

THE GEOINFORMATION TECHNOLOGY OF ACTIVE MONITORING IN THE STUDY INTERACTION OF GEOPHYSICAL FIELDS

M. S. Khairtdinov, V. V. Kovalevsky, G. M. Voskoboinikova, G. F. Sedukhina

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
630090, Novosibirsk, Russia

*Novosibirsk State Technical University,
630092, Novosibirsk, Russia

The problem of predicting the geoecological effect of various technogenic explosions, namely, short-delay quarry blasts, test site ones, falling rocket stages etc., on the natural environment and social infrastructure is of primary importance. Mass explosions that have been made recently for the purpose of eliminating the utilizable ammunition stock are a serious hazard. Powerful natural explosions include, first of all, eruptions of magmatic and mud volcanoes and falls of celestial bodies. It is well-known that the major geoecological effects of explosions are due to the formation of air-shock and underground seismic waves, formation and propagation of dust clouds and electric pulses. Investigation of the seismic and acoustic effects of mass explosions damaging industrial and residential objects and the shock action on bio-objects is of greatest interest. Such effects were considered earlier. Nevertheless, it should be noted that the dependence of these effects on external factors, such as the wind direction and velocity, temperature inversion, atmospheric turbulence, and the surrounding area relief and landscape, has been poorly studied. This is all the more important since the influence of such factors can greatly enhance the destructive ecological action of explosions on the environment. It is proved that meteo-dependent processes of propagation of infrasound from explosions in the atmosphere can enhance many times the ecological loading on the social and natural environments.

Taking into account the above factors, it is necessary to predict the geoecological risk of powerful explosions, which calls for additional investigations of the physical effects of propagation of seismic and acoustic waves from mass explosions. The objective of this paper is to present a methodological approach to carrying out such investigations and obtaining experimental and numerical results. The approach being proposed is based on seismic vibrators as sources imitating explosions, but having, in contrast to them, a much smaller power. In this case, as compared to explosions, ecological cleanness and repeatability of experiments are achieved. This is due to a high-precision power and frequency-temporal characteristics of vibrational sources. The approach proposed to prediction with seismic vibrators was used because of the ability of vibrators to simultaneously generate both seismic and acoustic oscillations. This was proved earlier both theoretically and in numerous experiments for this class of sources. The use of the approach of active monitoring of the natural environment makes it possible to achieve ecological purity, high repeatability and precision accuracy of the measurement parameters being estimated.

As an integral characteristic in studying the destructive properties of infrasound from explosions for the environment, we take the specific acoustic energy density. Admissible acoustic effects on objects of social infrastructure are determined by the specific energy density values.

The determining factor for acoustic energy density values is the wave pressure. The acoustic pressure is a function of many parameters determined by the radiation conditions and the propagation of acoustic oscillations. The multi-factor model of integral pressure can be described by the energy balance equation,

which includes: the pressure at the recording point at distance r from the source; the frequency-dependent acoustic pressure of the vibrator; the absorption of infrasound depending on the distance determined by the inhomogeneity of the atmosphere and the state of the Earth's daily surface; the pressure at the recording point as a function of meteorological parameters: the pressure resulting from the spherical divergence of the wavefront. In general case obtaining of estimates of integral pressure in analytical form is difficult, since there are no full a priori data about the meteorological conditions along the long propagation path of acoustic oscillations. There are also factors due to the peculiarities of absorption of the energy of acoustic oscillations caused by the presence of forested areas, snow cover, and geological irregularities of the Earth's daily surface (hills, mountains, etc.) along the long propagation path of acoustic oscillations.

One way to avoid prior uncertainty is obtaining the estimates of integral pressure in experiments with seismic vibrators as emitters of infralow-frequency acoustic oscillations. The both (analytical and experimental) variants are considered in the present paper. The results of the works are illustrated by data of numerous experiments and numerical calculations.

Key words: geoinformation technology, acousto-seismo-meteo fields, interaction, seismic vibrators, technogenic and natural explosions, geoeological risk, prediction.

