

Вибрационные волны в системе «литосфера-атмосфера-гидросфера»

М.С. Хайретдинов, В. Ковалевский В.В, Михайлов А.А., Шиманская Г.М.

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирский государственный технический университет
г. Новосибирск*



VIBRATION WAVES IN THE SYSTEM « LITHOSPHERE-ATMOSPHERE-HYDROSPHERE »

*M.S. Khairtdiinov, V.V. Kovalevsky, Mihailov A. A., G. M. Shimanskay
Institute of computational mathematics and mathematical geophysics SB RAS
Novosibirsk state technical university*

Всероссийская конференция с международным участием «Обработка пространственных данных в задачах мониторинга природных и антропогенных процессов» (SDM-2023). 22.08-25.08, 2023

г. Бердск, Новосибирская область, Россия

- Вибрационный метод активного мониторинга БРЗ.
- Численное моделирование волновых полей.
- Синтезированные волновые поля и волны.
- Результаты экспериментальных исследований, выполненных ИФЗ РАН-ИВМиМГ СО РАН-ГИН СО РАН в районе юго-восточной -северо-западной части Байкала.
- Акустические волны в атмосфере.
- Гидроакустические волны в оз.Байкал
- Закономерности строения структуры волновых полей и их основные характеристики;
- Прикладные аспекты исследований в интересах районов Северной Арктики

Цель исследований:

- ▶ Изучение фундаментальных процессов распространения и взаимодействия геофизических полей в смежных средах «земля-вода- атмосфера-лед»
- ▶ Анализ результатов экспериментальных исследований в районе юго-восточной-северо-западной части оз.Байкал численными и экспериментальными методами:

Раскрытие механизмов взаимодействия смежных геофизических полей является одной из ключевых задач в проблеме геоэкологии окружающей среды.

Сейсмические процессы в земле включены в цепи литосферно-планетарных, литосферно-атмосферных, литосферно-гидросферных связей.

С учетом этого соответственно рассматриваются взаимодействия полей сейсмо-гравитационные [4], сейсмо-акустические [5-8], сейсмо-гидроакустические [3].

Наряду с ними представляет интерес изучение сейсмо-электрических [], сейсмо-магнитных [] взаимодействий в земле.

Многие сейсмические источники искусственного и природного происхождения (всевозможные взрывы, сейсмические вибраторы, транспорт, землетрясения и др.) обладают двойственностью в порождении одновременно сейсмических колебаний в земле и акустических в атмосфере.

