

IV. Заключение

Оценка ускорения модификаций метода Якоби показывает, что с ростом размерности задачи ускорение снижается. Модификация со строчным представлением матриц имеет наименьшее ускорение на всех размерностях. Для матриц размера от 1000 до 4000 элементов лучший результат ускорения получается при использовании векторизации с обработкой матриц по столбцам и наибольшим числом потоков. Для матриц большого размера (от 8000 элементов) роль векторизации падает, но все еще предпочтительнее использовать максимальное распараллеливание со столбцовой кэш-оптимизацией.

Проведенные эксперименты подтвердили эффективность кэш-оптимизации для блочной версии метода Якоби решения задачи сингулярного разложения квадратной матрицы. Векторизация ядра алгоритма также играет свою роль в комбинации с предложенной схемой обработки матриц по столбцам, поскольку такой подход снижает число кэш-промахов.

Литература

1. Вержбицкий В.М. Вычислительная линейная алгебра: Учеб. Пособие для вузов.-М.: Высш. шк., 2009.- 351 с.
2. Деммель Д. Вычислительная линейная алгебра. – М : Мир, 2001.
3. Hogben L. Handbook of linear algebra. – CRC Press, 2006.
4. Aishima K. et al. On convergence of the DQDS algorithm for singular value computation //SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications. – 2008. – Т. 30. – №. 2. – С. 522-537.
5. Zhou B. B., Brent R. P. On parallel implementation of the one-sided Jacobi algorithm for singular value decompositions //Parallel and Distributed Processing, 1995.Proceedings. EuromicroWorkshopon. – IEEE, 1995. – С. 401-408.
6. Егунов В.А. О влиянии кэш-памяти на эффективность программной реализации базовых операций линейной алгебры // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - 2018. - № 3. - С. 88-96.
7. Егунов В.А. Кэш-оптимизация процесса вычисления собственных значений на параллельных вычислительных системах // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - 2019. - № 1 (45). - С. 154-163.
8. Егунов В.А., Андреев А.Е Векторизация алгоритмов выполнения собственного и сингулярного разложений матриц с использованием преобразования Хаусхолдера // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - 2020. - № 2 (50). - С. 71-85.
9. Фролов А.В., Антонов А.С. AlgoWiki: изучение разных вариантов одного численного метода и другие проблемы // // Суперкомпьютерные дни в России: Труды международной конференции (23- 24 сентября 2019 г., г. Москва). – М.: Изд-во ООО «МАКС Пресс», 2018. С. 4-139.
10. Braman K., Byers R., Mathias R. The multishift QR algorithm, II: Aggressive early deflation // SIAM J. Matrix Anal. Appl., 23(4):948–973, 2002. DOI: 10.1137/s0895479801384585.
11. PCA and SVD explained with numpy [Электронный ресурс] // Towards Data Science. - Режим доступа: <https://towardsdatascience.com/pca-and-svd-explained-with-numpy-5d13b0d2a4d8>.
12. Сингулярное разложение [Электронный ресурс] // MachineLearning. - Режим доступа: http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Сингулярное_разложение.
13. Рекомендательные системы [Электронный ресурс] // Университет ИТМО. - Режим доступа: https://neerc.ifmo.ru/wiki/index.php?title=Рекомендательные_системы (дата обращения 03.07.2021).

ПРОБЛЕМА ОПТИМАЛЬНОСТИ ВЗАИМОСВЯЗЕЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ В ЗАДАЧАХ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

^{1,2}Хайретдинов М.С.

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, ²Новосибирский государственный технический университет

Оптимизационная проблема взаимодействия геофизических полей разной природы рассматривается. В связи с результатами, полученными в экспериментах в Байкальской рифтовой зоне методом вибрационного зондирования смежных сред-«земля-вода-атмосфера-лед», анализируются полевые сейсмо-гидроакустические, метео-акустические взаимодействия. Необходимость изучения таких взаимодействий проистекает из решения ряда современных экологоохраных проблем прогнозирования геоэкологического воздействия разного типа техногенных и природных процессов-транспортных и промышленных шумов, карьерных и полигонных взрывов и др. на окружающую социальную инфраструктуру и природную среду.

Ключевые слова: оптимальность, сейсмо-гидроакустическая трансформация, Байкальская рифтовая зона, метео-акустическое взаимодействие, натурный эксперимент.

