

Форма 503 (итог). РАЗВЕРНУТЫЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

3.1. **Номер проекта:** 20-07-00861

3.2. **Название проекта:** Геоинформационная технология и теоретико-экспериментальные исследования закономерностей распространения и приема сейсмических колебаний наземных вибраторов на смешанных трассах «суша-море»

3.3. **Коды классификатора:**

07-341 Геоинформационные системы. Мультимедийные информационные системы,

07-355 Методы и алгоритмы интеллектуального анализа данных в задачах поддержки принятия решения,

07-378 Методы, средства, технологии и системы обработки, анализа и распознавания изображений и сигналов. Методы компьютерной обработки изображений на основе статфизического подхода

3.4. **Цель и задачи проекта**

1. Проведение углубленного анализа полученных ранее больших данных (Big Data) численного моделирования и натурных экспериментов. Установление фундаментальных закономерностей распространения и взаимодействия волновых полей в смежных средах «земля-море-атмосфера-лед» для района озера Байкал.
2. Формирование базы данных численных и натурных экспериментов в задачах вибрационного зондирования района озера Байкал.
3. Совершенствование методов обработки данных в направлении повышения помехоустойчивости выделения вибрационных волн.
4. Решение обратной задачи восстановления скоростной характеристики района озера по данным численного моделирования и экспериментальных исследований.
5. Обобщение результатов исследований применительно к решению задач гидроакустики Арктики, Мирового океана.
6. Получение выводов и рекомендаций для решения прикладных задач распространения и регистрации вибро-сейсмо-акустических колебаний.

3.5. **Важнейшие результаты, полученные при реализации проекта**

Итоговый отчет по теме «Геоинформационная технология и теоретико-экспериментальные исследования закономерностей распространения и регистрации сейсмических колебаний наземных вибраторов на смешанных трассах «суша-море» включает краткую формулировку основных результатов по предшествующим этапам выполнения работ по проекту и развернутый отчет по заключительному этапу выполнения работ.

2020 г.

- Выполнен обзор современных работ по теме проекта, касающийся вибросейсмического мониторинга как метода контроля за природными процессами с использованием метрологически точных колебаний сейсмических вибраторов и изучения параметров откликов зондируемых сред в связи с развивающимися динамическими процессами. Рассмотрены примеры таких работ по контролю за природными процессами в области Байкальской рифтовой зоны, за дрейфом тектонических плит, как это делается в Японии в связи с изучением дрейфа Филиппинской морской плиты с помощью системы «ACROSSs» (Accurately-Controlled and Routinely-Operated Signal System), за сейсмо-вулканическими процессами в интересах прогноза катастрофических событий и т.д. Для темы настоящего проекта интерес представляют места базирования источников для смешанных трасс – «суша – оз. Байкал», «суша – Черное море». В первом случае вибратор установлен на побережье оз. Байкал в районе пос. Бабушкин (республика Бурятия). Во втором случае место базирования вибратора ЦВО находится в 60 км от береговой линии в районе пос. Кутаис (Краснодарский край). Выполнен обзор работ по этим направлениям.

- Разработана инфокоммуникационная физико-математическая модель системы вибрационного зондирования вдоль смешанных трасс, интегрирующая математические модели процессов распространения сейсмо-гидроакустических волн и измерения их параметров на земле и в воде с учетом физических феноменов распространения колебаний в виде явлений многолучевости и интерференции волн, резонансных свойств сред; эффекта Доплера, влияния внешних шумов и др. факторов.
- Разработаны требования и методика выполнения численных экспериментов на ЭВМ и натуральных экспериментов в районе Байкальской рифтовой зоны.

2021 г.

- Выполнены натурные эксперименты по вибрационному просвечиванию участка юго-восточной части БРЗ на трассе "пос.Бабушкин - пос. Бугульдейка". Цель экспериментов – изучение закономерностей распространения и взаимодействия геоакустических полей от вибратора ЦВ-100 на смешанных трассах «берег-море», наземных трассах, трассе «атмосфера-земля», а также в ледяном покрове Байкала. Максимальная протяженность трассы составила 86 км. Регистрация колебаний осуществлялась одновременно в 4-х средах. В результате спектрально-корреляционной обработки полученных записей выделены сейсмические волны в земле, гидроакустические – в воде, акустические – в атмосфере. Оценены характеристики затухания волн в разных средах. В пределах рассматриваемой трассы 86 км ослабление основной сейсмической волны оценивается как 1.4 дб/км. Столь сильное ослабление вызвано наличием крупных разломов в Байкальской рифтовой зоне. В тоже время в воде Байкала ослабление низкочастотных колебаний лежит в районе 0.07дб/км, т.е. на порядки меньше.
- Выявлены физические феномены трансформации волн и оценены их количественные характеристики, касающиеся сейсмо-гидроакустической трансформации, акусто-сейсмической, проявляющихся на больших удалениях «источник-приемник».
- Разработаны численно-аналитические методы расчета волновых полей и восстановления скоростных характеристик неоднородных упругих сред Байкальской рифтовой зоны. Результаты прямого численного моделирования предполагают прогнозирование сложной структуры волновых полей и призваны для облегчения их интерпретации. В качестве подхода к решению обратной задачи восстановления скоростных характеристик неоднородной среды предложен и апробирован вычислительный сеточный алгоритм, основанный на вычислении средневзвешенных скоростей в участках сетки, накладываемой на поверхность земли.
- Разработаны и реализованы алгоритмы и программы накопления сверхслабых сигналов нанометрового уровня на фоне многократно превосходящих помех. Разработанные средства успешно применяются при обработке данных экспериментов.
- Подготовка сейсмического вибратора ЦВ-100 к проведению длительных сеансов излучения.

2022 г. – заключительный этап.

1. Разработана вычислительная технология моделирования процессов распространения сейсмоакустических волн в смежных средах («земля-атмосфера-вода-лед») и определения скоростных характеристик сложнопостроенной геофизической структуры Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) в направлении (юго-восток) – (северо-запад) оз. Байкал на участке пос. Бабушкин (юго-восточная часть Байкала) – пос. Бугульдейка (северо-западная часть Байкала). Выбор профиля для моделирования обусловлен выполненными здесь экспериментальными работами силами Института физики Земли РАН, Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Института геологии СО РАН в 2021 г. Основные этапы моделирования включают в себя построение реалистичной численной модели скоростного строения глубинных структур БРЗ в районе оз. Байкал, базирующейся на геофизической модели обобщенного скоростного ГСЗ-разреза. Численное зондирование осуществляется с применением импульса Пузырева и алгоритмов и программ решения динамической задачи расчета волновых полей в неоднородных упругих средах. Исходными для решения являются уравнения распространения сейсмоакустических колебаний в упругой изотропной среде, которые записываются как:

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

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. Для выбранного типа источника – источника вертикальной силы: $F_x = 0, F_z = \delta(x - x_0) \delta(z - z_0)$;

$f(t)$ – моделируемый временной сигнал в виде импульса Пузырева 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 .

Подходы к решению задачи представлены в работах:

1. М.С. Хайретдинов, А.А. Михайлов и др. Численно-аналитические методы расчета волновых полей и восстановления скоростных характеристик неоднородных упругих сред байкальской рифтовой зоны. // **Сибирский журнал индустриальной математики. 2022** (Scopus, РИНЦ, ВАК)
2. М. С. Хайретдинов, А. А. Михайлов. Численное моделирование распространения упругих волн в смежных средах Байкальской рифтовой зоны // **Марчукские научные чтения-2022: Тр. Междунар. конф., 3–7 октября 2022 г. С. 71-72. DOI: 10.24412/cl-35065-2022-1-00-93**

По результатам численного зондирования получены мгновенные снимки волновых полей, отражающие динамику их распространения во времени и пространстве, а также синтетические сейсмограммы с выделением типов отраженных волн.