Двойственность формирования смежных волновых полей от наземных источников

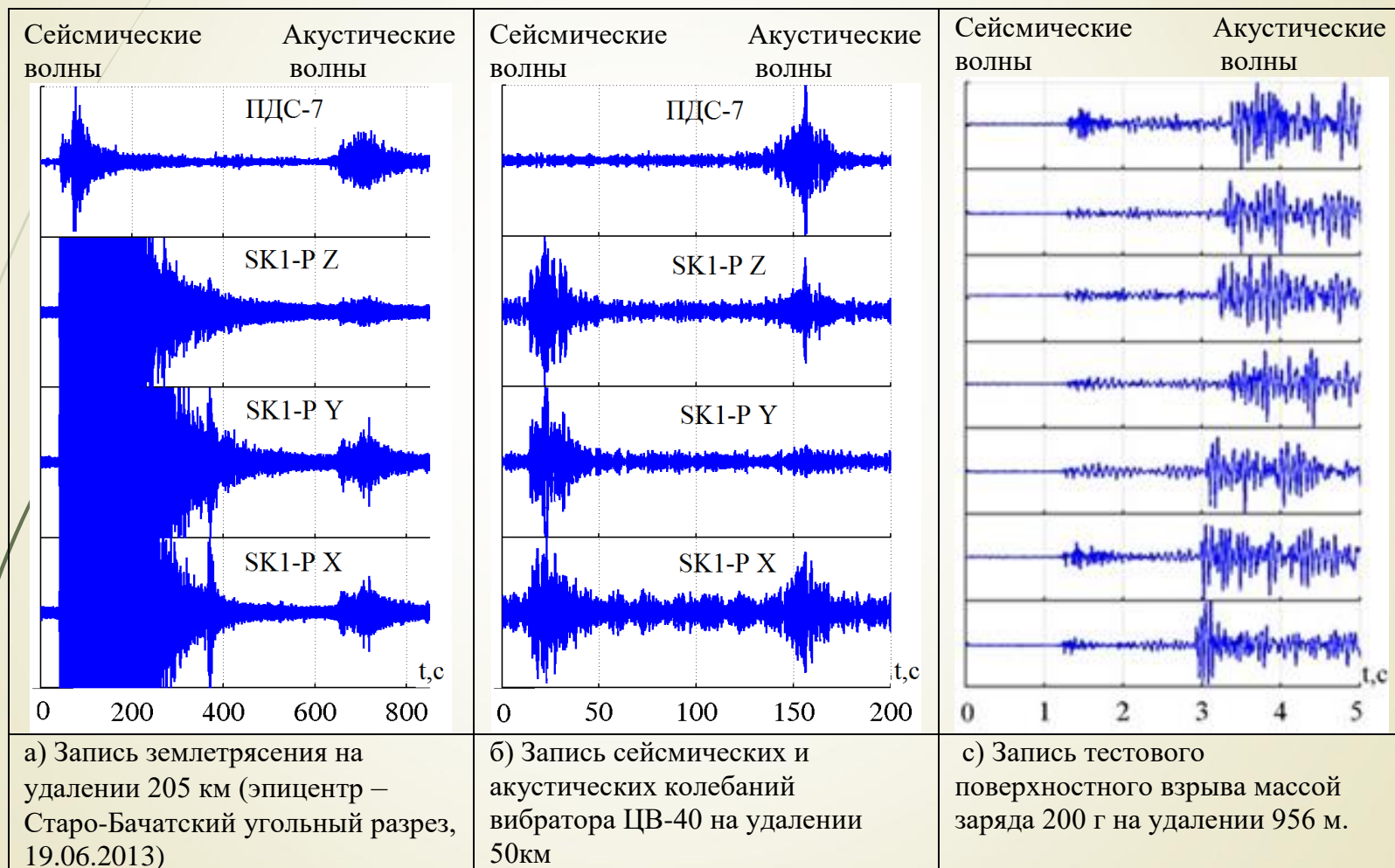


Рис. 1. Записи сейсмических и акустических волн от разного класса источников.

Вибратор и волновые поля в Байкальской рифтовой зоне

(обусловленность работ по численному моделированию)