References

1. Adushkin V. V., The main influencing factors of open cast mining on the environment // Gornyzhurnal. 1996. N 4. P. 49–55.
2. Adushkin V. V., Spivak A. A., Solov'yov S. P. Geoeological consequences of mass chemical explosions in quarries // Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya. 2000. N 6. P. 554–563.
3. Khairtdinov M. S., Avrorov S. A. Detection and recognition of explosion sources // Vestnik NYATS RK (NNC RK Bulletin). June 2012. I. 2. P. 17–24.
4. Modern and Holocene volcanism in Russia. Ed. By Laverov N. P. Moscow: Nauka, 2005.
5. Alekseev A. S., Glinskii B. M., Kovalevskii V. V., Khairtdinov M. S. et al. Active seismology with powerful vibrational sources / man. ed. G.M. Tsibulchik. Novosibirsk: ICM&MG SB RAS, „Geo“ Br. of the SB RAS Publ. House, 2004.
6. 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. 1996. V. 346. N 5. P. 664–667.
7. Zaslavskii Yu. M. Radiation of seismic waves by vibrational sources. Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod, 2007.
8. Alekseev A. S., Glinskii B. M., Kovalevsky V. V., Smagin S. I., Fatianov A. G. et al. Methods for direct and inverse problem of seismology, electromagnetism and experimental investigations in problems of studying geodynamic processes in the Earth's crust and upper mantle / Editors-in-Chief: Academician Mihajlenko B. G., academician Epov M. I., 2010.
9. 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. N 40 (3). P. 422–431.
10. Gulyev V. T., Kuznetsov V. V., Plotkin V. V., Khomutov S. Yu. Infrasound generation and propagation in the atmosphere during operation of high-power seismic vibrators // Izv. Akad. Nauk SSSR. Physics of Atmosphere and Ocean. 2001. V. 37. N 3. P. 303–312.
11. Brekhovskikh L. M. Waves in layered media. Moscow, Nauka, 1973.
12. Razin A. V. On Propagation of sound in an inhomogeneous moving atmosphere // Izv. Akad. nauk SSSR. Physics of Atmosphere and Ocean. 1982. V. 18. N 6. P. 674–676.

13. Gubarev V. V., Kovalevskii V. V., Khairtdinov M. S., Avrorov S. A., Voskoboinikova G. M., Sedukhina G. F., and Yakimenko A. A. Prediction of Environmental Risks from Explosions Based on a Set of Coupled Geophysical Fields // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2014. Vol. 50. N 4. P. 3–13.
14. Khairtdinov M. S., Kovalevsky V. V., Voskoboynikova G. M., Sedukhina G. F. Estimation of meteodependent geoecological risks from explosions by means of seismic vibrators // Seismic technologies. 2016. N 3. P. 132–138.
15. Isakovich M. A. General Acoustics. Moscow: Nauka, 1973.

ВИБРАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ АКТИВНОГО МОНИТОРИНГА В ИЗУЧЕНИИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ

М. С. Хайретдинов, В. В. Ковалевский, Г. М. Воскобойникова, Г. Ф. Седухина

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН
630090, Новосибирск, Россия

*Новосибирский государственный технический университет
630092, Новосибирск, Россия

УДК 534:621.382

Рассматривается проблема изучения взаимодействия геофизических полей разной природы на основе предложенного авторами вибро-сейсмо-акустического метода зондирования природной среды. Обосновывается применимость подхода для предсказания геоэкологических рисков, порождаемых техногенными и природными взрывами. В качестве основных источников зондирования при этом используются маломощные в сравнении с мощными взрывами сейсмические вибраторы, что определяет их высокую экологичность в решении задач активного мониторинга природной и техногенной среды. Приводятся результаты исследований по изучению взаимодействия сейсмических, акустических и метео полей с приложением к решению задачи оценивания геоэкологических рисков для социальной среды. Результаты исследований обосновываются теоретически и экспериментально.

Ключевые слова: акусто-сейсмические поля, метеополь, геоинформационная технология, фундаментальные взаимодействия, сейсмические вибраторы, техногенные и природные взрывы, геоэкологические риски, прогнозирование, экспериментальные исследования.

