

УДК 534:621.382

DOI: 10.25206/978-5-8149-3453-6-2022-15-22

СЕЙСМИЧЕСКИЕ ВИБРАТОРЫ В ИЗУЧЕНИИ МЕЖВОЛНОВЫХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ

SEISMIC VIBRATORS IN THE STUDY OF INTERWAVE INTERACTIONS

М. С. Хайретдинов^{1,2}, В. В. Ковалевский¹

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

M. S. Khairtdinov^{1,2}, V. V. Kovalevsky¹

¹Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Аннотация. Проблема изучения взаимодействий разных геофизических полей весьма актуальна в плане предсказания геоэкологических рисков, обусловленных экологически опасными техногенными и природными событиями – землетрясениями, мощными полигонными и карьерными взрывами, транспортными шумами и др. Проблема взаимодействия полей авторами рассматривается как оптимизационная, с целью выделения определяющих факторов в проблеме взаимной трансформации геофизических полей. Авторами предложен и исследован вибрационный метод изучения проблемы взаимодействия геофизических полей разной природы - сейсмических, акустических, гидроакустических, метеорологических. Благодаря высоким метрологическим и экологическим характеристикам сейсмических вибраторов достигаются высокие точность и повторяемость результатов исследований в рассматриваемой области, а также их высокая экологичность в сравнении с традиционными взрывами. Результаты исследований обосновываются теоретически и экспериментально.

Abstract. The problem of studying the interactions of different geophysical fields is very relevant in terms of predicting geoeological risks caused by environmentally hazardous man-made and natural events - earthquakes, powerful landfill and quarry explosions, transport noise, etc. The problem of interaction of fields by the authors is considered as optimizing in order to identify determining factors in the problem of mutual transformation of geophysical fields. The authors proposed and investigated the vibration method of studying the problem of interaction of geophysical fields of different nature-seismic, acoustic, hydroacoustic, meteorological. Due to the high metrological and ecological characteristics of seismic vibrators, high accuracy and repeatability of research results in this area, as well as their high environmental friendliness in comparison with traditional explosions, are achieved. The results of the studies are substantiated theoretically and experimentally.

Ключевые слова: смежные среды, межволновые взаимодействия, вибрационный метод, сейсмические вибраторы, экспериментальные исследования, пространственная фокусировка, оз. Байкал, сейсмо-гидро-акустические взаимодействия.

Key words: adjacent media, inter-wave interactions, vibration method, seismic vibrators, experimental studies, spatial focusing, Lake Baikal, seismic-hydro-acoustic interactions.

I. ВВЕДЕНИЕ

Задача о межволновых взаимодействиях означает преобразование энергии волн одной природы в энергию волн другой природы при определенных условиях, накладываемых на распространение волн, и граничных условиях между сопряженными средами. Примерами таких взаимодействий в геофизике являются акусто-

сейсмические [1], сейсмо - гравитационные [2], акусто - оптические [3], сейсмо - гидроакустические [4]. В результате этого взаимодействия упругая волна

$$\frac{1}{c_1^2} \frac{\partial^2 p_1}{\partial t^2} - \Delta p_1 = 0, \quad (1)$$

распространяясь в среде 1, может индуцировать волну через граничный переход в смежной среде 2, описываемую ее характеристиками:

$$\frac{1}{c_2^2} \frac{\partial^2 p_2}{\partial t^2} - \Delta p_2 = 0, \quad (2)$$

Здесь $p_1(z,x,t)$, $p_2(z,x,t)$ – векторы давления в соседних средах 1 и 2, c_1 и c_2 – скорости распространения волн соответственно

Такие взаимодействия сопровождают многие крупные природные и техногенные процессы (землетрясения, вулканические извержения, промышленные и полигонные взрывы и др.) с образованием сопряженных геофизических процессов в различных средах - земле, атмосфере, в воде. Изучение природы взаимодействий между такими процессами имеет не только теоретический, но и практический интерес, в первую очередь, с точки зрения возникающих геоэкологических рисков, которые несут указанные процессы и взаимодействия между ними. В работе рассматривается предлагаемый авторами метод вибрационного зондирования различных сред с помощью сейсмических вибраторов, разработанных по программе «Вибрационное зондирование Земли» организациями Сибирского отделения РАН [5]. На основе такого типа источников, обладающих высокой метрологической точностью силовых и фазо - частотно - временных характеристик возможно построение вибрационных технологий для решения задач активного геофизического мониторинга окружающей природной среды [6, 7]. Проведение подобных работ с применением вибрационного метода соответствует требованиям высокой повторяемости результатов экспериментов и экологичности проведения работ.