6

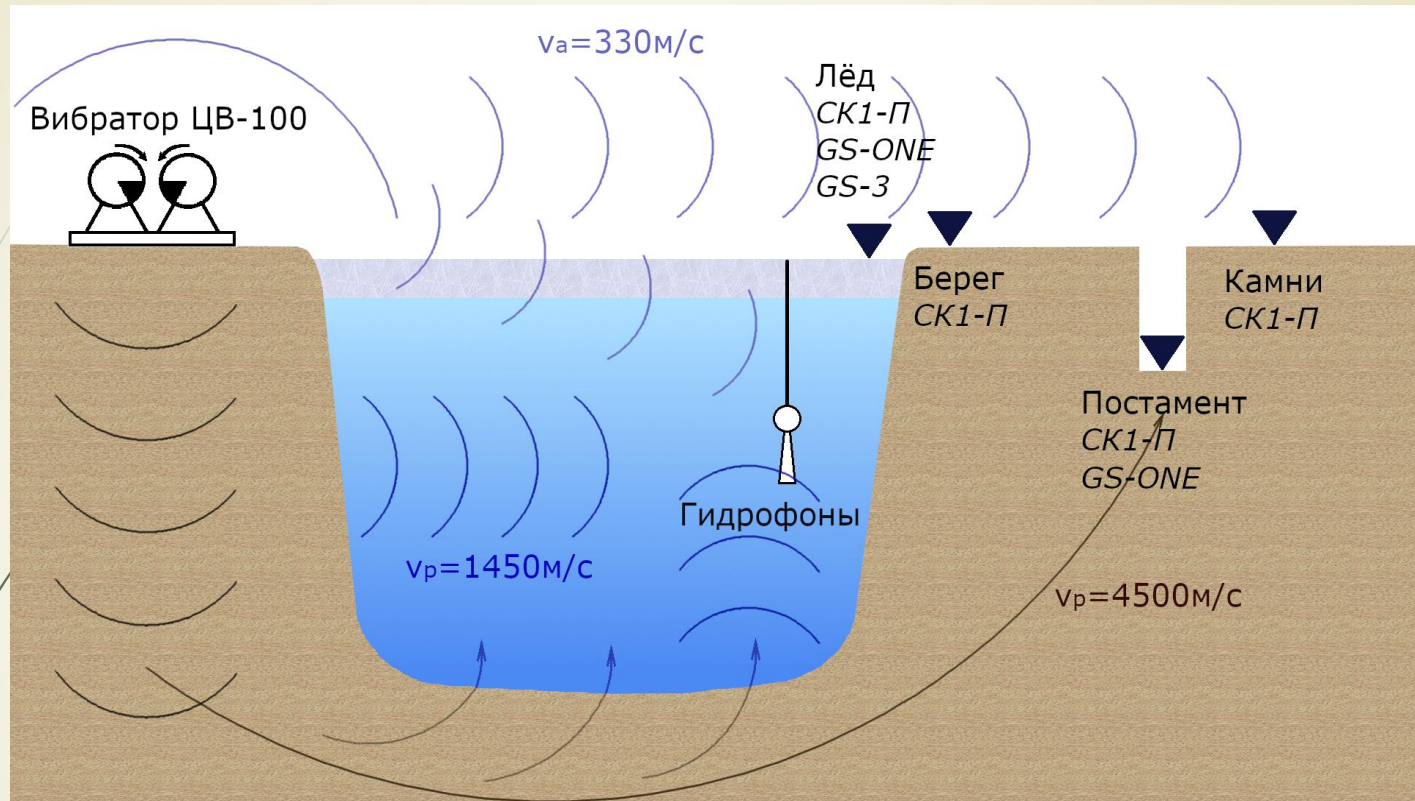


Схема проведения экспериментов на Байкале по вибрационному просвечиванию сопряженных сред «земля-вода-лед-атмосфера. Представлены : сейсмический вибратор ЦВ-100 с возмущающей силой 100 тс в диапазоне частот 6.25-10.05 Гц; СК-1П, GS-3, GS-ONE--сейсмические трехкомпонентные датчики, гидрофоны-датчики гидроакустических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

Физико-математическая модель распространения сейсмических колебаний в смежных средах «суша-озеро».

(Обобщенная многофакторная модель).

$$A = D(t, z, f, \bar{x}_u, \bar{x}_n) \Psi_u(f, \bar{x}_u) \Psi_n(f, \bar{x}_n) \Psi_p(f, \Delta) B(f, z, v, \Delta) \Phi^{1/2}(\bar{x}_u - \bar{x}_n) F_\Sigma.$$

Здесь \bar{x}_u и \bar{x}_n – координаты источника и приемника соответственно;

$\Delta = |\bar{x}_u - \bar{x}_n|$; f – частота в Гц; z – глубина приёма сигналов; D – коэффициент флуктуации амплитуд, Ψ_u – коэффициент передачи земной коры в точке излучения; Ψ_n – коэффициент передачи земной коры в точке приема (коэффициент трансформации сейсмической волны в гидроакустическую); Ψ_p – коэффициент переноса излучения по лучу; Φ – коэффициент направленного действия антенны; F_Σ – суммарная сила в источнике; B – коэффициент, равный $|\cos[zf\alpha(\Delta, V)]|$ для амплитуды смещений, и равный $2\pi f \rho V_0 |\sin[zf\alpha(\Delta, V)]|$ для амплитуды давления; v_0 – скорость звука в воде; V – радиальная компонента скорости движения приемника;
 $\alpha(\Delta, V) = 2\pi \cos \theta(\Delta) / \beta V_0$; $\beta = 1 - V \sin \theta(\Delta) / V_0$; $\theta(\Delta)$ – угол выхода волны из осадков в толщу воды.

Численное моделирование распространения сейсмоакустических колебаний в упругой изотропной среде

8

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u_x}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} \right) + F_x(x, z) f(t) \\ \frac{\partial u_z}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \right) + F_z(x, z) f(t) \\ \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_z}{\partial z} + \lambda \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial t} = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u_x}{\partial x} + \lambda \frac{\partial u_z}{\partial z} \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial t} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \end{array} \right. \quad (1)$$

В этих уравнениях (u_x, u_z) - компоненты скорости смещения, $(\sigma_{xx}, \sigma_{zz}, \sigma_{xz})$ - компоненты тензора напряжений, $\rho(x, z)$ - плотность среды, $\lambda(x, z)$ и $\mu(x, z)$ - коэффициенты Ламе.

F_x, F_z - составляющие силы $\vec{F}(x, z) = F_x \vec{e}_x + F_z \vec{e}_z$, описывающей распределение локализованного в пространстве источника. В качестве моделируемого источника F_x, F_z выбирается источник вертикальной силы: $F_x = 0, F_z = \delta(x - x_0) \delta(z - z_0)$; $f(t)$ - моделируемый временной сигнал в источнике с координатами (x_0, z_0) .