Введение. Многие природные и техногенные процессы сейсмической природы сопровождаются образованием сопряженных процессов в атмосфере. В первую очередь это касается образования акустических полей. В качестве примера на рис. 1 процесс акустического возмущения атмосферы иллюстрируется по отношению к трем разным источникам — техногенному землетрясению (эпицентр — угольный разрез „Бачатский“, дата 19.06.2013, магнитуда 5.3–5.6), сеймовибратору ЦВ-40, полигонным взрывам малой мощности. Приведенные записи отражают процесс образования акустических волн, сопровождающих процессы излучения сейсмических волн. При этом уровни акустических волн в отдельных случаях сопоставимы, а иногда выше уровней сейсмических. В первую очередь это относится к поверхностным взрывным источникам (рис. 1, с). Это определяет необходимость учета акустических волн наряду с сейсмическими в задачах активного геофизического мониторинга окружающей среды. С точки зрения требования экологической чистоты процесса мониторинга в качестве источников для этих целей наиболее подходящими являются низкочастотные сейсмические вибраторы, которые изначально были созданы для глубинного вибрационного зондирования Земли (ВПЗ). У истоков становления и развития работ по этой проблеме стояли А. С. Алексеев, А. В. Николаев, И. С. Чичинин [1–4].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-07-01052 а, 17-07-00872а, 18-47-540006 р_а