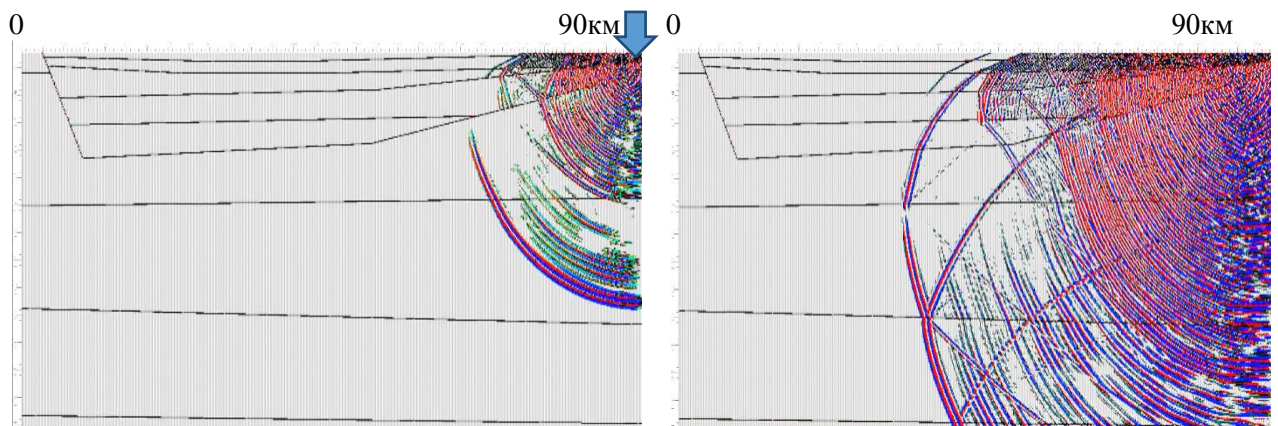


Рис.1 а) Мгновенный снимок волнового поля на 5 сек для модели 1.

Рис.1 б) Мгновенный снимок волнового поля на 10 сек для модели 1.

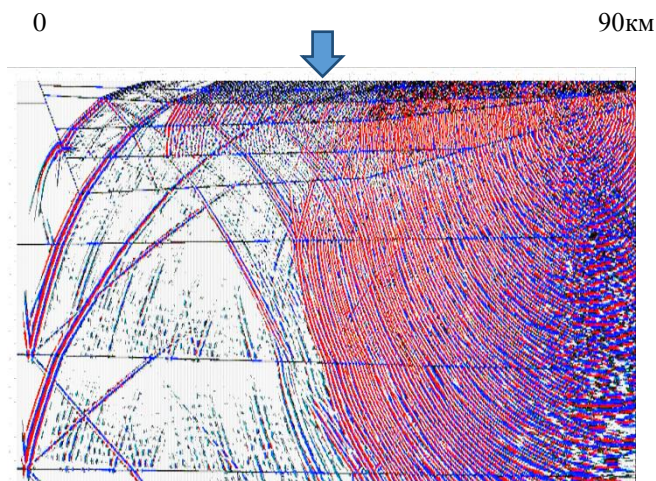


Рис.1 в) Мгновенный снимок волнового поля на 15 сек для модели 1.

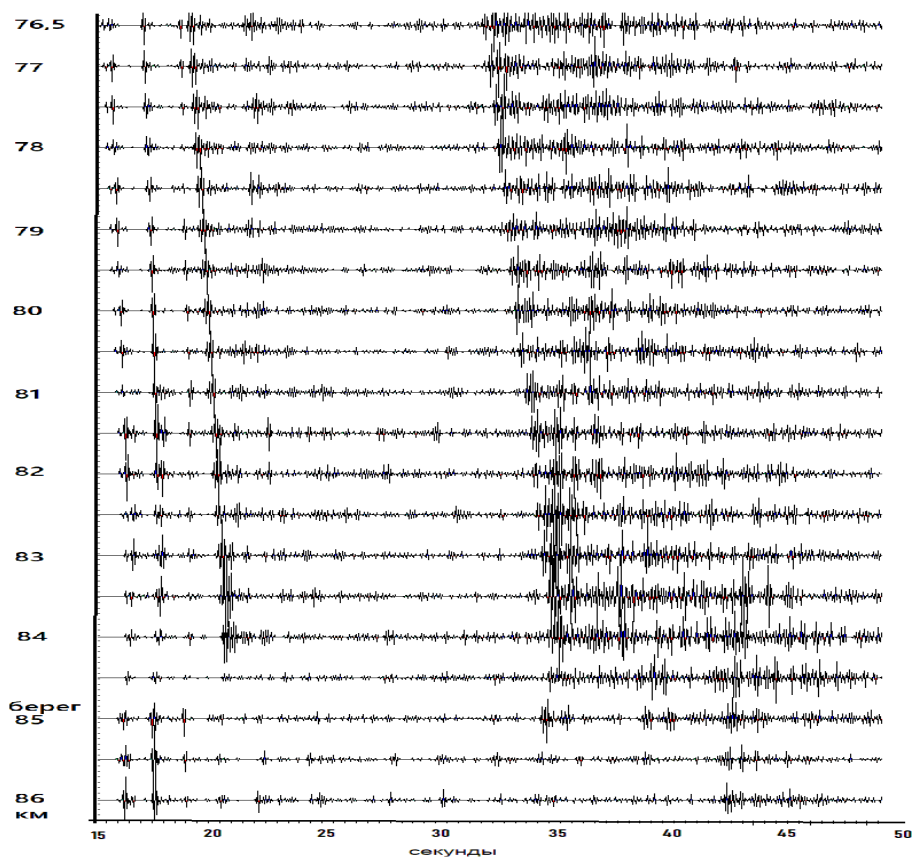


Рис 2. Сейсмограммы, U_z компонента.

Пример трех рассчитанных мгновенных снимков волнового поля, соответствующих последовательным временам распространения 5, 10, 15 сек приведен на рис.1а, 1б, 1в. Картины полей наложены на схемы численной модели 1 скоростного разреза. На снимках наглядно видны границы, формирующие отраженные волны. Соответственно три типа отраженных, соответствующих рассматриваемым временам, представлены ниже на синтетических сейсмограммах, охватывающих диапазоны дальностей 76.5-86 км. В качестве примера на рис.2 представлены сейсмограммы для компоненты волнового поля U_z .

В исходной постановке задачи в качестве начальных для моделирования рассмотрены три варианта численных моделей скоростных разрезов, для которых получены соответствующие оценки времен прихода волн. Выбор такого подхода, в конечном счете, связан с уточнением модели, наиболее адекватной данным натурных экспериментов.

3. В качестве подхода к решению обратной задачи восстановления скоростных характеристик неоднородной среды предложен и апробирован новый вычислительный сеточный алгоритм, основанный на вычислении средневзвешенных скоростей в участках сетки, накладываемой на

поверхность земли. (Daria L. Pinigina, Kopylova A. Oksana. Optimization Algorithm for Estimating the Velocity Characteristics of Complex Medium. // Proc. of IEEE International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (Sibircon-2022) (OPCS'22), Novosibirsk, 11-13th November, 2022 (принята к печати, Scopus)

Идея подхода состоит в том, что исследуемая область разбивается на участки, в которых вычисляются локальные скорости в соответствии с:

$$v_k = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \vec{V}_{ij} \cdot \frac{L_{ijk}}{L_{ij}}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{L_{ijk}}{L_{ij}}}, \quad (i=1, \dots, N), (j=1, \dots, M) \quad (4)$$

где \vec{V}_{ij} – средняя скорость сейсмической волны от источника i до датчика j , N – число источников, M – число регистрирующих датчиков на линейном профиле, L_{ij} – расстояние, пройденное сейсмической волной от источника i до датчика j , L_{ijk} – расстояние, пройденное сейсмической волной от источника i до датчика j в k -ом участке. Таким образом, на всю исследуемую область накладывается сетка, узлами которой являются k -ые участки. Минимальный шаг сетки ограничивается верхней граничной частотой колебаний источника. Рисунок 3 поясняет методику определения средневзвешенной скорости сейсмической волны сложной структуры среды в районе вулкана Карabetова.