The optimization problem of the interaction of geophysical fields of different nature is considered. In connection with the results obtained in experiments in the Baikal rift zone by the method of vibrational sounding of adjacent media - "earth-water-atmosphere-ice", field seismo-hydroacoustic, meteorological-acoustic interactions are analyzed. The need to study such interactions stems from the solution of a number of modern environmental problems of predicting the geocological impact of various types of man-made and natural processes - transport and industrial noise, quarry and landfill explosions, etc. on the surrounding social infrastructure and natural environment.

Key words: optimality, seismic-hydroacoustic transformation, Baikal rift zone, meteorological-acoustic interaction, natural experiment.

Введение

Проблема изучения взаимодействия геофизических полей и волн разной природы, возникающих в смежных средах «земля-атмосфера-океан», носит как фундаментальный, так и прикладной характер. Примерами межполевых и межволновых взаимодействий являются акусто-сейсмические [1], метео-акустические взаимодействия [2], сейсмо-гравитационные [3], акусто-оптические [4], сейсмо-гидроакустические [5], сейсмо-электрические [6] и др. Такие взаимодействия отражают единство природы - в природе все взаимосвязано. В этом заключается ее фундаментальное свойство.

Необходимость изучения таких взаимодействий проистекает из решения ряда современных экологоохранных проблем прогнозирования геоэкологического воздействия разного типа техногенных и природных процессов - транспортных и промышленных шумов, карьерных и полигонных взрывов и др. на окружающую социальную инфраструктуру и природную среду. В частности, по отношению к различного типа взрывам стоит проблема оценивания геоэкологических рисков, связанных с воздействием на окружающую среду ударных воздушных и сейсмических волн. Метео-акустические взаимодействия при этом могут быть причиной многократного усиления разрушительного экологического воздействия взрывов на окружающую среду. Решение некоторых задач использования наземных береговых источников для изучения шельфовых зон в проблемах морской сейсморазведки на углеводороды, управления заглубленными морскими навигационными устройствами и станциями требует изучения процессов сейсмо-гидро-акустических полевых взаимодействий.

В работе рассматривается задача анализа процессов оптимизации межполевых взаимодействий – сейсмо-гидроакустического, метео-акустического на инфранизких частотах. Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований.

Постановка задачи

Под понятием взаимодействие полей (волн) подразумевается 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 [1]. Для характеристики эффекта трансформации волн 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 сводится к нахождению условий, максимизирующих (минимизирующих) критерий (3). Решение задачи здесь в каждом конкретном случае взаимодействия полей носит свой специфический характер.

Сейсмоакустическая трансформация.

Максимизация (3) возникает в задачах, связанных с распространением сейсмических волн, возбуждаемых наземными источниками- вибраторами, через границу перехода «дно-вода» и последующей регистрации гидроакустических волн заглубленными станциями и устройствами. Такие взаимодействия изучались в экспериментах на Байкале, схематически представленные на рис. 1.