Важное достоинство сейсмических вибраторов состоит в том, что синхронно с сейсмическими колебаниями они способны излучать низкочастотные акустические колебания в атмосферу, что открывает возможности изучения природы акусто - сейсмических взаимодействий.

Полная мощность инфразвукового излучения акустических колебаний вибратора в атмосферу W^a ориентировочно может быть оценена для случая, когда скорость акустической волны c_a равна скорости поперечной сейсмической волны v_s , т.е. $c_a = v_s$, а скорость продольной волны составляет $v_p = \sqrt{3}v_s$. С учетом этого акустическая мощность излучения в атмосферу и сейсмическая мощность излучения W^p в землю соответственно составят [8]

$$W^a = \frac{3.16 \cdot \rho_a F^2 \omega^2}{\pi \rho^2 v_p^3}, \quad W^p = 0.085 \frac{F^2 \omega^2}{\pi \rho v_p^3}. \quad (3)$$

Здесь ρ_a , ρ – плотность воздуха и грунта под источником; F – возмущающая сила источника, ω – частота излучения, v_p – скорость продольных волн. Из сравнения приведенных соотношений следует, что $W^a/W^p \sim 0.02$. Так например, если $F=100$ т, $f=10$ Гц, $\rho_a = 1$ кг/м³, $\rho = 2000$ кг/м³, $c_a=340$ м/с, $v_p = \sqrt{3}c_a = 590$ м/с, тогда $W^a=1500$ вт, $W^p=30$ вт. Несмотря на значительную разницу в соотношении излучаемых мощностей акустические колебания от вибратора при определенных метеоусловиях могут распространяться и регистрироваться на значительных удалениях от источника. Это объясняется тем, что акустические волны в атмосфере затухают в меньшей степени в сравнении с сейсмическими волнами в земле, обладающей более выраженной неоднородностью геологического строения. С другой стороны, благодаря высоким метрологическим характеристикам излучения вибрационных колебаний открываются возможности их синхронного накопления на фоне шумов, в частности, методами взаимокорреляционной свертки [9].

Дальнему приземному распространению акустических волн способствует ряд благоприятных атмосферных факторов, входящих в уравнение акустического давления:

$$p = \rho / \gamma (331 + 0.6t + 0.07e + w_0 \cos \varphi)^2. \quad (4)$$

Здесь t, e – температура и влажность воздуха соответственно, w_0 – скорость ветра, φ – угол между направлением фронта распространения акустической волны и направлением ветра, ρ_a – плотность воздуха, $\gamma = C_p/C_v$ – коэффициент, характеризующий отношение теплоемкостей среды при постоянных давлении (C_p) и при объеме (C_v). Как следует из уравнения (4) благоприятными факторами являются совпадения направлений фронта акустической волны и ветра, повышенные температура и влажность.

II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для характеристики эффекта преобразования волновых полей вводится количественный фактор в виде энергетического критерия:

$$\gamma = \frac{\int_0^T p_1^2(z, x, t) dt}{\int_0^T p_2^2(z, x, t) dt} \quad (5)$$

В этом случае задача оптимизации межволнового преобразования сводится к нахождению условий, максимизирующих критерий (5). В данной работе эти вопросы будут рассмотрены с применением вибрационного метода зондирования смежных сред по отношению к сейсмо-акусто-гидроакустическим полям.

III. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

С учетом влияния метеофакторов акустическое давление как функция расстояний и поглощения в атмосфере может быть представлено в виде многофакторной модели интегрального давления, описываемого уравнением энергетического баланса:

$$P_{\Sigma}(t, f, r) = P_v(f) + P_1(r) + P_2(e, \tau, \omega, \varphi) + P_3(1/r) \quad (6)$$

Здесь $P_{\Sigma}(t, f, r)$ – давление в точке регистрации на удалении r от источника; $P_v(f)$ – частотно зависимое акустическое давление, развиваемое источником; $P_1(r)$ – поглощение инфразвука по расстоянию, определяемое неоднородностью атмосферы и покровом дневной поверхности Земли; $P_2(e, \tau, \omega, \varphi)$ – давление в пункте регистрации как функция метеопараметров: относительной влажности, температуры, скорости и направления ветра, угла φ между направлением ветра и волновым фронтом от источника; $P_3(1/r)$ – давление как результат сферической расходимости волнового фронта.

Метеозависимые факторы распространения акустических волн (4) обуславливают развитие практически важного явления пространственной фокусировки акустических колебаний в атмосфере как результата акусто-метеорологического взаимодействия, определяющим в котором является направление и скорость ветра. Описывается такое явление с помощью фактора фокусировки [10], равного отношению интенсивности инфразвука в неоднородной движущейся среде к интенсивности его в безграничной неподвижной среде:

$$f = I[z, \theta, \varphi] / I_0, \quad (7)$$

где сферические углы θ (зенитный угол) и φ (азимут) характеризуют начальное направление луча от источника по отношению к вертикальной координате z и горизонтальной оси x соответственно. При этом направление последней совпадает с направлением ветра. Ниже приводятся результаты экспериментов по оцениванию фактора фокусировки и межволновым взаимодействиям.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экспериментальное оценивание явления пространственной фокусировки с использованием вибрационного метода авторами выполняется с применением расстановки сейсмоакустических датчиков по окружности с радиусом 12 км и вибратора как источника сейсмических и акустических волн, расположенного в центре круга. (рис. 1). На рисунке направление и сила ветра показаны стрелкой и равны в данном случае 2–4 м/с. На рисунок наложены записи сейсмических и акустических волн, регистрируемых от вибратора типа ЦВ-40. Как следует из рис. 1 акустические волны (вторичные волны на записях) хорошо выражены с подветренной стороны на датчиках 4, 5, 6, 7, что соответствует условию совпадения направлений ветра и фронта распространения акустической волны. И, наоборот, на датчиках с наветренной стороны вторичные акустические волны отсутствуют. Соответственно выполненному эксперименту получены теоретический и экспериментальный графики фактора фокусировки (6), представленные на рис. 2.

Максимумы приведенных зависимостей на рис. 2 соответствуют случаям совпадения направлений фронта распространения волны и ветра и, в конечном итоге, характеризуют направление главного удара инфразвуковой волны на окружающие объекты. Как следует из результатов экспериментов соотношение максимумов и минимумов фактора фокусировки может достигать 50 раз. С учетом приведенного перераспределения акустического давления по пространству следует важный вывод, что воздействие инфразвука даже от маломощных источников, тем более взрывов может становится экологически опасным вследствие многократного увеличения потока энергии в определенном направлении.

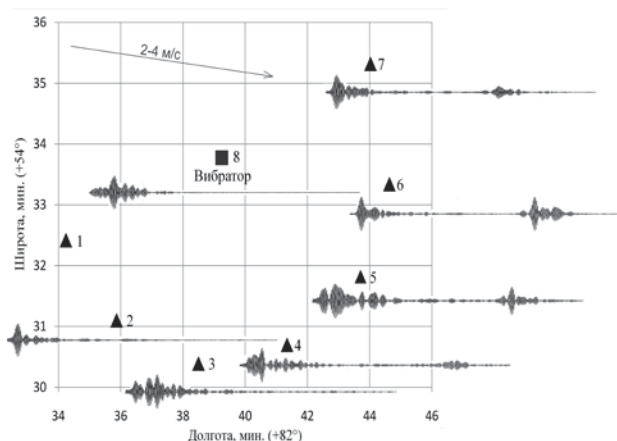


Рис. 1. Схема расстановки сейсмостанций с трехкомпонентными датчиками, расположенными по окружности радиусом 12 км. Приведены вибрационные кореллограммы, иллюстрирующие вступление сейсмических (первичных) и акустических (вторичных) волн. Стрелкой показано направление ветра