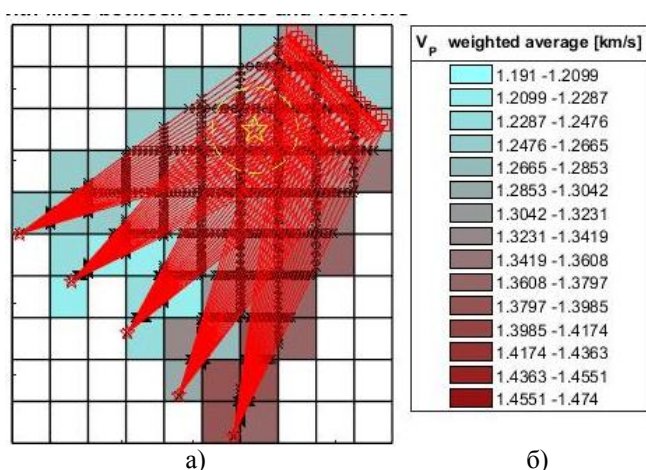


Рис.3. Схема зондирования области грязевого вулкана и оценки скоростей продольных волн в среде: звездочками помечены места установки источника, кружками – места размещения датчиков на линейном профиле, область самого вулкана помечена кругом; а) показана сетка, наложенная на дневную поверхность земли для определения средневзвешенной скорости сейсмической волны на выбранном участке, б) результаты представления средневзвешенной скорости

На рисунке 3а представлена схема вибрационного зондирования изучаемой среды, в данном случае области грязевого вулкана «гора Карabetова» (Таманская грязевулканическая провинция). На схеме 5-ю звездочками помечены места последовательной установки источника (сейсмического вибратора), кружками – места размещения 37 датчиков на линейном профиле с шагом 50 м.; область самого вулкана помечена кругом; показана сетка, наложенная на дневную поверхность земли для определения средневзвешенной скорости сейсмической волны на выбранном участке в соответствии с (4). На рис.3б обозначены в цвете и количественно представлены результаты определения средневзвешенной скорости на участках среды соответствующей цветности.

Результаты моделирования для данных численного эксперимента по оцениванию скоростных характеристик сложнопостроенной среды в Байкальской рифтовой зоне.

По отношению к синтетическим сейсмограммам для первичных Р-волн (рис.2), соотношенным к численной модели (рис.1) в соответствии с алгоритмом (4) восстановлены скоростные характеристики среды в диапазоне дальностей 76-90 км. Годограф в этом диапазоне по своему характеру представляется тремя графиками, описываемыми уравнениями:

$$f(x) = \begin{cases} c_1(x-x_1) + d_1, & x \in [76.5 \dots 85 \text{ км}] \\ a_2(x-x_1)^3 + b_2(x-x_1)^2 + c_2(x-x_1) + d_2, & x \in [83 \dots 85 \text{ км}] \\ a_3(x-x_1)^3 + b_3(x-x_1)^2 + c_3(x-x_1) + d_3, & x \in [85 \dots 86 \text{ км}] \end{cases}$$

Шаг интерполяции составляет 0,1 км в диапазонах расстояний, указанных в квадратных скобках справа от уравнений. На рис.4а представлены гистограммы средневзвешенных скоростей V_p (4) в локализованных диапазонах дальностей «источник-приемник», указанных на оси абсцисс. Как следует из графиков в диапазоне дальностей зондирования 76-90 км скорости лежат в пределах 4.97- 5.38 км/с.

За счет выбора шага сетки, метода аппроксимации дискретного годографа волн кубическими сплайнами, учета кривизны годографа головных волн в областях с ярко выраженной неоднородностью строения среды удается определить скоростной разрез ее с повышенной точностью. Полученные оценки численного моделирования согласуются с обобщенными данными по скоростям (рис.4б), полученными ранее в натуральных экспериментах по глубинному сейсмическому зондированию БРЗ.

Таким образом, на основе результатов численного решения прямой и обратной задач получены количественные оценки скоростного разреза геофизической структуры БРЗ в заданном районе на профиле пос. Бабушкин–пос. Бугульдейка и проведен их сопоставительный анализ с соответствующими ранее полученными результатами глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). Результаты сопоставления характеризуют согласие теоретического и экспериментального подходов. Таким образом, доказана эффективность созданной вычислительной технологии как теоретического подхода для повышения качества интерпретации и прогнозирования сложной структуры волнового поля.

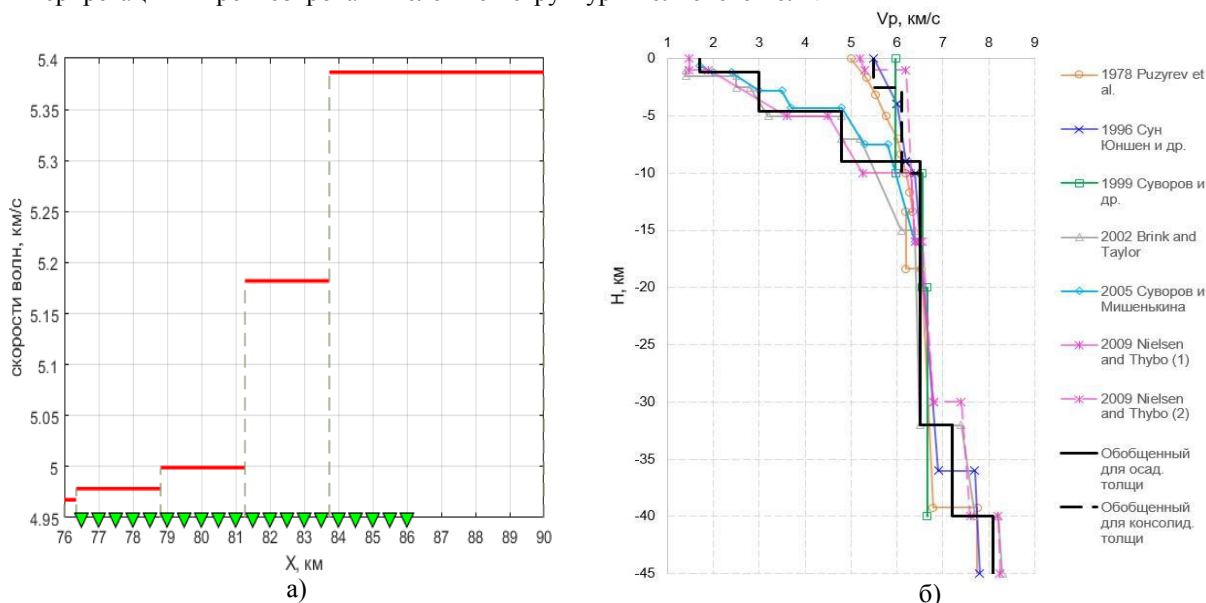


Рис.4: а) гистограмма восстановленных скоростей волн V_p как функция дальности; б) обобщенные данные по скоростям, полученные в натуральных экспериментах по глубинному сейсмическому зондированию БРЗ.

• В плане изучения проблемы взаимосвязи разнородных геофизических полей в экспериментах по вибрационному зондированию БРЗ (2021 г) авторами проекта обнаружено и изучено физическое явление дальнего распространения слабых акустических колебаний (до 100 км и более) как результат взаимодействия акустического волнового поля, порождаемого вибратором ЦВ-100, и метео-полей. Такое взаимодействие полей развивается в условиях распространения акустических колебаний в приземном волноводе и может приводить к явлению пространственной фокусировки колебаний в заданном азимутальном направлении при совпадении направлений ветра и фронта распространения волны. (Хайретдинов М.С. Проблема оптимальности взаимосвязей геофизических полей в задачах геоэкологического мониторинга, 2022).

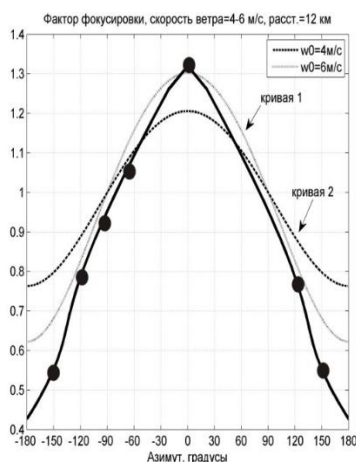


Рис.5. Расчетные и экспериментально полученные графики зависимости фактора фокусировки от азимута точки наблюдения. Высота источника – 5 м. График 1 для скорости ветра 6 м/с и график 2 для скорости ветра 4 м/с. Сплошная кривая соответствует экспериментально полученной при радиусе круговой расстановки регистрирующих датчиков 12 км с расположением вибрационного источника ЦВ-100 в центре круга и скорости ветра 4–6 м/с. Направление ветра на графиках соответствует нулевому значению азимута.