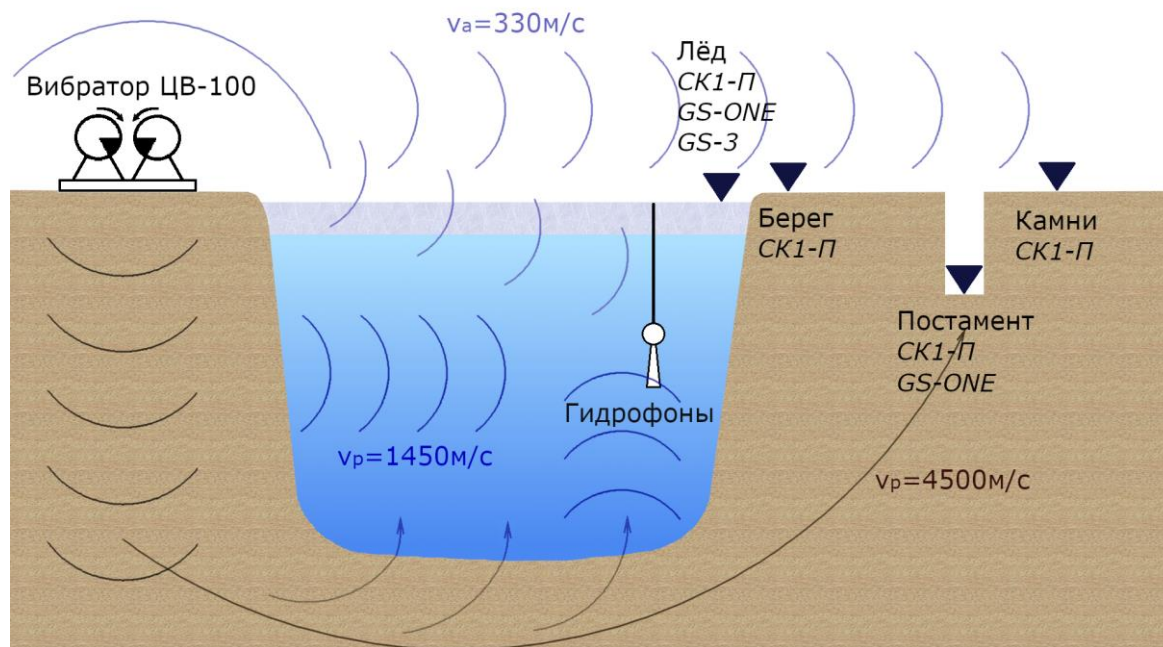


Рисунок 1 - Схематическая картина распространения вибрационных волн от вибратора ЦВ-100 в сопряженных средах «земля-вода-лед-атмосфера» и их регистрация в процессе проведения экспериментов на Байкале. Представлены : сейсмический вибратор ЦВ-100 с возмущающей силой 100 тс в диапазоне частот 6.25-10.05 Гц; сейсмические трехкомпонентные датчики СК1-П, GS-3, GS-ONE, гидрофоны, «постамент»- сейсмическая обсерватория на глубине 3 м; «лед», «берег», «камни», «гидрофоны»- наименование мест установки датчиков.

Эксперименты выполнялись в марте 2021 силами трех организаций-Института вычислительной математики СО РАН, Института физики Земли РАН, Института геологии СО РАН. Сейсмическим вибратором ЦВ-100 одновременно возбуждаются сейсмические волновые поля в земле, акустические- в атмосфере. На границах перехода «берег-вода», «дно-вода» сейсмические волны соответственно трансформируются в гидроакустические волны, которые распространяются со скоростью 1450м/с и регистрируются опущенными в воду гидрофонами. Слабые вибрационные акустические волновые поля при определенных условиях могут распространяться в атмосфере на большие расстояния [6] . В условиях данного эксперимента регистрация акустических волн производилась на удалении 86 км (пункт «постамент»).

На рис.2 приведена полная волновая картина как результат распространения волновых полей, представленных на рис.1. Наряду с сейсмическими волнами здесь присутствуют: атмосферные акустические волны, регистрируемые на датчике сейсмических колебаний на времени 262 с., в воде-гидроакустические волны как результат перехода сейсмических волн через границу «дно-вода» с временем вступления около 15.15 с, а также через границу «берег-вода» с временем вступления около 67.10 с.