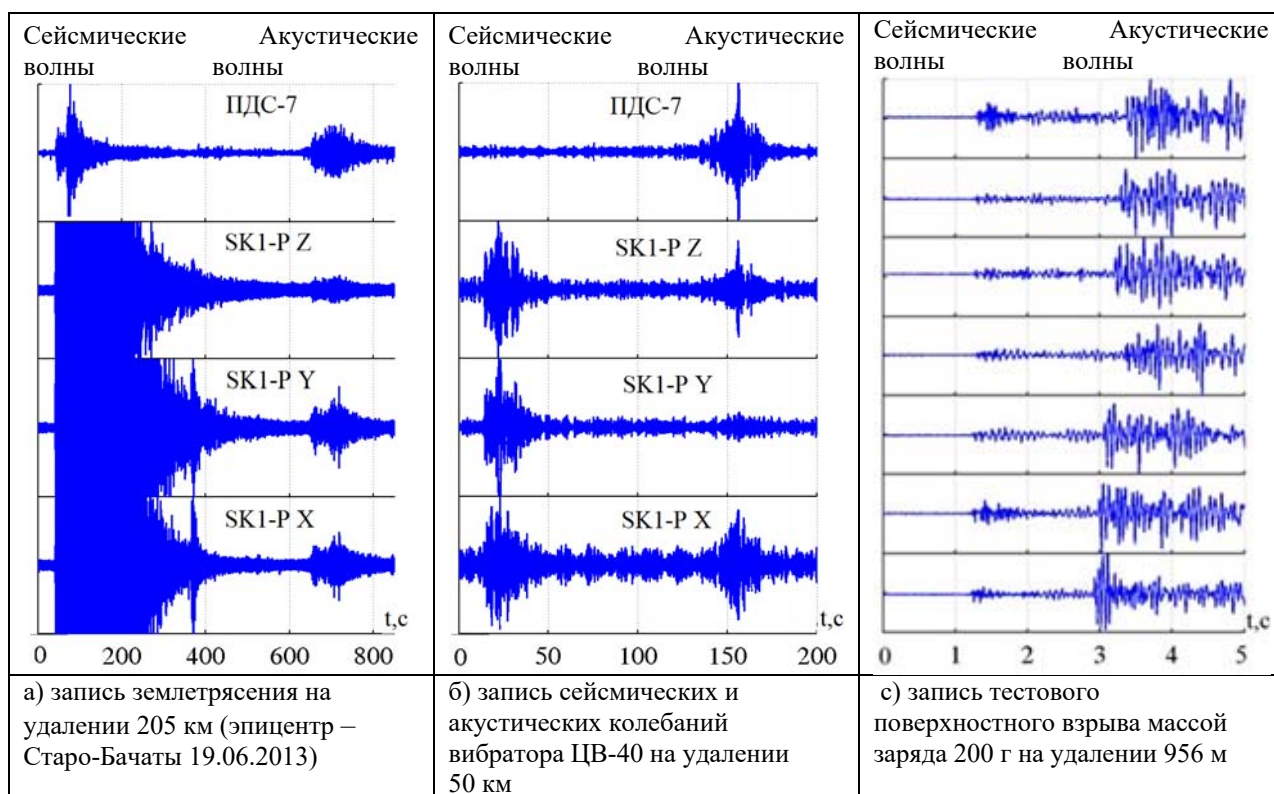


Рис. 1. Записи сейсмических и акустических волн от разного класса источников

В развитие работ теоретически и экспериментально показано, что сейсмические вибраторы наряду с излучением сейсмических волн одновременно излучают акустические волны инфразвуковых частот [5, 6], что определяет их уникальность в качестве источников активного акустического зондирования воздушной среды. В таком качестве они не имеют аналогов в мире. Указанное свойство источников позволяет проводить исследования по решению ряда экологических задач, связанных с воздействием акустических колебаний, в частности, инфразвука на социальную инфраструктуру и человека. При этом подразумеваются геоэкологические риски как один из факторов воздействия. Выбор сейсмических вибраторов в качестве инструментария акустического зондирования атмосферы определяет необходимость изучения параметров процесса дальнего распространения акустических волн, а также образующихся при этом метеозависимых физических явлений. К числу последних относится явление пространственной фокусировки акустических волн. В связи с этим в работе приводятся результаты исследований по этим направлениям.

1. Генерация и распространение акустических волн от сейсмического вибратора. 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 $v_p = \sqrt{3}v_s$. В этом случае акустическая мощность излучения в атмосферу и мощность излучения продольной сейсмической волны соответственно составят [6]: $W^a = 3,16 \cdot \rho_a F^2 \omega^2 / \pi \rho_p^2 v_p^3$, $W^p = 0,085 F^2 \omega^2 / \pi \rho_p v_p^3$. 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 $W^p = 1500$ Вт, $W^a = 30$ Вт.

Таким образом, акустическая мощность излучения составит лишь 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 [7–8]. Это объясняется тем, что акустические волны в атмосфере затухают в меньшей степени в сравнении с сейсмическими волнами в земле, обладающей более выраженной неоднородностью геофизического строения. Дальнему распространению акустических волн способствует ряд других благоприятных физических факторов: приземное распространение акустического волнового фронта благодаря явлению температурной инверсии, связанному с образованием низкотемпературного слоя воздуха у поверхности земли при переходе от холодной ночи к теплему дню [9]; метеофакторная зависимость, обуславливающая возрастание скорости распространения акустической волны и акустического давления при совпадении направлений распространения акустического волнового фронта и ветра. Сюда же следует отнести метеозависимость от влажности. Для этих факторов с учетом [9] зависимость акустического давления, которое несет в себе волновой фронт, может быть представлена в виде

$$p = \frac{\rho}{\gamma}(331 + 0,6t + 0,07e + w_0 \cos \varphi)^2. \quad (1)$$

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 постоянном давлении (C_p) и при постоянном объеме (C_v).

Дальнему распространению акустических волн на большие расстояния способствует явление отражения акустических волн от верхних слоев атмосферы. На рис. 2 приводятся 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 [8]. На рис. 2, а, представлены высотные профили температуры T (°С), компоненты горизонтального ветра Ux (м/с) вдоль направления источник–приемник. Как следует из расчетов, уверенная регистрации отраженных акустических волн может происходить на дальностях в районе 50 и 100 км от источника. Это объясняет принципиальную возможность регистрации слабых акустических волн на больших дальностях.

Экспериментальным подтверждением этого вывода являются результаты одновременной регистрации и обработки сейсмических и акустических волн с помощью взаимокорреляционной свертки [4] продолжительных во времени сейсмических и акустических колебаний (рис. 3) от центробежного вибратора ЦВ-40 на линейном профиле протяженностью 100 км (рис. 4).

В свертке в качестве опорного используется сигнал, повторяющий по форме зондирующий сигнал вибратора в диапазоне частот 6,25–9,57 Гц. На рис. 3 представлены результаты свертки для удалений 0,2, 10, 48, 90 км. Расстояния помечены слева от рисунка. На удалениях 0,2, 10, 90 км видны результаты выделения акустических волн. На удалении 48 км каналы трехкомпонентного сейсмического датчика x , y , z на времени 8,27 с иллюстрируют вступления продольных сейсмических волн, а на времени 146 с — акустических волн. Соответствующий линейный профиль регистрации обоих типов волн протяженностью 100 км представлен на рис. 4.