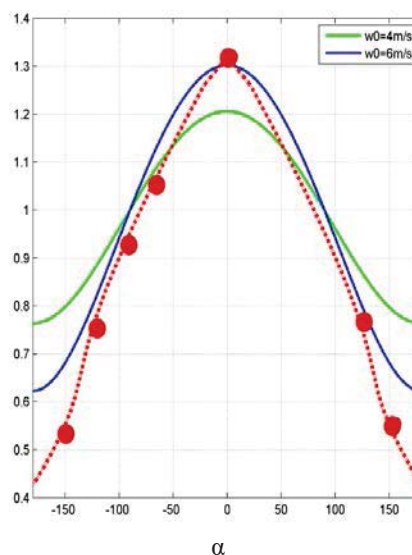


Рис. 2. Зависимость фактора фокусировки f от азимута α точки наблюдения: Расчетные графики для радиуса круговой расстановки датчиков с радиусом 12 км и скоростей ветра 6 м/с (кривая синего цвета) и 4 м/с (кривая зеленого цвета). Красный точечный график – экспериментально полученный для той же расстановки, скорость ветра 4-6 м/с.

Дальнему распространению акустических волн на большие расстояния способствует явление отражения акустических волн от верхних слоев атмосферы. Соответственно на рис. 3 приводятся результаты теории и практики распространения акустических волн: а) теоретически рассчитанные траектории инфразвуковых волн, построенные с учетом эффектов отражения для условий атмосферы, близких по времени к экспериментально выполненным сеансам вибрационного зондирования на линейном профиле протяженностью 100 км [11]; б) результаты экспериментов по выделению сейсмических и акустических волн от сейсмического вибратора ЦВ-40 на удалениях 0,2, 10, 48, 90 км.

Как следует из расчетов, уверенная регистрация отраженных акустических волн может происходить на дальностях в районах 50 и 100 км от источника. Результаты экспериментов подтверждают прогнозные теоретические данные по дальности приемов слабых сейсмоакустических колебаний на фоне многократно превосходящих шумов, выполненных с помощью взаимокорреляционной свертки продолжительных во времени сейсмических и акустических колебаний от центробежного вибратора ЦВ-40 (рис.3в) на линейном профиле протяженностью 100 км. Важный вывод здесь состоит в том, что доказана принципиальная возможность регистрации слабых акустических волн на больших дальностях в режиме одновременного вибрационного зондирования двух сред-атмосферы и земли.

Обработка данных вибрационного зондирования базируется на взаимокорреляционной свертке входных сигналов и опорного сигнала, где в качестве последнего используется сигнал, повторяющий по форме зондирующий сигнал вибратора в диапазоне частот 6.25-11.23 Гц. На рис. 3б представлены результаты свертки для удалений 0,2, 10, 48, 90 км. Расстояния помечены слева от рисунка. Здесь видны результаты приема акустических волн (помечены символом «а» слева от записей); на удалении 48 км каналы трехкомпонентного сейсмического датчика x, y, z на времени 8.27с иллюстрируют вступления продольных сейсмических волн, а на времени 146 с – акустических волн.

Изучение межволновых взаимодействий в районе оз. Байкал. Цель теоретических и экспериментальных исследований определяется как изучение закономерностей распространения и взаимосвязи геофизических волновых полей на протяженных смешанных трассах «земля-вода-атмосфера-ледяной покров Байкала». Для такой комплексной постановки задачи исследования отличаются как новизной, так и фундаментальностью и практической значимостью.

Постановка работ привязана к району озера Байкал в силу двух основных факторов. Во-первых, благодаря детальной изученности геолого-геофизического строения района озера – Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) [12]. Это позволяет выполнять уточненное численное моделирование сейсмофизических процессов распространения волн.