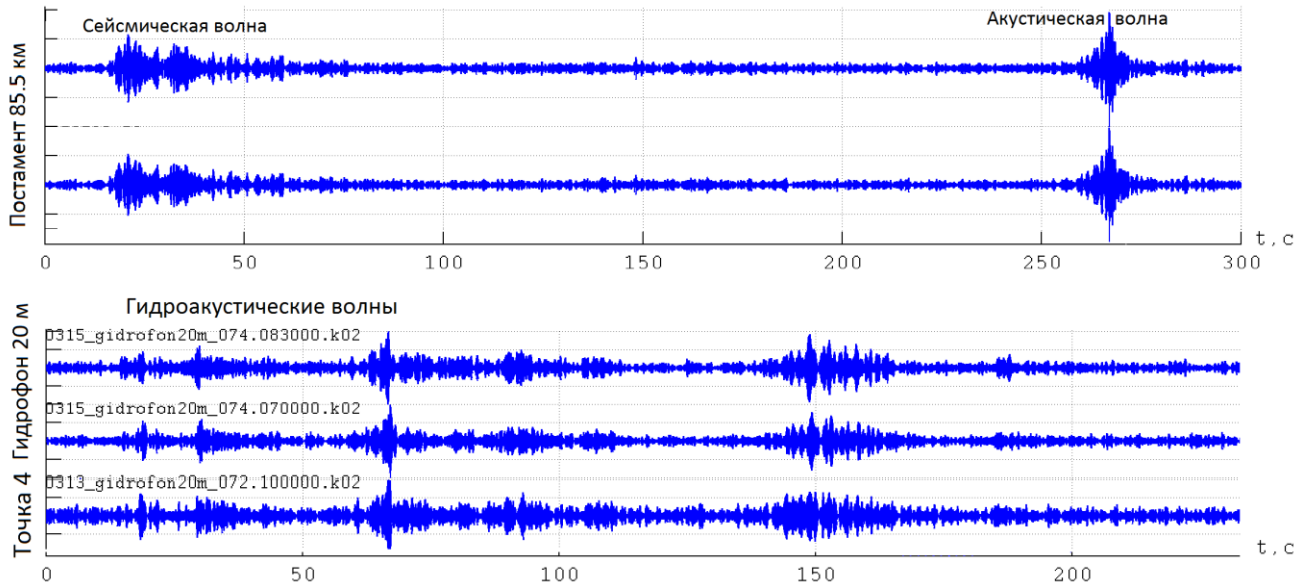


Рисунок 2 – Структура вибрационных волн как результат зондирования зоны оз.Байкал на удалении от вибратора 85.5 км. В верхней части рисунка представлены первичные сейсмические волны со временем вступления 16.9 с и вторичные акустические волны со временем вступления 262 с.

Максимизация эффекта трансформации сейсмических волн в гидроакустические.

Трансформация сейсмических волн в гидроакустические на границе перехода «дно-вода» осуществляется в соответствии с законами геометрической оптики: в случае падения к границе раздела обеих сред под углом θ плоской звуковой волны частоты ω с единичной амплитудой давления в виде $P_{пад} = e^{ik(x\sin\theta + z\cos\theta)}$ образуются отраженная и преломленная волны давления вида: $P_{отр} = Ve^{ik(x\sin\theta - z\cos\theta)}$, $P_{пр} = We^{ik_1(x\sin\theta_1 + z\cos\theta_1)}$ [7]. Здесь V - коэффициент отражения, W - коэффициент прозрачности, θ и θ_1 -соответственно углы падения и преломления, отсчитываемые по отношению к перпендикуляру к границе раздела; $k = \omega/c_e$, $k_1 = \omega/c_w$ - волновые числа, c_e и c_w - скорости волн в земле и в воде соответственно. Приведенные коэффициенты определяются соотношениями плотностей сред $m = \rho_w/\rho_e$, а также показателем преломления границы $n = c_e/c_w$ [7]:

$$V = \frac{x \cos \theta - n \cos \theta_1}{m \cos \theta + n \cos \theta_1} \text{ и } W = \frac{zm \cos \theta}{m \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}. \quad (4)$$

Условие (3) по отношению к рассматриваемой границе раздела сред примет вид:

$$\gamma = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} (We^{ik_1(x\sin\theta_1 + z\cos\theta_1)})^2 d\theta_1}{\int_0^{\frac{\pi}{2}} (e^{ik(x\sin\theta + z\cos\theta)})^2 d\theta} \quad (5)$$

Максимальное значение $\gamma = \gamma_{max}$ соответствует условию полной прозрачности границы раздела «дно-вода». Соответствующий этому случаю угол падения θ^* определяется условием

$$m \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} = 0 \text{ или } \sin \theta^* = \sqrt{\frac{m^2 - n^2}{m^2 - 1}}. \quad (6)$$

В качестве примера рассмотрим это условие для границы перехода «дно-море» Байкала. Характеристики пограничных сред здесь оцениваются параметрами: $c_e = 2000$ м/с, $\rho_e = 1500$ кг/м³; $c_w = 1440$ м/с, $\rho_w = 1000$ кг/м³. Соответственно $n = 1.4$, $m = 0.66$ и угол падения $\theta^* \approx 30$ град.