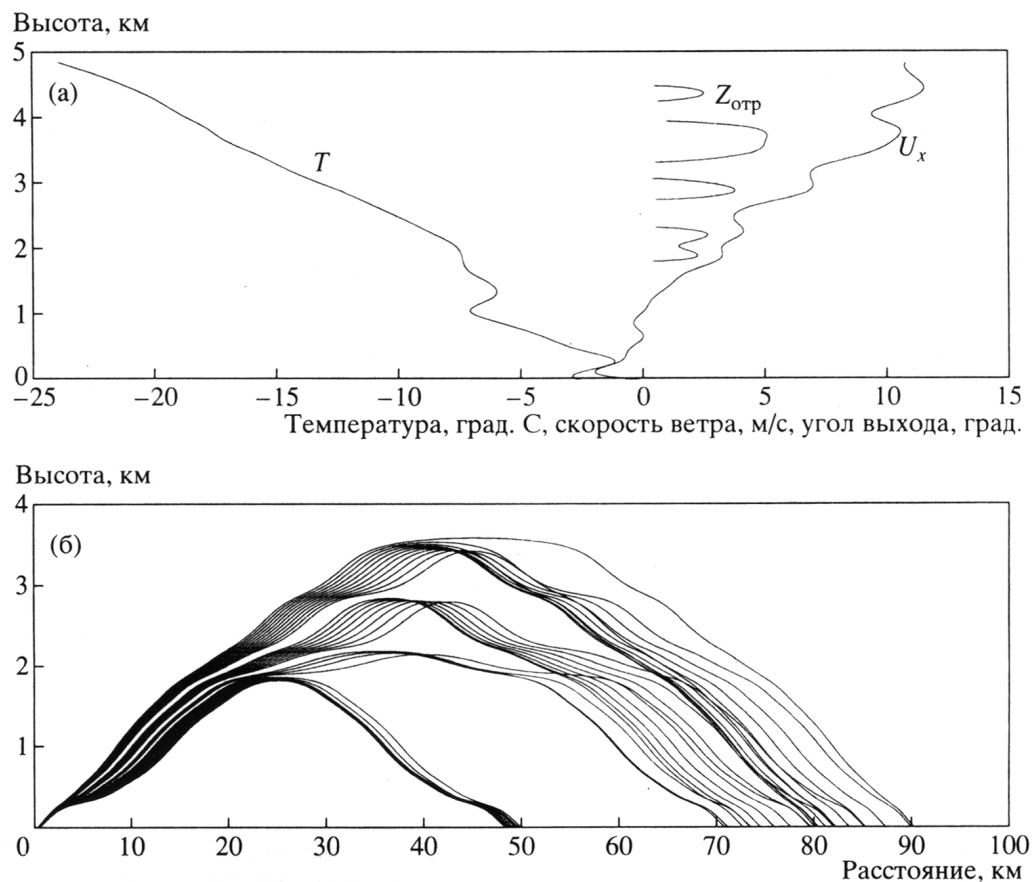


Рис. 2. а) высотные (в км) профили температуры T , компоненты горизонтального ветра u_x (м/с) по данным радиозонда (для 5 ч 30 мин местного времени, летнее время), высоты отражения $z_{отр}$; б) траектории инфразвуковых волн

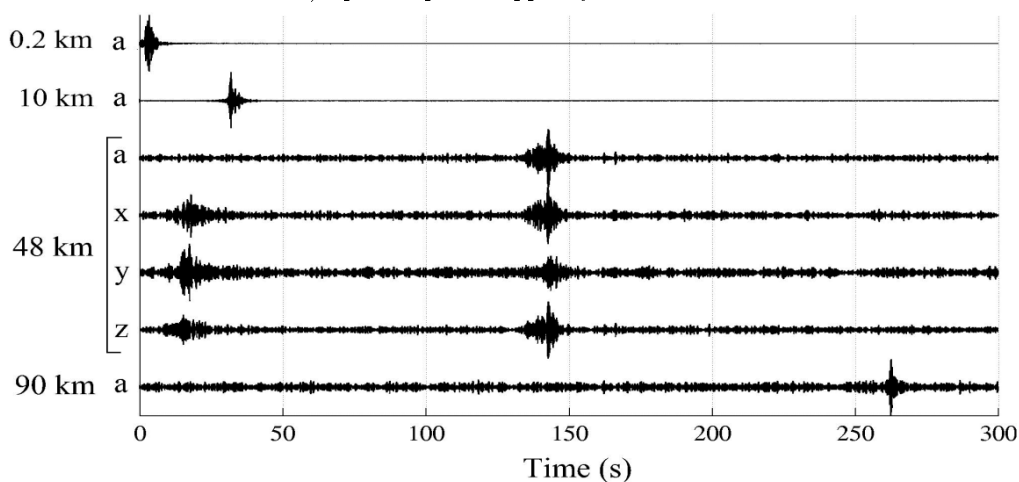


Рис. 3. Результаты экспериментов по выделению волн от сейсмического вибратора ЦВ-40 на удалениях 0,2, 10, 48, 90 км: а — акустические волны; на удалении 48 км для компонент x , y , z сейсмического датчика время 8,27 с соответствует вступлению продольных сейсмических волн, а время 146 с — приходу акустических волн