Эффект направленности акустического поля характеризуется фактором фокусировки, равным отношению интенсивности инфразвука в неоднородной движущейся среде к интенсивности его в безграничной неподвижной среде:

$$f = I[z, \theta, \varphi] / I_0$$

Начальное направление луча характеризуется сферическими углами θ (зенитный угол) и φ (азимут). Последний отсчитывается по отношению к направлению x . Для этих условий выполнен расчет фактора

фокусировки как функции азимутального направления α и расстояния «источник-приемник». Расчетные графики представлены на рисунке ниже.

Из рисунка видно, что оба полученных графика – теоретический и экспериментальный – иллюстрируют ярко выраженный эффект пространственной фокусировки акустических волновых полей под влиянием направления и силы ветра. Максимизация эффекта направленности и соответственно критерия (3) достигается в случае совпадения направлений фронта распространения волны и ветра. Количественно эффект максимизации может быть оценен отношением максимума фактора фокусировки к его минимальному значению. В описываемых экспериментах получено 50-ти кратное значение этого показателя, что говорит о яркой выраженности эффекта направленности. Эффекты пространственной фокусировки акустических волн способствуют их дальнейму распространению. Полученные результаты имеют важное практическое значение для предупреждения повышенных геоэкологических рисков от полигонных и карьерных взрывов, транспортных шумов и др. для окружающей социальной среды.

В подтверждение рассмотренного явления метео-акустического взаимодействия приводятся результаты регистрации в пункте на удалении 85.5 км от источника под землей на постаменте на глубине 5м (рис.6а): здесь регистрируются первичные сейсмические волны со временем вступления 16.9 с и вторичные акустические волны со временем вступления 262 с.

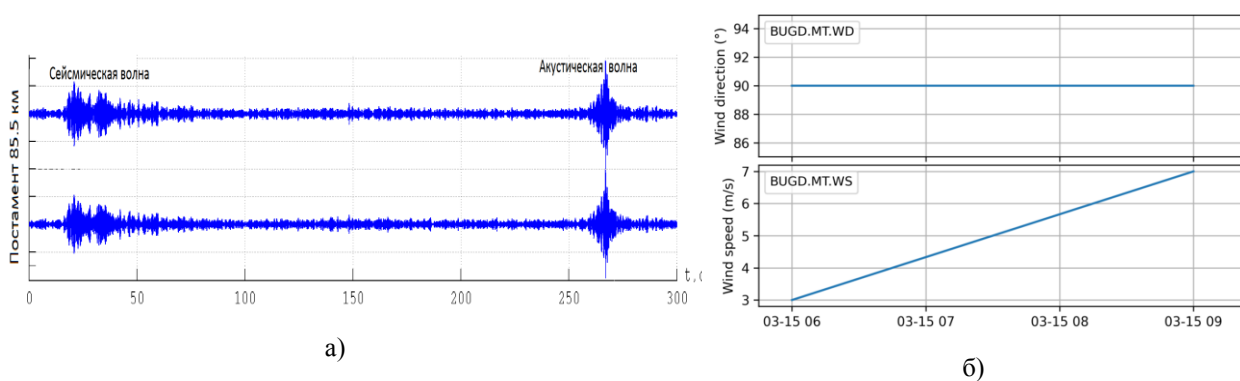


Рис.6: а) Структура вибрационных волн на сейсмограмме как результат зондирования зоны оз.Байкал: на удалении от вибратора 85.5 км. Представлены первичные сейсмические волны со временем вступления 16.9 с и вторичные акустические волны со временем вступления 262 с. б) графики азимутального направления и скорости ветра во время сеанса зондирования.

Приведенной картине дальнего распространения инфразвука от вибратора ЦВ-100 соответствуют метеоусловия, представленные в виде графиков направления и скорости ветра (рис.6б), которые постоянно регистрируются в ближайшей метеостанции «Бугульдейка». Как следует из графиков, направление ветра в период времени 05–10 час. — 90° , В, скорость 3–7м/с. Таким образом, восточный ветер способствует дальнейму распространению акустических волн от вибратора ЦВ-100 на трассе "п.Бабушкин–п.Бугульдейка". Такое физическое явление, как регистрация атмосферных акустических колебаний с помощью подземного сейсмодатчика обязано физическому явлению "акусто-сейсмическая индукция", при которой приповерхностная акустическая волна наводит в земле поверхностную сейсмическую волну, распространяющуюся со скоростью звука.

Противоположный случай сейсмоакустического распространения относится к метеоусловиям, представленным на рис.7а. Здесь направление ветра в период времени 05–10 час. — $225-325^{\circ}$, С-З, скорость 5м/с., т.е. направление ветра встречно направлению фронта волны. При этом на сейсмограмме (рис.7б) выделяется лишь первичная сейсмическая волна и отсутствует акустическая. В этом состоит метеозависимый эффект распространения акустических волн.

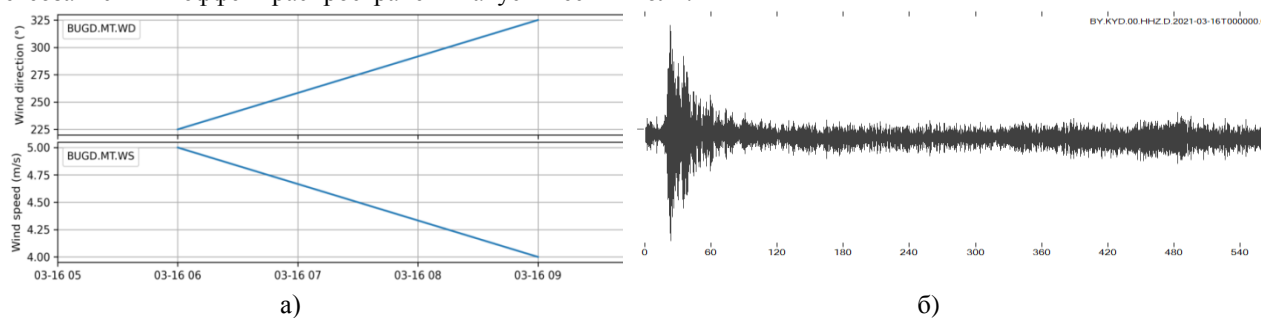


Рис.7

- **Высотные факторы дальнего распространения акустических лучей** от источника определяется факторами преломления и отражения в верхних слоях атмосферы при воздействии высотных метеофакторов, что обуславливает возможности регистрации их на больших расстояниях «источник-приемник»

(Marat Khairtdinov, Gyulnara Shimanskaya, Valerii Kovalevsky. *Optimality and unity of interactions of geophysical fields and waves*. 2022.

М.С. Хайретдинов, В.В. Ковалевский. *Сейсмические вибраторы в изучении межволновых взаимодействий*. 2022).

Вид расчетной картины высотного лучевого распространения инфразвука для такой дальности представлен на рис.8б при высотных метеоусловиях, представленных на рис.8а.

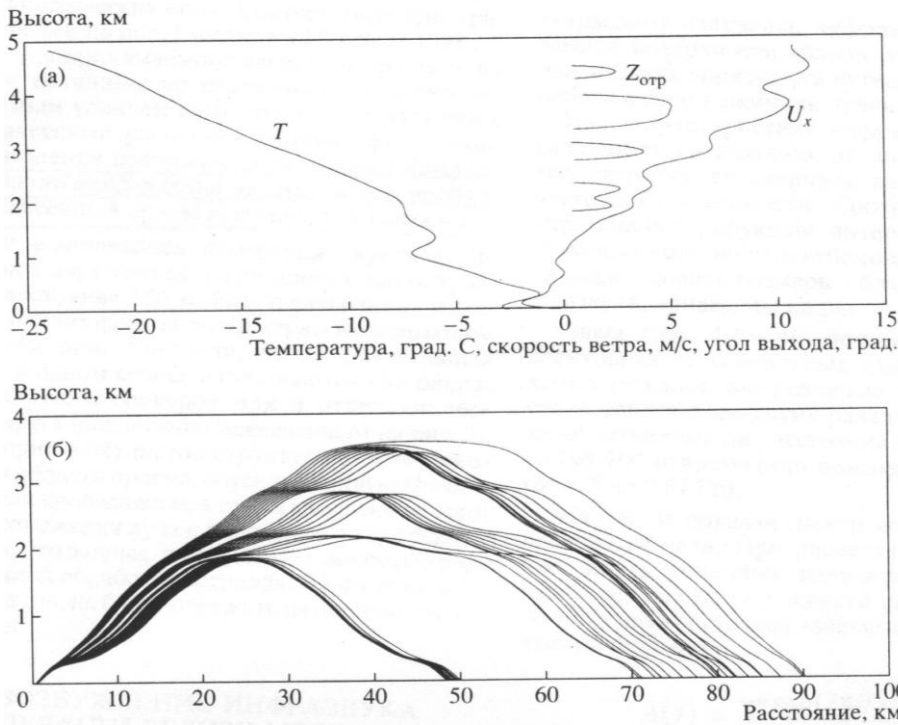


Рис.8. а) Высотные (в км) профили температуры T , компоненты горизонтального ветра u_x (м/с) по данным радиозонда, высоты отражения $z_{отр}$; б) траектории инфразвуковых волн.