Реально на больших удалениях угол падения к границе «дно-вода» приближается к нормали ($\theta = 0$), что определяется практически вертикально направленными выходами преломленных волн к границе раздела. В этом случае рассматриваемые коэффициенты примут вид:

$$V = (m-n)/(m+n), \quad W = 2m/(m+n). \quad (7)$$

С учетом вышеприведенных характеристик пограничных сред коэффициенты отражения и прозрачности соответственно составят $V = 0.33$ и $W = 0.66$. Это означает, что граница «дно-вода» на Байкале обладает достаточно высокой прозрачностью для сейсмических волн, падающих под

нормальным углом к границе перехода. Это априори можно было предположить с учетом характера дна Байкала в виде рыхлой водонасыщенной толщи, характеризующейся пониженной контрастностью границы «дно-вода» для процессов отражения и преломления.

Условия максимизации дальнего распространения акустических волн,

Оптимизация решения для этой задачи определяется условиями пространственной фокусировки поля акустического давления. Эффект направленности акустического поля характеризуется *фактором фокусировки*, равным отношению интенсивности инфразвука в неоднородной движущейся среде к интенсивности его в безграничной неподвижной среде [8]:

$$f = I[z, \theta, \varphi] / I_0 \quad (8)$$

Акустическое давление в дальней точке регистрации является функцией многих параметров, определяемых условиями излучения и дальнего распространения акустических колебаний. Эта зависимость может быть представлена в виде некоторого функционала:

$$p(t) = F[Q f_1(c, \varphi, w, \alpha), f_2(T), \delta(H), \psi(t)]. \quad (9)$$

Здесь Q – мощность источника; $f_1(c, w)$ – функциональная зависимость акустического давления от соотношения скорости c и направления φ распространения акустической волны от источника с одной стороны и скорости w и азимутального направления α ветра с другой; $f_2(T)$ – высотное распределение температуры воздуха; $\delta(H)$ – функция, отражающая неоднородность дневной поверхности земли; $\psi(t)$ – фактор неоднородности атмосферы, зависящий, в частности, от влажности воздуха. Таким образом, задача оценивания (9) является многопараметрической. Получение оценки в такой постановке наталкивается на сложности из-за отсутствия полноты априорных сведений. Получение аналитической зависимости возможно для некоторых ограниченных случаев. Другой путь преодоления априорной неопределенности связан с получением оценок (9) на основе экспериментов с применением вибраторов в качестве излучателей инфранизкочастотных акустических колебаний. В этом случае учитываются все факторы, представленные в (9). Оба варианта решения задачи рассмотрены авторами.

Вариант численного моделирования состоит в следующем: в качестве модели рассматривается точечный источник инфразвука, расположенный на высоте h над поверхностью Земли. При этом поверхность Земли считается плоской, а атмосфера слоисто неоднородной. Скорость звука и ветра зависят лишь от вертикальной координаты, при этом скорость ветра имеет лишь горизонтальные составляющие. На инфранизких частотах справедливо лучевое приближение распространения звука, поскольку здесь эффекты рассеяния и затухания акустических волн малы. С учетом этого изменение интенсивности волн подчиняется предположению о геометрической расходимости лучей. В прямоугольной системе координат ось z направлена вверх от поверхности Земли, а направление оси x на высоте h совпадает с направлением ветра. Начальное направление луча характеризуется сферическими углами θ (зенитный угол) и φ (азимут). Последний отсчитывается по отношению к направлению x . Для этих условий в соответствии с [9] выполнен расчет фактора фокусировки (8) как функции азимутального направления α и расстояния «источник-приемник». Расчетные графики представлены на рис.3: график 1 для скорости ветра 6 м/с и график 2 для скорости ветра 4 м/с.

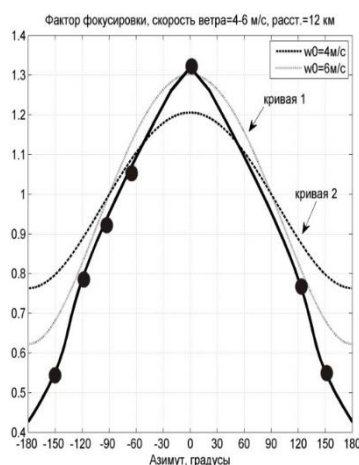


Рисунок 3 - Расчетные и экспериментально полученные графики зависимости фактора фокусировки от азимута точки наблюдения. Высота источника – 5 м

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 [10]. Направление ветра на графиках соответствует нулевому значению азимута. 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 дальнейшему распространению. В этом случае необходимо учитывать характеристики атмосферы: высотные профили температуры T , компоненты горизонтального ветра u_x , высоты отражения $z_{отр}$. Экспериментально полученной дальности регистрации 85.5 км акустических волн от вибратора ЦВ-100 (рис.2) приблизительно соответствуют характеристики атмосферы, представленные на рис.4а. При этом наблюдается согласие с данными практической регистрации акустических волн в зоне оз. Байкал (рис.4б).