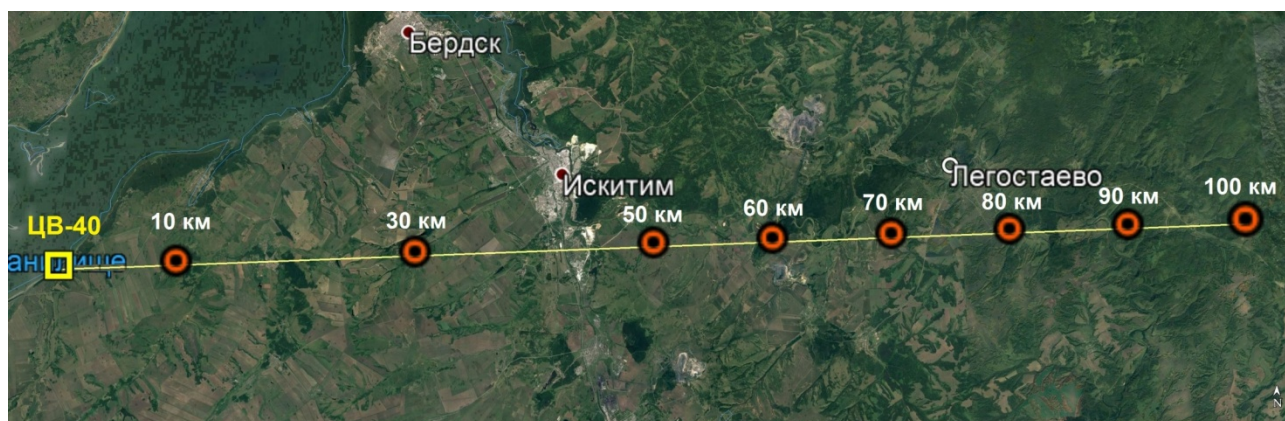


Рис. 4. Линейный профиль регистрации сейсмических и акустических сигналов

С учетом полученных данных экспериментов на графиках рис. 5 в логарифмическом масштабе приведены нормированные значения уровней акустических и сейсмических волн, а также шумов, полученных в отдельных точках регистрации. Графики уровней волн нормированы по отношению к уровню вблизи вибратора на удалении 200 м. Как следует из экспериментальных данных, усредненное ослабление силы звука I в пределах 100 км составляет 4 порядка, т.е. в децибелах это составит: $D = 10 \lg 10^4 = 40$ дБ. Соответственно, относительное затухание составит 0,4 дБ/км. Принимая во внимание, что вследствие геометрического расхождения сила звука убывает обратно-пропорционально квадрату расстояния от источника, в данном случае в 100^2 раз (40 дБ), приходим к выводу о том, что на инфранизких частотах ослабление звука по расстоянию практически определяется указанным фактором. Это означает, что в этом случае поглощение акустической энергии в атмосфере играет менее существенную роль. Это определяет ценность применения инфранизких частот для решения ряда практических задач геофизического мониторинга, в частности, в изучении проблемы взаимодействия геофизических полей, рассматриваемой в данной работе.

Теоретический логарифмический коэффициент затухания оценивается в виде: $\alpha = (10 \lg I_2 - 10 \lg I_1) / (r_2 - r_1)$, где I_1, I_2 — интенсивности звука на расстояниях r_1, r_2 соответственно. В то же время коэффициент α имеет квадратичную зависимость от частоты, т.е. $\alpha \sim f_2$. Это означает, что при переходе с частоты зондирования атмосферы от 10 Гц до 100 Гц уровень ослабления акустической волны в одной и той же точке составит два порядка, т.е. 100 раз. С учетом обоих рассмотренных факторов очевидно преимущество работы на инфранизких частотах для изучения взаимодействий геофизических полей на значительных (много больше длины волны) удалениях от источника.