Задача решается при нулевых начальных данных:

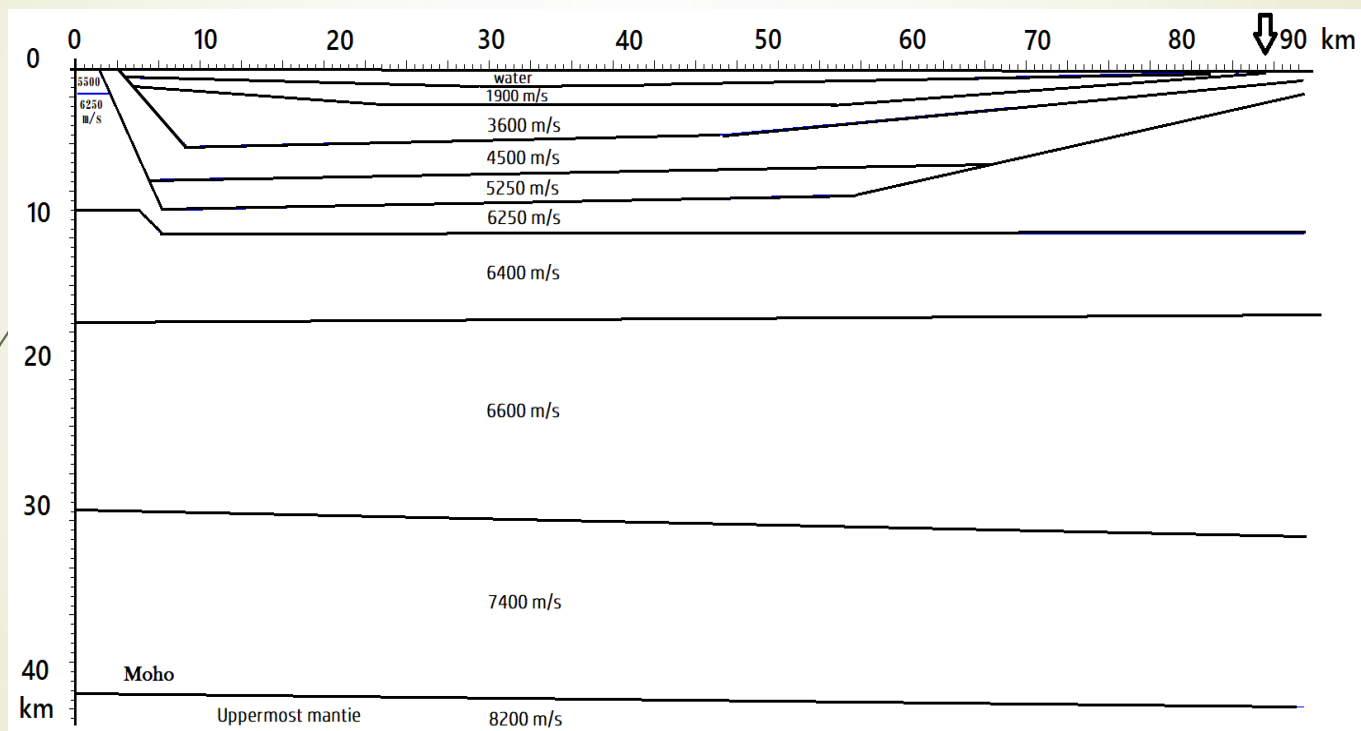
$$u_x|_{t=0} = u_z|_{t=0} = \sigma_{xx}|_{t=0} = \sigma_{zz}|_{t=0} = \sigma_{xz}|_{t=0} = 0. \quad (2)$$

Решение рассматривается на полупространстве $z \geq 0$, с граничными условиями на свободной поверхности:

$$\sigma_{xz}(x, z, t)|_{z=0} = \sigma_{zz}(x, z, t)|_{z=0} = 0. \quad (3)$$

Полагаем параметры среды $\rho(x, z), \lambda(x, z), \mu(x, z)$ - кусочно-непрерывными функциями переменных x, z .

Численная модель скоростного разреза БРЗ



Численная модель скоростного разреза БРЗ.

Численное моделирование сейсмоакустического волнового поля на трассе п. Бабушкин-п.Бугульдейка

10

Временной сигнал в источнике задавался в виде импульса Пузырёва:

$$f(t) = \exp\left(-\frac{2\pi f_0(t-t_0)^2}{\gamma^2}\right) \sin(2\pi f_0(t-t_0)), \text{ где } \gamma = 4, f_0 = 8 \text{ Гц}, t_0 = 0.125 \text{ сек.}$$

При этом моделируется волновое поле от точечного источника типа вертикальная сила, расположенного на поверхности с координатой $x_0 = 88 \text{ км}$ по оси **X**. По отношению к заданной модели среды (рис.2) изложенная методика расчета позволяет отслеживать развитие во времени картины распространения волнового поля от источника по горизонтале и глубине.