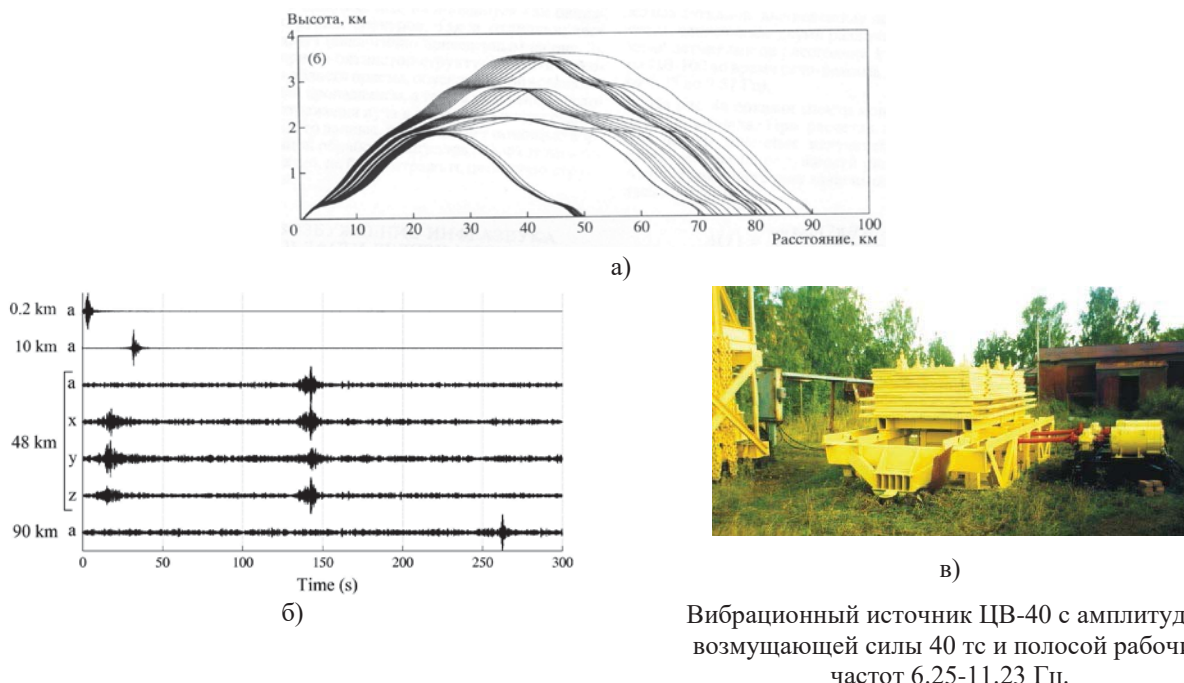


Рис. 3. а) расчетные траектории инфразвуковых волн, б) результаты экспериментов по выделению сейсмических и акустических волн от сейсмического вибратора ЦВ-40 на удалениях 0,2, 10, 48, 90 км: символ «а» слева от записей соответствует акустическим волнам; символы x, y, z – компоненты сейсмического датчика, представляющие сейсмические волны на времени вступления 8.27 с и акустические волны на времени вступления 146 с. Соответствующие расстояния указаны слева от графиков

Во-вторых, на берегу Байкала в районе села Бабушкин располагается уникальный инфранизкочастотный вибрационный источник сейсмических и акустических колебаний-ЦВО-100. Источник развивает возмущающую силу 100 тс в диапазоне частот 6.25-10.05 Гц и является источником колебаний с высокой метрологической точностью. Это позволяет реализовать алгоритмы накопления колебаний нанометрового уровня. Соединение обоих факторов способствует согласию результатов теории и эксперимента с повышенной точностью