Как следует из рисунков, для рассматриваемой высотной стратификации метеопараметров прогнозные дальности регистрации лежат в районе 50 км, 70-90 км. Это является основанием того, что высотное распространение инфразвука может вносить весомый вклад в его дальнейшее распространение наряду с явлением приповерхностного распространения, что подтверждается рис.4.

- **Рассмотрена проблема трансформации сейсмических волновых полей вибратора ЦВ-100 в гидроакустические** на границе раздела «берег-вода», «дно-вода». Она носит не только теоретический, но и прикладной характер для решения практических задач, как например, сейсморазведки в шельфовых зонах с применением береговых источников, и др. Трансформация подразумевает преобразование энергии волн одной природы в энергию волн другой природы при определенных граничных условиях между смежными средами. В результате этого взаимодействия упругая волна, описываемая уравнением распространения вида

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

трансформируется через граничный переход из среды 1 в прилегающую среду 2 с уравнением распространения

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

Здесь $p_1(z, x, t)$, $p_2(z, x, t)$ – векторы давления в средах 1 и 2, c_1 и c_2 – скорости распространения волн соответственно. Примером такой трансформации является акустосейсмическая индукция, связанная с наведением в земле поверхностной сейсмической волны при распространении в приземном волноводе акустической атмосферной волны [5].

Для характеристики эффекта трансформации можно ввести энергетический критерий вида.

$$\gamma = \frac{\int_0^T p_2^2(z, x, t) dt}{\int_0^T p_1^2(z, x, t) dt} \quad (3)$$

Задача усиления либо ослабления эффекта межволнового преобразования, связанная с нахождением условий, максимизирующих (минимизирующих) критерий (3), относится к числу фундаментальных.

В рамках настоящего проекта наряду с выше рассмотренным метеоакустическим взаимодействием рассматривается сейсмо-гидроакустическое. (Хайретдинов М.С. Проблема оптимальности взаимосвязей геофизических полей в задачах геоэкологического мониторинга. 2022, . М. Khairtadinov, G. Shimanskaya, V. Kovalevsky. *Optimality and unity of interactions of geophysical fields and waves*. 2022.)

Критерий γ является функцией многих параметров:

$$\gamma = F(\omega, \rho_e, \rho_w, c_e, c_w, V, W, \theta, \theta_1) \quad (4)$$

Здесь V, W – коэффициенты отражения и прозрачности, θ и θ_1 – соответственно углы падения и преломления, отсчитываемые по отношению к перпендикуляру к границе раздела сред. С учетом (4) рассмотрено условие полной прозрачности границы раздела «дно-вода», когда $\gamma = \gamma_{\max}$ и, в частности, применительно к параметрам дна Байкала. Этому условию соответствует коэффициент прозрачности $W=0.66$.

Подтверждением такой трансформации сейсмических колебаний в гидроакустические являются результаты экспериментов по регистрации на оз. Байкал волн в воде от вибратора ЦВ-100 на глубине 20 м и на удалении 84 км от источника. Картина волн представлена на рис.9 на гидроакустограммах для трех синхронно повторяющихся сеансов зондирования свип-колебаниями. Времена прихода первичных волн в воде составляют 15.15 с, что идентично скорости продольных сейсмических волн (см. рис.4а). Это свидетельствует о факте трансформации продольных сейсмических волн в гидроакустические в направлении «дно-вода». Другие типы, представленные на гидроакустограммах на дальних временах прихода, связаны с другими явлениями трансформации сейсмических волн в направлении «берег-вода», где распространение образующейся гидроакустической волны по длине пробега определяется скоростью распространения в воде – 1450 м/с. Кроме этого, выражены переотраженные волны, возникающие в неоднородной толще воды, а также между границами «лед-дно».

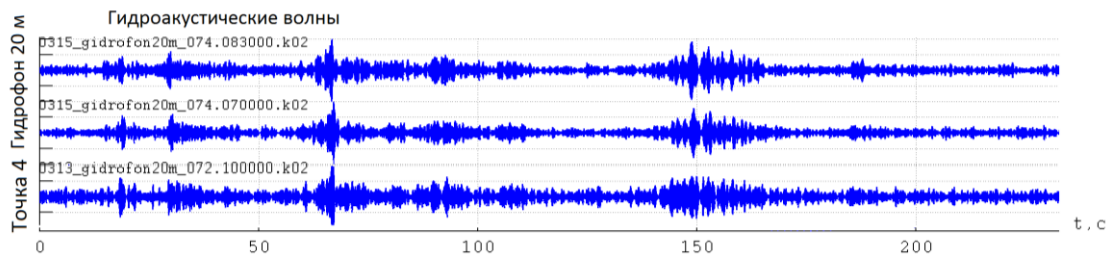


Рис.9. Структура вибрационных волн в воде как результат зондирования зоны оз.Байкал на удалении 84 км от вибратора.

- Изучены особенности распространения и регистрации упругих вибротсейсмических колебаний в смежной по отношению к воде среде "лед". Это представляет практический интерес для изучения гидроакустики Арктики, характеризуемой устойчивым ледовым покровом, и др. Ниже представлены сравнительные результаты высоко разрешающей спектральной обработки записей гармонических колебаний в шумах от вибратора ЦВ-100 (рис.10), полученных одновременно в разных средах – в земле на удалении 85.7 км (рис.10а), в воде – 84.5 км (рис.10б), на льду – 84.6 км (рис.10в). Для регистрации на земле и в воде использовались трехкомпонентные сейсмоприемники СК1-П, для регистрации в воде – гидрофоны. Представлены результаты одновременной регистрации по трем компонентам с ориентацией Z, N, E. Спектральная обработка записей во всех трех средах предназначена для выделения моды на частоте, соответствующей режиму излучения вибратора. Как частный случай, на представленных спектрах это составляет 9 Гц. В результате анализа спектров видно, что наиболее благоприятные условия регистрации спектральных мод гармонических колебаний имеют место в земле, в воде и на дне. Худшие результаты регистрации на льду обусловлены большим затуханием колебаний в хаотически трещиноватом льду, а также наличием высокого уровня шумов, превосходящих шум на земле более чем на порядок. Последнее следует из количественных оценок уровней спектральных мод вибрационных колебаний и шумов в разных средах.