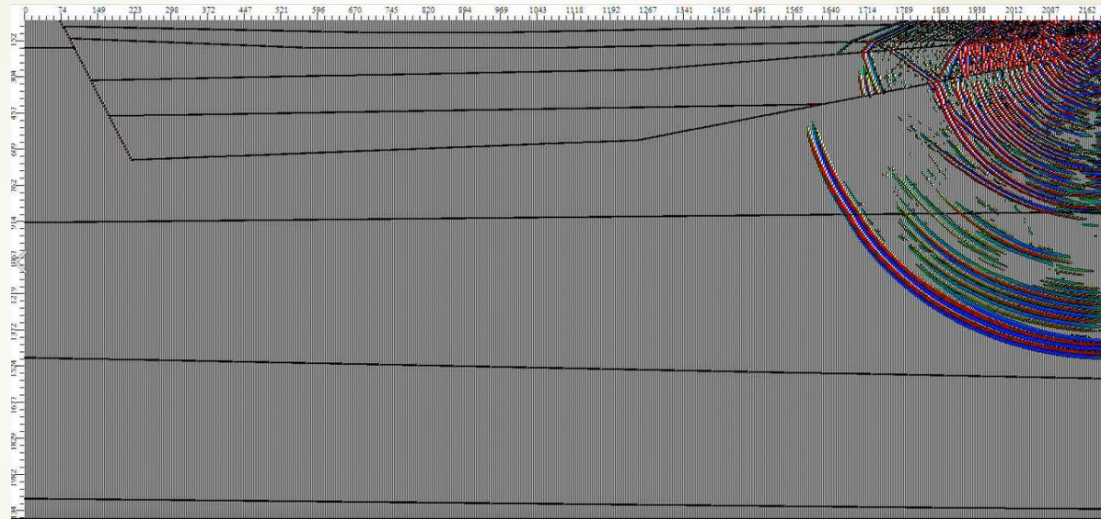
Описание формата снимков волнового поля. В 25 файлах с расширением .sct содержатся байтовые записи картинок волнового поля для U_z – компоненты в фиксированные моменты времени. В каждом файле в бесформатном виде записано 4500 трасс по 2250 отсчётов. Каждый отсчёт 4 байта.

Картинки соответствуют 25 моментам времени с интервалом 1 секунда, т.е номер картинки соответствует значению времени в секундах. В каждом отсчёте записано значение U_z – компоненты в узле с координатой (x_1, z_1) : $x_1 = N * \Delta x$, $z_1 = M * \Delta z$, где N – номер трассы, M – номер отсчёта в трассе. Шаг дискретизации $\Delta x = \Delta z = 20 \text{ метров}$.

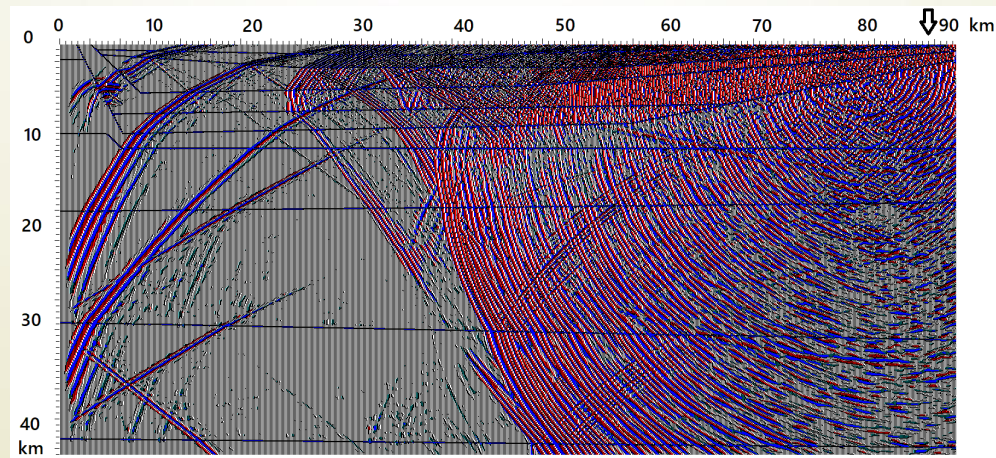
Мгновенные снимки волновых полей

11

В качестве примера ниже приведен мгновенные снимки волнового поля U_z – компоненты для момента времени $T=5,15$ сек. Рисунок наглядно показывает распространение волновых фронтов колебаний в выбранных координатах.