Метеозависимые факторы распространения акустических волн обуславливают развитие практически важного явления пространственной фокусировки акустических колебаний в атмосфере [10, 11, 12, 13]. Описывается такое явление с помощью *фактора фокусировки* [10], равного отношению интенсивности инфразвука в неоднородной движущейся среде к интенсивности его в безграничной неподвижной среде:

$$f = I[z, \theta, \phi] / I_0, \quad (2)$$

где сферические углы θ (зенитный угол) и φ (азимут) характеризуют начальное направление луча от источника по отношению к вертикальной координате z и горизонтальной

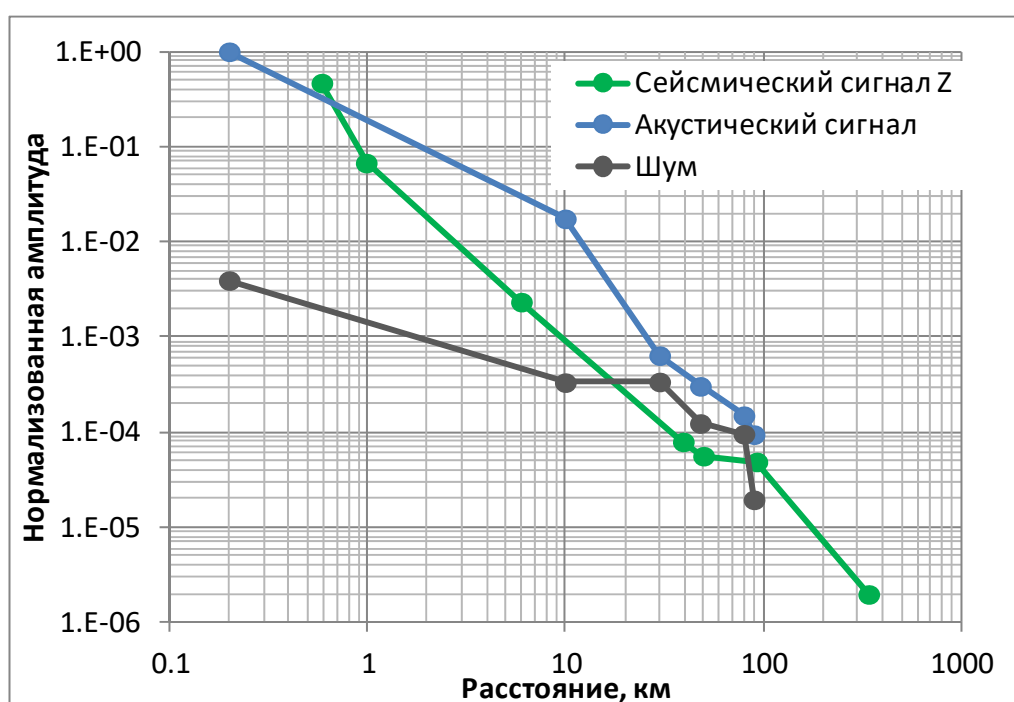


Рис. 5. Графики затухания акустических и сейсмических волн по дальности

оси x соответственно [2, 3]. При этом направление последней совпадает с направлением ветра. Для оценивания параметров явления пространственной фокусировки экспериментально получены графики (рис. 6) азимутальной зависимости акустического давления для случаев круговой расстановки датчиков и источника в центре круга: график 1 — для вибратора ЦВ-40 и радиуса круга 6 км; график 2 — для взрыва с тротильным эквивалентом 125 кг и радиуса круга 10 км. Значения давлений от взрыва приведены на оси ординат слева, для вибратора — справа. Максимумы приведенных зависимостей соответствуют случаям совпадения направлений фронта распространения волны и ветра и в конечном итоге характеризуют направление главного удара инфразвуковой волны на окружающие объекты. Полученные графики характеризуют явно выраженную зависимость акустического давления от соотношения обоих азимутальных направлений. Количественно эффект направленности характеризуется шириной раскрытия функции направленности в азимутальном направлении, отсчитываемой на уровне 0,7 от максимального значения. По отношению к вибратору его значение составляет 60 град. С учетом приведенного перераспределения акустического давления по пространству следует важный вывод, что воздействие инфразвука даже от маломощных взрывов может становится экологически опасным вследствие метеозависимого многократного увеличения потока энергии в определенном направлении. В частности, график 1 иллюстрирует соотношение максимального и минимального значений давлений, равного 50.