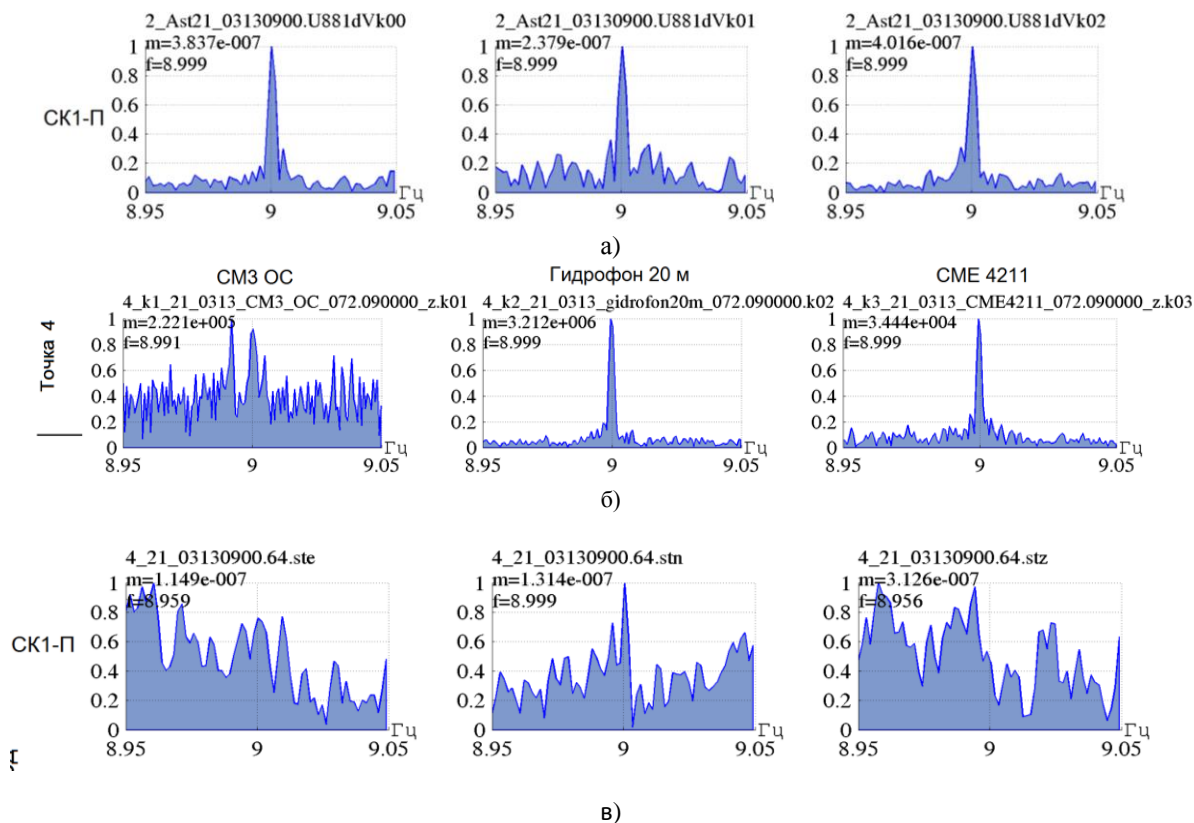


Рис.10. Спектры гармонических колебаний вибратора ЦВ-100 и шумов, полученных одновременно в разных средах: а) в земле на удалении 85.7 км; б) в точке на удалении 84.5км на льду (слева), в воде(по центру на глубине 20 м) и на дне (справа), на льду – 84.6 км; в) точка на льду на удалении 84.6 км.

Анализ сложной картины волнового поля в ледовом покрове по данным численного моделирования показывает, что здесь присутствуют горизонтально ориентированные продольные волны со скоростью около 3030 м/с, поверхностные волны Релея со скоростью распространения около 775 м/с, отраженные волны от глубинных слоев. Отдельно выделяются преобладающие изгибные волны, которые, по данным некоторых зарубежных авторов, могут быть представлены как суперпозиция внутренних продольных и многократно отраженных волн. Для них характерна высокая дисперсия, характеризуемая нелинейным алгебраическим уравнением для фазовой скорости :

$$V_{as} = \frac{(1/3)\pi^2 \chi^2 V_p^2 + (\rho_w / \rho_i) \cdot (g\lambda / 4\pi^2 \chi)}{1 + (\rho_w / 2\pi\chi\rho_i)\sqrt{1 - V_{as}^2 / V_w^2}}$$

Здесь χ — это отношение толщины льда H к длине волны λ и связано с частотой f соотношением $\chi = Hf / V_{as}$, V_p - скорость распространения продольной волны для льда, V_w - скорость звука в воде, ρ_w, ρ_i - плотности воды и льда соответственно, g — ускорение свободного падения. На низких частотах фазовая скорость мала и приближается к значению гравитационных волн в глубокой воде: $V_{as} = \sqrt{g\lambda / 2\pi}$ Очевидно, что повышенная дисперсионность волн является источником мощных помех, что обуславливает низкую помехоустойчивость регистрации полезных колебаний во льду.

- **Формирование базы данных численных и натуральных экспериментов в задачах вибрационного зондирования района Байкальской рифтовой зоны.**

Для хранения данных, полученных в ходе экспериментов на озере Байкал, адаптирован интеллектуальный научный веб-ресурс <https://izk.sssc.ru>, состоящий из двух подсистем: НИС «Активная сейсмология» и Портал знаний «Активная сейсмология». В качестве первого шага осуществляется привязка данных экспериментов в базе данных и базе знаний. НИС «Активная сейсмология» состоит из (рис.11):

- Электронной библиотеки (ЭБ) для хранения текстовых документов;
- Каталогизированных экспериментальных данных;
- Базы метаданных (БД), содержащей индексы и описание эксперимента, координаты источников сигналов и регистраторов, параметры сигналов и т.д.
- Приложения для построения карт экспериментов;
- Вычислительного модуля.

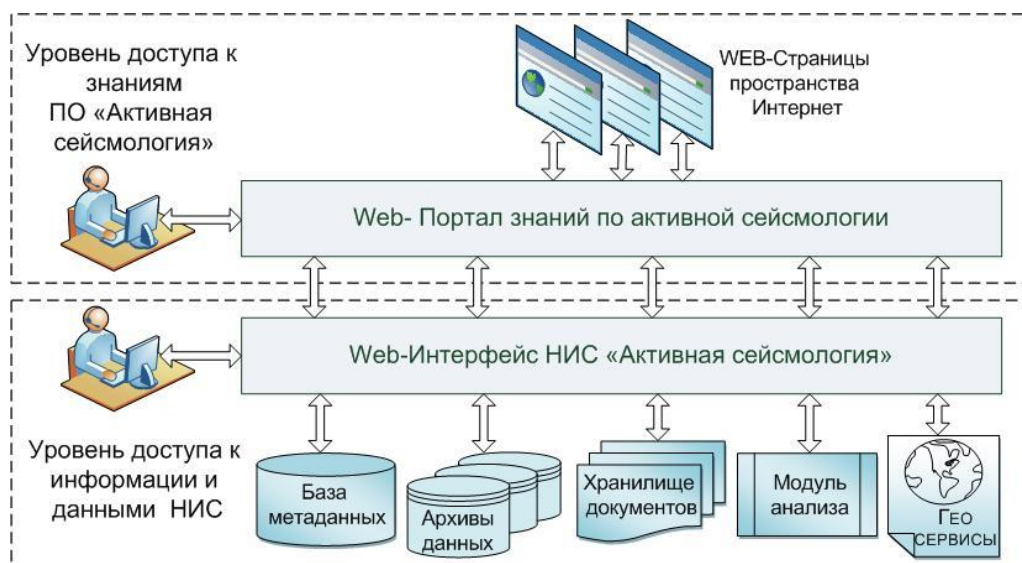


Рис.11. Структура веб-ресурса «Активная сейсмология»

Вычислительный модуль представляет собой приложение, выполняемое непосредственно в среде операционной системы сервера. Для обеспечения достаточного для онлайн-режима быстродействия приложение написано на языке C++ и использует программные библиотеки с низкоуровневой оптимизацией Intel Performance Libraries.

Ядром Портала знаний служит онтология. Онтология строится на основе 2 базовых онтологий: Онтологии научного знания и Онтологии научной деятельности. Онтология научной деятельности содержит такие понятия, как Объект исследования, Метод исследования, Предмет исследования, Задача, Результат, Публикация. Онтология научной деятельности содержит понятия: Организация, Персона, Деятельность.