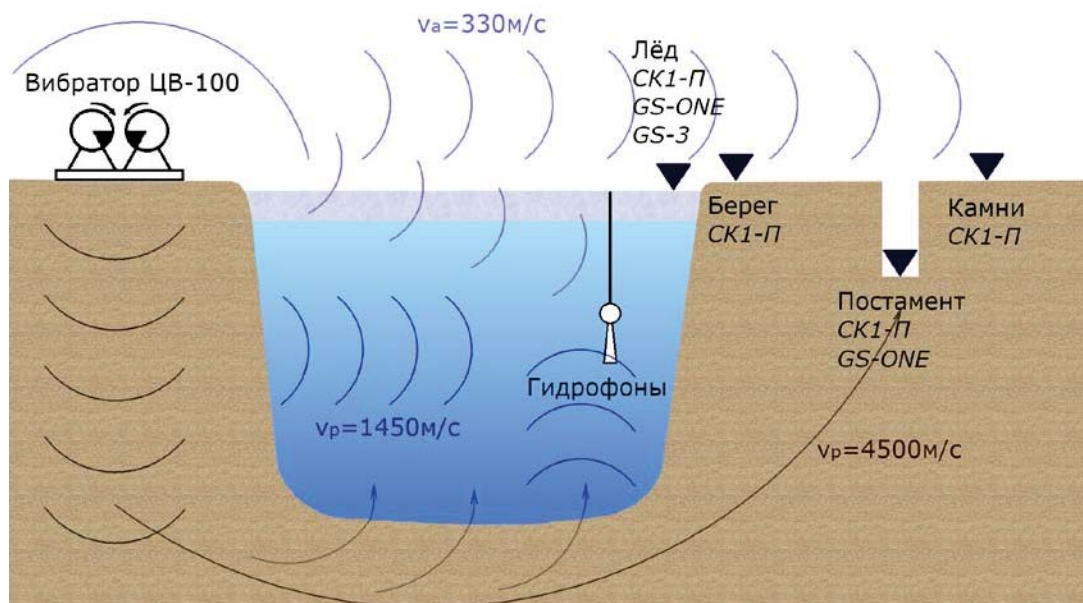


Рис. 4. Схема проведения экспериментов на Байкале по вибрационному просвечиванию сопряженных сред «земля-вода-лед-атмосфера. Представлены сейсмический вибратор ЦВ-100 с возмущающей силой 100 тс в диапазоне частот 6.25-10.05 Гц; СК-1П, GS-3, GS-ONE-сейсмические трехкомпонентные датчики, гидрофоны-датчики гидроакустических колебаний, «постамент» – сейсмическая обсерватория на глубине 3 м; «лед», «берег», «камни», «гидрофоны» – наименование мест установки датчиков

Максимальная протяженность зондируемой трассы составила 86 км. Регистрация колебаний осуществлялась одновременно в 4-х средах: в земле с помощью сейсмоприемников, в воде с помощью гидрофонов, в атмосфере с помощью датчиков давления и сейсмоприемников, на льду – с помощью сейсмоприемников. На рис. 4 приводится схема, иллюстрирующая состав технических средств «излучения-приема» геоакустических колебаний, излучаемые геоакустические поля и процессы их взаимодействия. В качестве излучателя геоакустических колебаний применяется сейсмический вибратор ЦВО-100. Параллельная и одновременная регистрация колебаний от него производится в 7-ми пространственно-разнесенных точках линейного профиля (рис. 3). Изучение структуры волн в пунктах регистрации осуществляется в режиме вибрационного зондирования смежных сред «земля-вода-атмосфера-лед» с помощью широкополосных колебаний, в данном случае свип-сигналов в диапазоне частот 6.25-10.05 Гц. Компактные во времени волны на сейсмограммах получаются как результат кросскорреляционной свертки длинных зондирующих сигналов длительностью 3480 с с опорным сигналом, повторяющим по форме излучаемый сигнал.

Для достижения высокой статистической значимости получаемых результатов картина волн формируется в режиме повторяющихся сеансов вибрационного зондирования. Получаемая при этом типичная структура волн представлена на рис. 5. Распространение волн в Земле отражено виде первичной сейсмической волны со временем первого вступления 16.9 с, в атмосфере-акустической волны со временем вступления 262 с (верхняя часть рисунка).