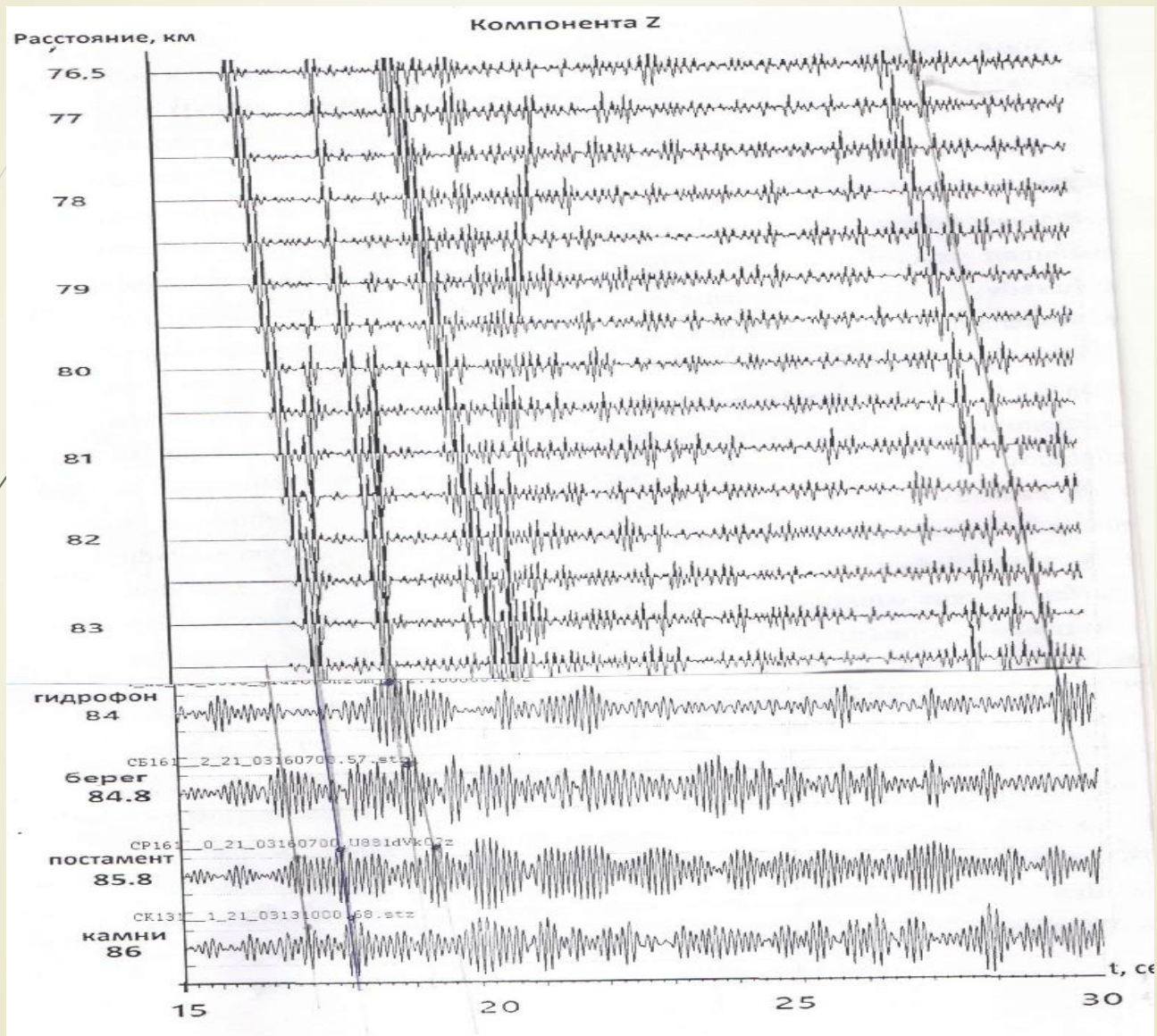


Мгновенный снимок волнового поля на 5 сек



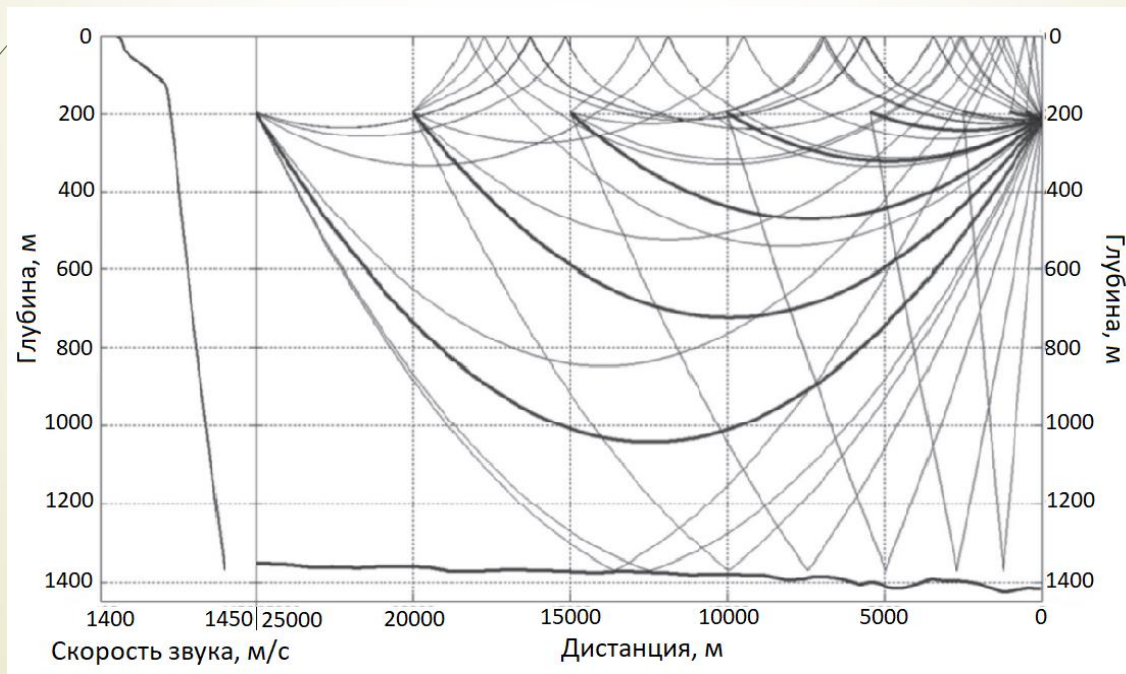
Мгновенный снимок волнового поля U_z – компоненты для $T=15$ секунд.

Синтетическая и экспериментальная сеймотрассы Uz



Волновая картина поля в воде

Многоволновая структура волн в воде обусловлена факторами, определяющими особенности распространения волн в оз. Байкал: в волноводе с границами «дно-лед»; в подводном звуковом канале-приповерхностный звуковой канал, получает наиболее полное развитие при образовании ледяного покрова; наличие отражающих границ, обусловленных градиентами температуры и давления по глубине озера. Лучевая картина для периода времени январь-апрель, рассчитанная теоретически [12]