Исходные параметры записи и поиска данных экспериментов на странице «Активной сейсмологии» в качестве примера представлены на рис.12. Здесь отображаются типы экспериментов с их основными параметрами (координаты, в результаты обработки, время, типы источников и частотно-временные режимы работы). На рис.13 представлены параметры и наименование оборудования пунктов регистрации и их дислокация на карте района. На рис.14 представлены таблицы, отображающие файлы, их исходные записи, а также результаты их экспресс анализа в виде спектров колебаний. Последние отображают результаты обработки записей гармонических режимов излучения вибратором ЦВ-100. Как видно, по всем каналом в пределах дальности регистрации уверенно выделяется спектральная мода, соответствующая частоте излучения 8 Гц

Созданные средства упорядочивают хранение большого объема данных (Big Data) и организацию оперативного поиска и выборки требуемых файлов. Данная разработка, выполненная в рамках проекта, нашла свою востребованность в исследованиях по мониторингу Байкальской рифтовой зоны сотрудниками Института земной коры СО РАН (г. Иркутск). Более подробные данные этой разработки представлены в публикации. (L. P. Braginskaya, A. P. Grigoruk, V. V. Kovalevsky. *An Integrated Information Environment to Support Geophysical Research of the Baikal Rift Zone*, 2021,

<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85120991773&origin=resultslist&sort=plf-f>)

Information-computational system «Vibro seismic Ea»

Seismic trace ID

Experiment: Session: Recorder: Sensor:

Seismic source type and signal parameters

Seismic vibrator
 Explosion
 Other types

Source	Source	Source
<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Signal: <input type="text" value="Harmonic"/>	Power, tn: <input type="text"/> - <input type="text"/>	
Frequency, Hz: <input type="text"/> - <input type="text"/>		
Duration, sec: <input type="text"/> - <input type="text"/>		

Recorder location

Latitude range, deg: -
Longitude range, deg: -

Recorder location relative to source

Range of distances source - recorder, km: -
Range of azimuth source - recorder, deg: -

Рис.12. Выбор эксперимента

Experiments - Google Chrome
opg.sccc.ru/db/exp.php?ExpNum=211&M=on

Seismic sources

№	Type	Name	Latitude (degr.)	Longitude (degr.)	№ reg.	Dist. (km)	Azimuth (degr.)
1					1	78.97	5.3
2					2	80.48	5.4
3					3	81.93	5.5
4					4	83.96	5.7
5	vibrator	CV100 Babushkin	51.7991	106.015	5	84.29	5.9
6					6	84.46	5.8
7					7	84.61	5.8
8					8	85.72	5.5
9					9	85.94	5.3
10					10	0.07	99.2

Recorders

№	Type	Sensor	Interval (s)	Azimuth (degr.)	Latitude (degr.)	Longitude (degr.)
1	Байкал	Geospace	-	-	52.5063	106.123
2	Байкал	СМЗ-ОС,ГДФ-40,20	-	-	52.5197	106.127
3	Байкал	Geospace	-	-	52.5325	106.132
4	Байкал	СМЗ-ОС,ГДФ20,СМЕ	-	-	52.5505	106.138
5	Байкал	GS-ONE	-	-	52.5532	106.142
6	Байкал	SK-1P	-	-	52.5548	106.141
7		SK-1P	-	-	52.5562	106.141
8		SK-1P	-	-	52.5665	106.136
9		SK-1P	-	-	52.5687	106.132
10		SK-1P	-	-	51.799	106.016

Рис.13. Результаты поиска

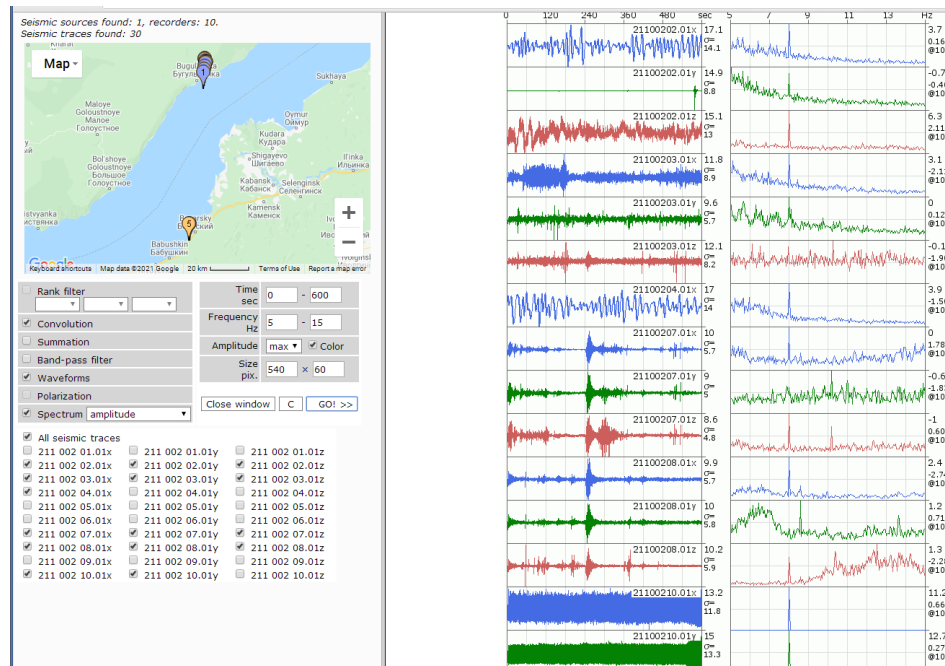


Рис.14. Отображение сейсмограмм

Цифровая платформа для данных комплексного геофизического мониторинга Байкальского региона

Цифровая платформа (ЦП) предназначена для интеграции и анализа данных, поступающих с пространственно распределенных пунктов регистрации, расположенных в пределах БРЗ. ЦП построена по клиент-серверной архитектуре, её структурная схема приведена на рис.15. Предполагается, что Коллектор данных должен периодически подгружать данные с пунктов мониторинга, куда они поступают в реальном времени непосредственно с датчиков. Далее данные приводятся к единому формату и помещаются в Локальное хранилище. Веб-приложение обеспечивает взаимодействие с пользователями Рабочих станций.

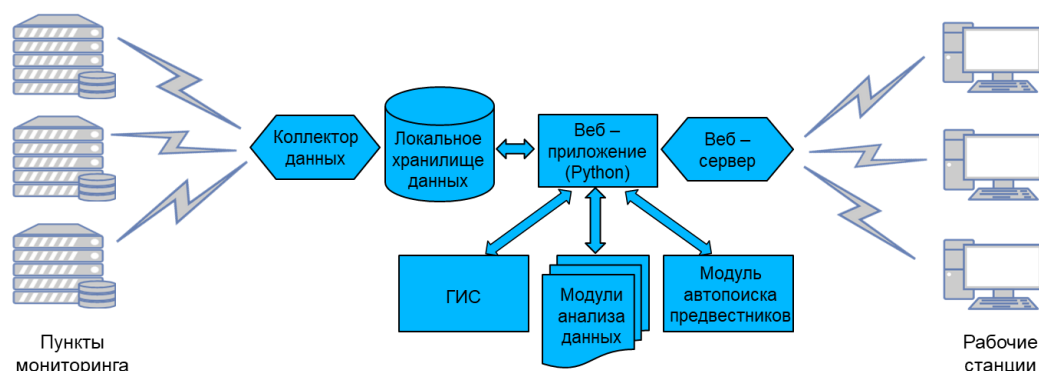


Рис.15. Структурная схема ЦП

Пользователи через интерфейс ЦП в веб-браузере формируют запросы к серверу, выбирая интересующий их интервал времени, пункты мониторинга, виды мониторинга и каналы, виды обработки и анализа данных. По нажатию кнопки «Submit» ЦП переходит к реализации сценария. В соответствии с запросом серверный сценарий извлекает нужные данные из Локального хранилища, производит их анализ и визуализацию и отправляет результат пользователю.

Анализ данных осуществляется Модулями анализа данных, набор которых может расширяться. В настоящее время доступны несколько методов фильтрации данных (линейная частотная, Савицкого–Голея и другие), различные методы спектрального и вэйвлет-анализа, мультифрактальный и энтропийный анализ, пространственный анализ данных.

При создании ЦП использовалось только свободно распространяемое программное обеспечение. Бэкенд сервера написан на языке Python с использованием следующих программных библиотек:

- Streamlit — веб-фреймворк;
- Matplotlib — построение 2D и 3D диаграмм;
- NumPy — поддержка многомерных массивов и матриц;
- Pandas, SciPy — научные и инженерные расчеты;

- ObsPy — фреймворк для работы с сейсмологическими данными;
- Folium GIS — ГИС, использующая карты OpenStreetMap.

В качестве примера на рис.16 приводится Главная страница пользовательского интерфейса.