Картина волнового поля в воде (нижняя часть рисунка) получена с гидрофона, опущенного со льда на глубину 20 м и удаленного от источника на расстояние 83.96 км. Здесь картина гидроакустических волн имеет существенно сложный характер вследствие выраженности эффектов переотражений при распространении волн в воде с границами «дно-лед».

Один из принципиальных выводов здесь состоит в том, что в воде присутствуют скоростные (продольные) гидроакустические волны со скоростями распространения сейсмических волн в земле – около 5.35 км/с. Очевидно, что такая волна распространяется в направлении «дно-вода» (рис. 2) и ее наличие подтверждает теоретическое заключение о сейсмо-гидроакустической трансформации волн, имеющей важное значение для морской сейсморазведки с помощью мощных береговых источников. Основное достоинство их связано с возможностями увеличения глубинности разведки.

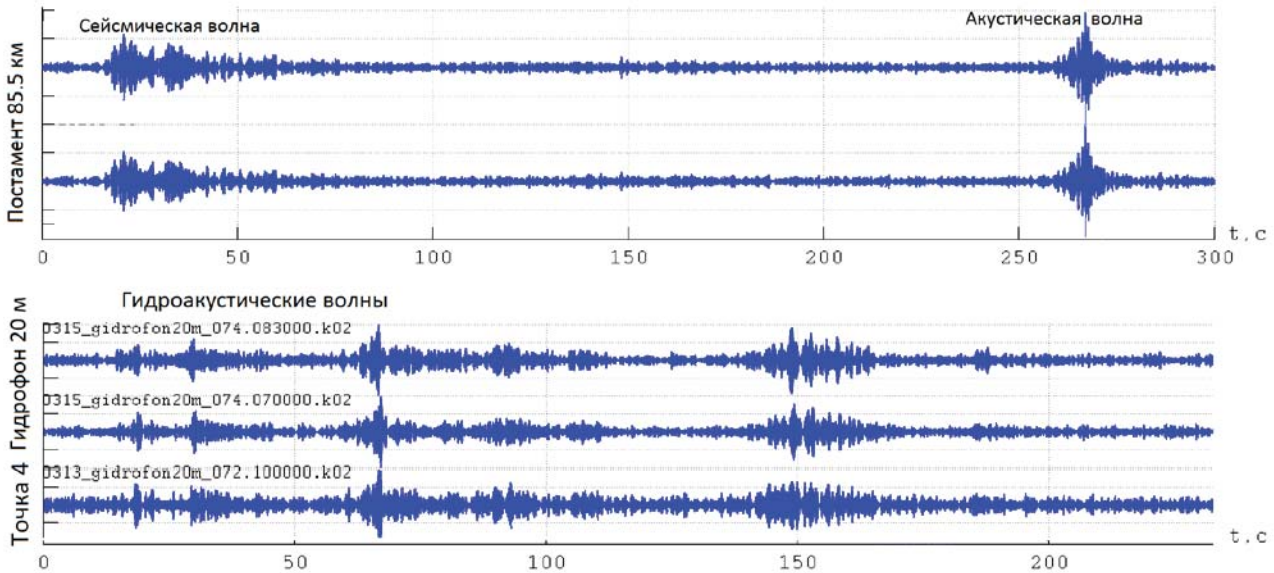


Рис. 5. Структура вибрационных волн как результат зондирования зоны оз. Байкал: на удалении от вибратора 85.5 км. В верхней части рисунка представлены первичные сейсмические волны со временем вступления 16.9 с и вторичные акустические волны со временем вступления 262 с

Дополнительно на больших временах вступлений регистрируется водная волна, образующаяся как результат трансформации сейсмической волны на границе «берег-вода» в районе расположения берегового вибрационного источника. Для нее измеренная скорость распространения в данном случае составляет 1250 м/с

Наряду с рассмотренными в структуре гидроакустических волн присутствуют другие волны (рис. 5), наличие которых обусловлено процессами переотражений волн при распространении их в подводном звуковом канале. Приповерхностный звуковой канал, впервые открытый в океане Л.М. Бреховских, получает наиболее полное развитие при образовании ледяного покрова (январь–апрель). При наличии льда выше и ниже оси звукового канала (у нижней поверхности льда) создаются благоприятные условия для фокусировки звуковых лучей, с одной стороны, за счет льда, с другой – за счет 200-метрового слоя воды с вертикальными перепадами скорости звука порядка 10–16 м/сек на 100 м, что намного лучше, чем в летний период. Зимний приповерхностный подводный звуковой канал гораздо эффективнее летнего.