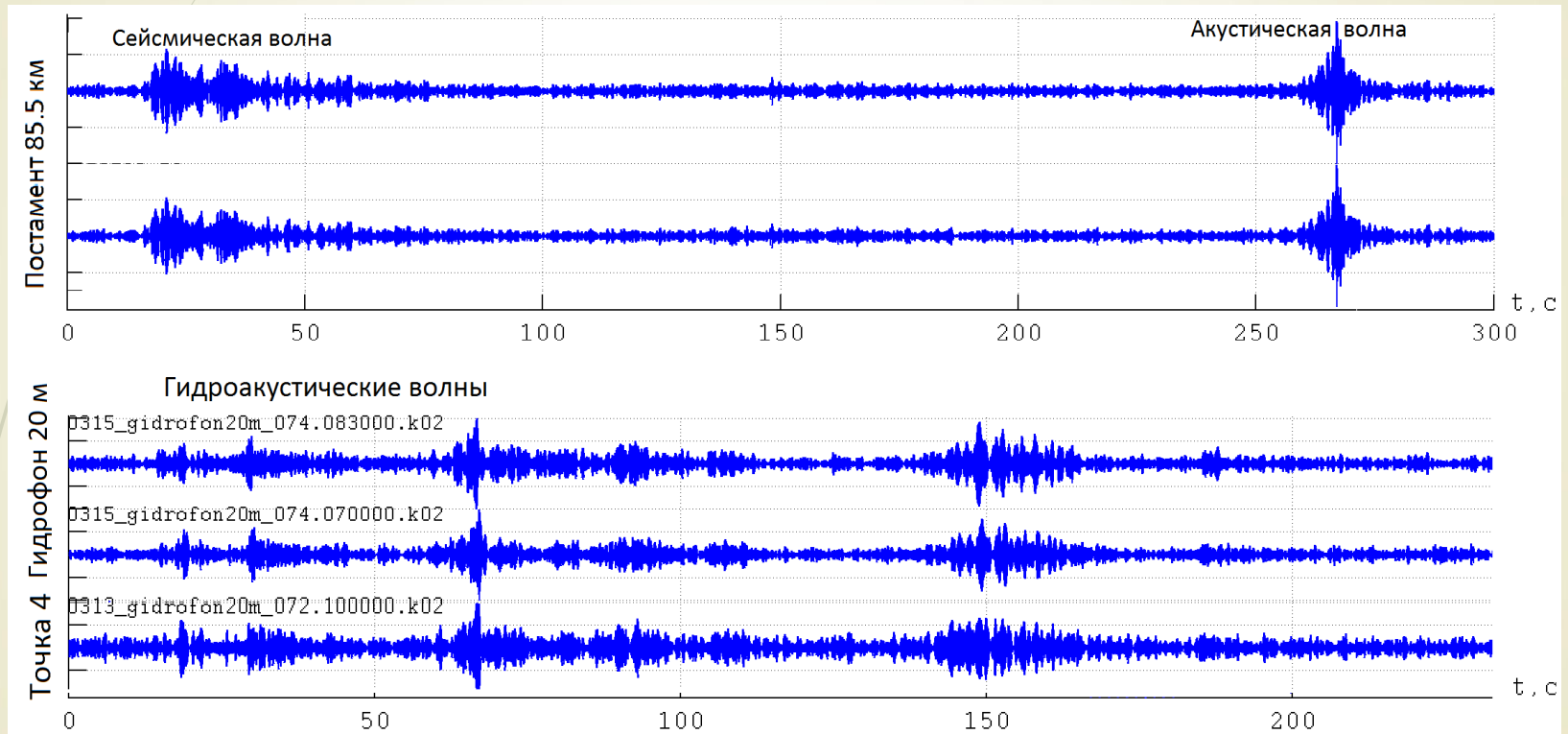


Многофакторная модель интегрального волнового давления как результата распространения акустических волн в нижней атмосфере

$$P_{\Sigma}(t, f, r) = P_V(f) + P_1(r) + P_2(e, \tau, \omega, \varphi) + P_3(1/r^2)$$

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 (лес, трава и т.д.); $P_2(e, \tau, w_0, \varphi)$ – давление в пункте регистрации как функция метеопараметров: относительной влажности e , температуры τ , скорости w_0 и угла φ между направлением ветра и плоским волновым фронтом от источника; $P_3(1/r^2)$ – давление как результат геометрической расходимости волнового фронта.

Структура вибрационных волн в сопряженных средах БРЗ



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. В нижней части рисунка представлены гидроакустические волны в оз. Байкал

Заключение

- В рамках проблемы геофизического мониторинга Байкальской рифтовой зоны на основе численного метода и экспериментальных исследований с применением вибрационного метода просвечивания смежных сред анализируются процессы дальнего распространения и взаимодействия смежных волновых полей - сейсмических, акустических, гидроакустических- на траверсе пос. Бабушкин (юго-восточная часть Байкала) – пос. Бугульдейка (северо-западная часть Байкала).
- На основе применения интегрального преобразования Лагерра по времени и конечно-разностной аппроксимации по пространственным координатам численным моделированием рассчитаны мгновенные снимки во времени сейсмического волнового поля, а также синтетические сейсмограммы для заданной трассы зондирования.
- Рассмотрены вопросы дальнего распространения и взаимодействия сопряженных разнородных геофизических полей.
- Результаты работы имеют теоретическую и практическую значимость для изучения шельфовых зон, включая зону Арктики.

Работа выполнена при поддержке проекта РФФИ № 20-07-00861а, госзадания FWNM–2022–0004

