 p.
12. Qamar A. Space Shuttle and meteoroid — tracking supersonic objects in the atmosphere with seismographs // *Seism. Res. Lett.*, 1995, v. 66, No 5, p. 6—12.
13. Balachandran N. K., Donn W. L., Rind D. H. Concordant sonic booms as an atmosphere probe // *Science*, 1977, v. 187, No 4298, p. 47—49.
14. Francel M. S., Peterson A. M. Remote temperature profiling in the lower troposphere // *Radio Sci.*, 1976, v. 2, No 3, p. 157—166.
15. Blanc E. Observations in the upper atmosphere of infrasonic waves from natural or artificial sources: a summary // *Ann. Geophys.*, 1985, v. 3, p. 673—688.
16. Jacobson A. R., Carlos R. C., Argo P. E., Rickel D. G. Radio wave diffraction during the passage of an acoustic shock through a sporadic E layer // *Radio Sci.*, 1986, v. 21, No 4, p. 752—760.
17. Blanc E., Rickel D. Nonlinear wave fronts and ionospheric irregularities observed by HF sounding over a powerful acoustic source // *Radio Sci.*, 1989, v. 24, No 3, p. 279—288.
18. Calais E., Minster J. B., Hofton M. A., Hedlin M. A. H. Ionospheric signature of surface mine blasts from Global Positioning System measurements // *Geophys. J. Int.*, 1998, v. 132, p. 191—202.
19. Kitov I. O., Murphy J. R., Kusnetsov O. P. et al. An analysis of seismic and acoustic signals measured from a series of atmospheric and near-surface explosions // *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 1997, v. 87, p. 1553—1562.
20. Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А. Сейсмоэлектромагнитные явления. М., Наука, 1988, 174 с.
21. Сидорин Л. Я. Предвестники землетрясений. М., Наука, 1992, 192 с.
22. Iyemori T., Kamei T., Tanaka Y. et al. Co-seismic geomagnetic variations observed at the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake // *J. Geomag. Geoelectr.*, 1996, v. 48, p. 1059—1070.
23. Sweeney J. J. Low-frequency electromagnetic measurements as a zero-time discriminant of nuclear and chemical explosions — OSI research final report: Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, report UCRL-ID-126780, December, 1996, 23 p.
24. Yamada I., Masuda K., Mizutani H. Electromagnetic and acoustic emission associated with rock failure // *Phys. Earth Planet. Int.*, 1989, v. 57, p. 157—168.
25. Tomizava I., Yamada I. Generation mechanism of electric impulses observed in explosion seismic experiments // *J. Geomag. Geoelectr.*, 1995, v. 47, p. 313—324.
26. Adushkin V. V., Soloviev S. P. Generation of low-frequency electric fields by explosion crater formation // *J. Geophys. Res.*, 1996, v. 101, p. 20165—20173.
27. Алексеев А. С., Глинский Б. М., Ковалевский В. В., Пушной Б. М. Вибросейсмические источники для глобальной томографии Земли // *Тр. ВЦ СО РАН. Мат. модел. в геофизике*, вып. 4. Новосибирск, 1996, с. 18—29.
28. Алексеев А. С., Глинский Б. М., Дряхлов С. И. и др. Эффект акустосейсмической индукции при вибросейсмическом зондировании // *Докл. РАН*, 1996, т. 346, No 5, с. 664—667.
29. Глинский Б. М., Ивакин А. Н., Ковалевский В. В. и др. Изучение сейсмоакустических эффектов, возникающих при вибровоздействии на среду // *Развитие методов и средств экспериментальной геофизики*, 1996, вып. 2, с. 226—234.
30. Алексеев А. С., Глинский Б. М., Еманов А. Ф. и др. Изучение структуры Алтай-Саянского региона с использованием вибросейсмических мощных источников // *Тр. ВЦ СО РАН. Математическое моделирование в геофизике*, вып. 4. Новосибирск, 1996, с. 3—17.
31. Ковалевский В. В. Моделирование процесса акустосейсмической индукции // *Тр. ВЦ СО РАН. Математическое моделирование в геофизике*, вып. 3. Новосибирск, 1994, с. 12—18.
32. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М., Наука, 1973, 348 с.
33. Stonely R. Elastic waves at the surface of separation of two solids // *Proc. Roy. Soc. London, A*, 1924, v. 106, p. 416.
34. Фельзен Л. Квазиоптические методы в дифракции // *Квантовая теория света*, 1966, 237 с. (Тр. симпозиума).

35. Gupta I. N., Hartenberger R. A. Seismic phases and scalling associated with small high-explosive surface shots // Bull. Seism. Soc. Amer., 1981, v. 71, № 6, p. 1731—1741.
36. Глинский Б. М., Ковалевский В. В., Хайретдинов М. С. Взаимосвязь волновых полей мощных вибраторов с атмосферными и геодинамическими процессами // Геология и геофизика, 1999, т. 40, № 3, с. 431—441.

*Поступила в редакцию
7 июля 1998 г.*