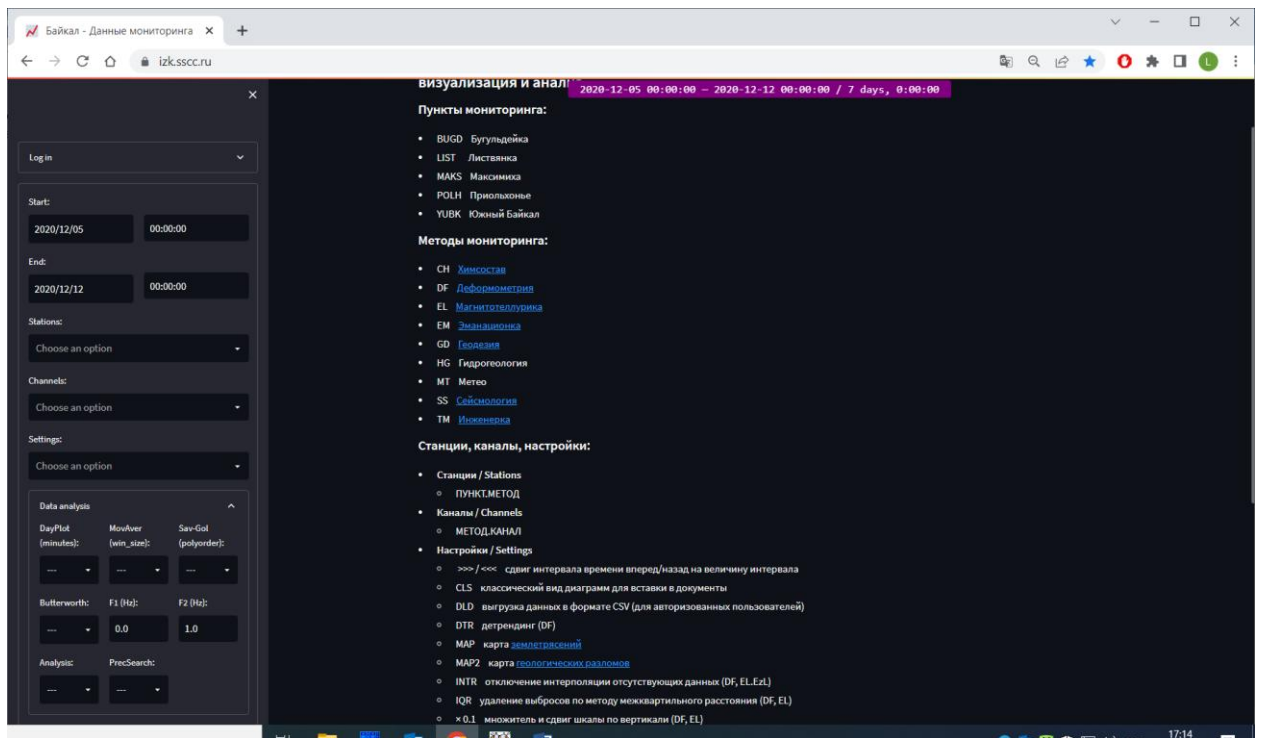


Рис.16. Главная страница пользовательского интерфейса

3.6. Сопоставление результатов, полученных при реализации проекта с мировым уровнем

• Впервые в интересах изучения скоростного строения Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) разработана оригинальная вычислительная технология 2D-моделирования процессов распространения сейсмоакустических волн в смежных средах («земля-атмосфера-вода-лед»), реализованная на супер-ЭВМ. Технология базируется на построении реалистичной численной модели скоростного разреза БРЗ, применении новых методов прямого и обратного численного моделирования. Результатами решения являются полная картина волнового поля и синтетические сейсмограммы, восстановленные скоростные характеристики сложнопостроенной геолого-геофизической структуры БРЗ в районе юго-восточной части оз.Байкал. На основе сопоставления результатов численного моделирования и натурных экспериментов доказана эффективность созданной вычислительной технологии для прогнозирования характеристик сейсмоакустических волновых полей. Такая технология в перспективе может стать альтернативой трудоемким и дорогостоящим натурным экспериментам. Представленные результаты не имеют аналогов.

• Новизной характеризуются результаты полевых экспериментов, доказывающие, что в воде присутствуют гидроакустические волны, порождаемые скоростными (около 5.35 км/с) сейсмическими волнами на границе «дно-вода». Это подтверждает априорное теоретическое заключение о наличии сейсмо-гидроакустической трансформации скоростных волн, имеющей важное научное и практическое значение.

• Создана новая специализированная база данных численных и натурных экспериментов в задачах вибрационного зондирования района Байкальской рифтовой зоны. Оригинальной компонентой здесь является интеллектуальный научный веб-ресурс, состоящий из двух подсистем: НИС «Активная сейсмология» и Портал знаний «Активная сейсмология». В качестве первого шага осуществляется привязка данных экспериментов в базе данных и базе знаний. НИС «Активная сейсмология», которая состоит из: электронной библиотеки (ЭБ) для хранения текстовых документов; каталогизированных экспериментальных данных; базы метаданных (БД), содержащей индексы и описание эксперимента, координаты источников сигналов и регистраторов, параметры сигналов и т.д.; приложения для построения карт экспериментов; вычислительного модуля.

• Разработана цифровая инфраструктура – электронная онлайн-платформа, адаптированная к проблемам геофизического мониторинга БРЗ. Функционально она позволяет осуществлять в реальном времени сбор, анализ и визуализацию на единой временной сетке долговременных рядов данных, полученных в ходе комплексного геофизического мониторинга на территории Прибайкалья. Интеграция и анализ данных на единой временной сетке позволяет выявлять аномалии и тренды во временных рядах с

целью обнаружения и последующей обработки вибро-сейсмо-гидро-акустических колебаний. В другом качестве созданная система является востребованной для выделения предвестников землетрясений в районе БРЗ по комплексу разнородных физических полей – магнитотеллурического, сейсмологического, деформометрического, гидрогеологического, эманационного и температурного на научных стационарах Института земной коры СО РАН (ИЗК СО РАН, г. Иркутск), расположенных в Прибайкалье.

3.7. Методы и подходы, использованные при реализации проекта (описать, уделив особое внимание степени оригинальности и новизны)

- Разработан и реализован метод решения динамической задачи расчета волновых полей в неоднородных упругих средах Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), основанный на применении интегрального преобразования Лагерра по времени и конечно-разностной аппроксимации по пространственным координатам. В отличие от широко используемого интегрального преобразования Фурье применение интегрального преобразования Лагерра по времени позволяет свести исходную задачу к решению системы уравнений, в которой параметр разделения присутствует только в правой части уравнений и имеет рекуррентную зависимость. Кроме того, введение параметра сдвига по временной переменной позволяет существенно уменьшить обусловленность получаемой системы уравнений. Эти основные преимущества алгоритма после конечно-разностной аппроксимации уравнений по вертикальной пространственной переменной дают возможность свести решение исходной задачи к решению системы линейных алгебраических уравнений для некоторого набора правых частей с хорошо обусловленной матрицей, не зависящей от параметра разделения. Это позволяет воспользоваться итерационными методами типа сопряженных градиентов, сходящихся за несколько итераций из-за хорошей обусловленности редуцированной задачи.
- Разработан подход к решению проблемы оптимизации процессов взаимодействия геофизических волновых полей применительно к сейсмо-гидроакустическому, метео-акустическому взаимодействиям на примере БРЗ. Наряду с фундаментальной компонентой практический результат рассматриваемой проблемы связан с определением условий дальнего распространения сейсмо-гидро-акустических волн в задачах активного геофизического мониторинга окружающей среды
- На основе применения метода высокоразрешающего спектрального анализа изучены особенности одновременной дальней регистрации вибросейсмических колебаний в разных средах БРЗ: в земле, в воде, в атмосфере, во льду. Сделан вывод о неблагоприятных условиях распространения и регистрации колебаний во льду вследствие повышенных фактора затухания искусственных колебаний и помех, вызванных процессами трещинообразования. Полученный вывод имеет практическую значимость для гидроакустики ледовой Арктики.
- Применены методы искусственного интеллекта и системного анализа для создания базы данных численных и натуральных экспериментов в задачах вибрационного зондирования района Байкальской рифтовой зоны. Оригинальной компонентой здесь является интеллектуальный научный веб-ресурс, используемый для: хранения данных экспериментов, текстовых документов, каталогизированных экспериментальных данных; базы метаданных (БД), содержащей индексы и описание эксперимента, координаты источников сигналов и регистраторов, параметры сигналов и т.д., приложения для построения карт экспериментов; вычислительного модуля. Созданный ресурс позволяет каталогизировать и обеспечивают ускоренный поиск разнородных данных с учетом специфики района проведения экспериментальных работ.