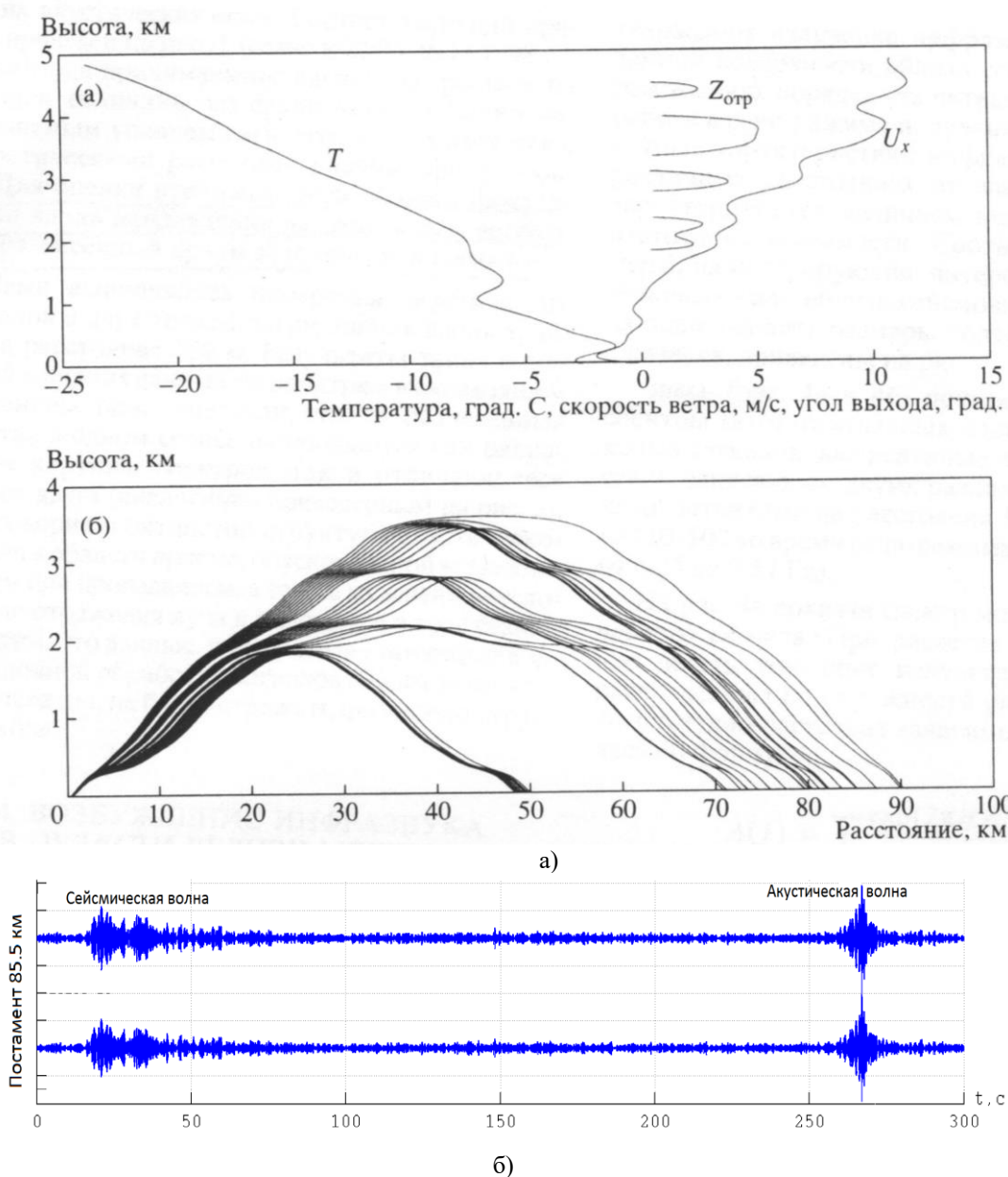


Рисунок 4 - Вычисленные высотные профили и акустические волны

а)-высотные (в км) профили температуры T , компоненты горизонтального ветра u_x (м/с) по данным радиозонда, высоты отражения $Z_{отр}$;

б)- акустические волны от вибратора ЦВ-100 (оз. Байкал) на удалении 85.5 км с временем вступления 262 сек.