Литература

1. Mikhailenko B.G. Spectral Laguerre method for the approximate solution of time dependent problems // *Applied Mathematics Letters*, 1999, № 12, P. 105–110.
2. Konyukh G.V., Mikhailenko B.G., Mikhailov A.A. Application of the integral Laguerre transforms for forward seismic modeling // *Journal of Computational Acoustics*. 2001. Vol. 9, № 4. P. 1523-1541.
3. Хайретдинов М.С., Михайлов А.А., Ковалевский В.В., Пинигина Д.Л., Якименко А.А. Численно-аналитические методы расчета волновых полей и восстановления скоростных характеристик неоднородных упругих сред Байкальской рифтовой зоны. *Сибирский журнал индустриальной математики*, №2, 2023.
4. 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.
5. Khairtdinov M.S., Kovalevsky V.V., Voskoboynikova G.M., Sedukhina G.F. Estimation of meteorological risks from explosions by means of seismic vibrators. *Seismic technologies*. 2016, no. 3, pp. 132-138.
6. Разин А.В. Распространение звука в неоднородной движущейся атмосфере. *Изв. АН СССР, Физика атмосферы и океана*. 1982, т.18, №6, с.с.674-676
7. 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
8. Заславский Ю.М. Излучение сейсмических волн вибрационными источниками. *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*, 2007, 200 с.
9. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973, 343 с.
10. Воскобойникова Г.М., Караваев Д.А., Хайретдинов М.С. Численное моделирование распространения акустических волн в системе атмосфера-лесной массив-грунт. *Сибирский журнал индустриальной математики = Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki*, 2019. – Т. 22, № 1 (77). – С. 24–33.
11. Бреховских Л.М., Лысанов Ю.П. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат, 1982. С. 264
12. Макаров М.М., Кучер К.М., Попов О.Е., Асламов И.А., Гранин Н.Г. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТОНАЛЬНО-ИМПУЛЬСНЫХ

Спасибо за внимание!