Результаты регистрации упругих колебаний на льду показали, что в среде с сильно выраженной трещиноватостью, что характерно для Байкальского льда в весенний период, многократно усиливаются процессы поглощения упругих колебаний и выраженные волны в среде от вибратора типа ЦВО-100 получить не удастся.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен и рассмотрен вибросейсмический метод с использованием метрологически точных низкочастотных сейсмических и акустических колебаний мощных вибраторов в проблеме изучения взаимодействий геофизических полей разной природы. Высокие точность и повторяемость результатов исследований, заложенные в основе метода, проиллюстрированы на примере изучения проблемы акусто-сейсмо-гидроакустических полей в эксперимен-

тах на Байкале с применением сейсмического вибратора ЦВО-100, в Новосибирской области с использованием сейсмического вибратора ЦВ-40. Полученные в экспериментах результаты характеризуются фундаментальностью в изучении процессов межволновых взаимодействий, новизной и практической значимостью для решения экологических задач, активного мониторинга смежных сред «земля-атмосфера-вода» и др.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 20-07-00861, гос. задания № 0251_22_0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А. С., Глинский Б. М., Дряхлов С. И., Ковалевский В. В., Михайленко Б. Г., Пушной Б. М., Фатьянов А. Г., Хайретдинов М. С., Шорохов М. Н. Эффект акустосейсмической индукции при вибросейсмическом зондировании // Докл. РАН. 1996. Т. 346, № 5. С. 664–667.
2. Глинский Б. М., Ковалевский В. В., Хайретдинов М. С. Взаимосвязь волновых полей мощных вибраторов с атмосферными и гидродинамическими процессами // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 3. С. 431–441.
3. Khairetdinov M. S., Poller V. V., Borisov B. D., Britvin A. V. Acoustooptical Interaction on Infrasound in Problems of Laser Ecological Monitoring // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2020. Vol. 56(6). P. 634–641.
4. Бреховских Л. М., Лысанов Ю. П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 263 с.
5. Алексеев А. С., Глинский Б. М., Ковалевский В. В., Хайретдинов М. С., Чичинин И. С. [и др.]. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Издательство СО РАН «Гео», Новосибирск, 2004. 387 с.
6. Алексеев А. С., Глинский Б. М., Ковалевский В. В., Хайретдинов М. С. Активные методы сейсмических исследований с мощными вибрационными источниками. Сб. Современные проблемы сейсмологии. М.: Изд. Вузовская книга. 2000. С. 1–20.
7. Хайретдинов М. С., Ковалевский В. В., Воскобойникова Г. М., Седухина Г. Ф. Оценивание метеозависимых геологических рисков от взрывов с помощью сейсмических вибраторов // Технологии сейсморазведки. 2016. № 3. С. 132–138.
8. Заславский Ю. М. Излучение сейсмических волн вибрационными источниками. Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 2007. 200 с.
9. Khairetdinov M. S., Sedukhina G. F. Economical sequential algorithmic convolutions in problems of active vibroseismoacoustic monitoring // Proc. of Intern. Multi-Conf. on Engineering, Computer and Information Sciences, SIBIRCON-2017. 2017. P. 97–100.
10. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
11. Гуляев В. Т., Кузнецов В. В., Плоткин В. В., Хомутов С. Ю. Генерация и распространение инфразвука в атмосфере при работе мощных сейсмодвибраторов // Изв. АН СССР: Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37, № 3. С. 303–312.
12. Беяшев А. В., Тубанов Ц. А. Подбор скоростных моделей для локализации сейсмических событий в пределах Байкальской рифтовой зоны // Геофизические технологии. 2021. № 1. С. 38–51.