Заключение

Рассмотрены и проанализированы вопросы взаимодействия смежных волновых полей в геофизике- сейсмо-гидроакустических, метео-акустических. Теоретически рассмотрены условия оптимизации процессов взаимодействия и приведены результаты их проявления в натуральных экспериментах.

Полученные результаты имеют практическую значимость для решения задач геоэкологии, морской сейсморазведки на шельфах и др. прикладных задач.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ -грант№ 20-07-00861-а

Литература

1. Alekseev A.S., Glinskii B.M., Dryakhlov S.I., Kovalevskii V.V., Mikhailenko B.G., Pushnoi B.M., Fatianov A.G., Khairtdinov M.S., Shorokhov M.N., The effect of acoustoseismic induction at vibroseismic sounding. Dokl. Akad. nauk, vol.346, no. 5, 1996, pp.664–667.
2. Marat S. Khairtdinov, Valery V. Kovalevsky, Gulnara M. Shimanskaya, Galina F. Sedukhina and Alexander A. Yakimenko. ACTIVE MONITORING TECHNOLOGY IN STUDYING THE INTERACTION OF GEOPHYSICAL FIELDS. // Active Geophysical Monitoring. Elsevier (Second Edition), Chapter 3.3, 2020. P. 207-222. ISBN: 978-008102684-7
3. Glinskii B.M., Kovalevsky V.V., Khairtdinov M.S. Relationship of wave fields from powerful vibrators with atmospheric and geodynamic processes. Russian Geology and Geophysics 40 (3), 422-431.
4. Khairtdinov M.S., Poller B.V., Borisov B.D., Britvin A.V. Acoustooptical Interaction on Infrasound in Problems of Laser Ecological Monitoring. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2020, 56(6), p.p. 634-641
5. Robert J. Urick. Principles of Underwater Sound. McGraw-Hill, Book Company, 1975. P. 445.
6. Хайретдинов М.С., Воскобойникова Г.М., Ковалевский В.В., Седухина Г.Ф., Якименко А.А. Сейсмоакустические волны сейсмодвижителей в системе литосфера-атмосфера. // Вестник Национального ядерного центра Респ. Казахстан. Вып. 2 (74). 2018. С. 44-48.
7. Л.М. Бреховских, Ю.П. Лысанов. Теоретические основы акустики океана. Л.: Гидрометеиздат, 1982, 264 с.
8. Л.М. Бреховских. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973, 343 с.
9. Razin A.V. On Propagation of sound in an inhomogeneous moving atmosphere. Izv. Akad. nauk SSSR. Physics of Atmosphere and Ocean. 1982, vol. 18, no. 6, pp. 674-676.

ПОВЫШЕНИЕ ДАЛЬНОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ТРАНСПОРТНЫХ ШУМОВ

Копылова О.А., Доброродный В.И.*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, * Тюменское высшее
военно-инженерное командное училище им. маршала инженерных войск А.И. Прошлякова
+7 (383) 330-87-43, oksana@org.sccc.ru

Статья посвящена исследованию проблемы повышения дальности обнаружения подвижных источников транспортных шумов на основе данных записей сейсмических колебаний в земле и акустических в атмосфере. В качестве примеров в статье рассматривается железнодорожный, тяжелый гусеничный и колесный виды транспорта. Предлагается решение проблемы на основе предварительной полосовой фильтрации и квадратурного алгоритма обработки техногенных шумов. Выполнен статистический анализ частотно-временных спектров с целью определения характерных частотных характеристик для тяжелого транспорта в зависимости от скорости движения и дальности. Полученные результаты позволяют в дальнейшем сформулировать требования для решения задач распознавания транспортных объектов нейросетевыми методами.

Ключевые слова: сейсмические и акустические колебания, обнаружение транспорта, полосовая фильтрация, квадратурный анализ, транспортные шумы, сейсмический вибрационный источник.