С помощью сейсмических вибраторов — гидрорезонансного типа ГРВ-50 [4] — выполнены эксперименты по регистрации феномена температурной инверсии в приземном низкотемпературном слое воздуха в утренние часы при переходе с ночи ко дню. Эксперименты выполнялись с применением излучений сейсмических и акустических колебаний

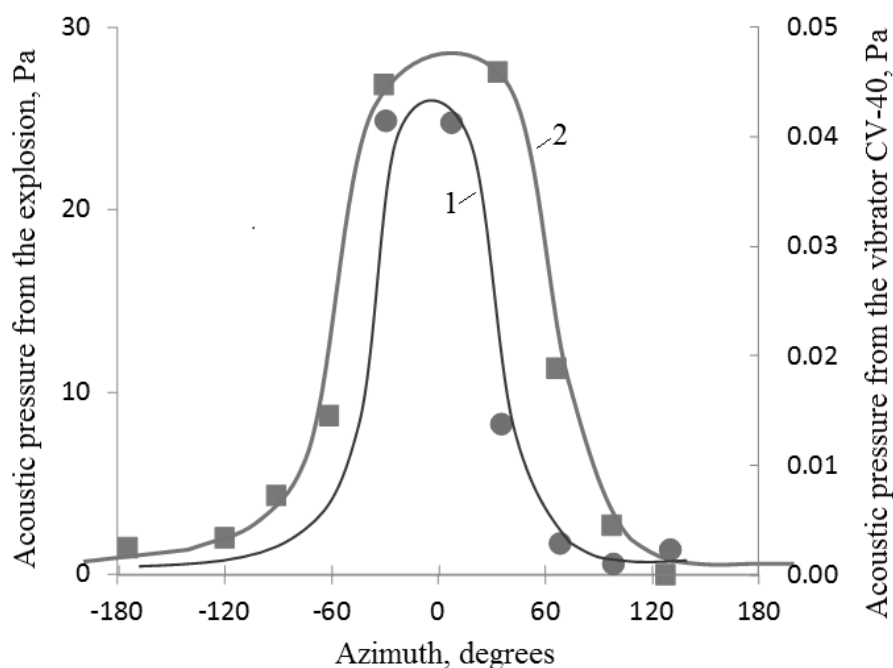


Рис. 6. Азимутальная зависимость акустического давления для круговой расстановки датчиков и источника в центре круга: график 1 — для вибратора ЦВ-40 и радиуса круга 6 км; график 2 — для взрыва с тротиловым эквивалентом 125 кг и радиуса круга 10 км

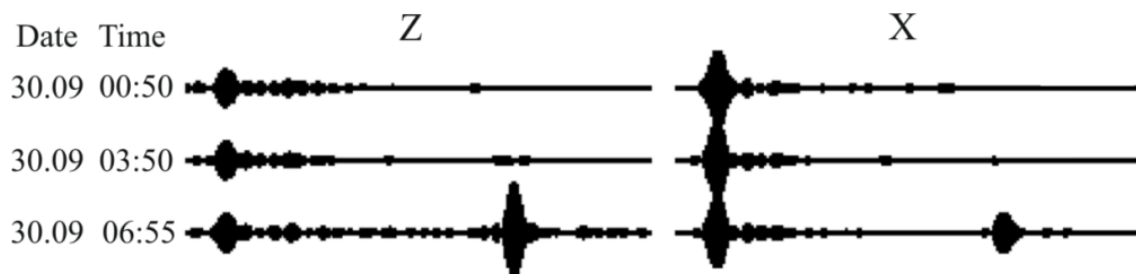


Рис. 7. Записи сейсмических и акустических волн в ночное и утреннее время, излучаемых вибратором ГРВ-50 в диапазоне частот 3–7 Гц на удалении 20 км от источника. Первые вступления волн (на 4–6 с) соответствуют сейсмическим волнам, на 58–59 с — акустическим волнам

в диапазоне частот 3–7 Гц и расстоянии „источник–приемник“ 20 км. Частный результат такого эксперимента представлен на рис. 7.

Здесь представлены зарегистрированные сейсмические волны на компонентах Z, X на временах прихода волн 4–6 с и акустической волны на времени вступления 60 с. Слева от записей представлены дата и ночные и утренние часы. Как видно из записей, возникновение акустической волны происходит при смене ночи и дня (в данном случае на времени 6 час 55 мин). Таким образом, хорошо прослеживается проявление явления температурной инверсии в приземном слое воздуха.

Влияние влажности воздуха на уровни акустических колебаний оценивалось в серии экспериментов с вибратором ЦВ-40 на удалении 50 км. Диапазон частот зондирующих

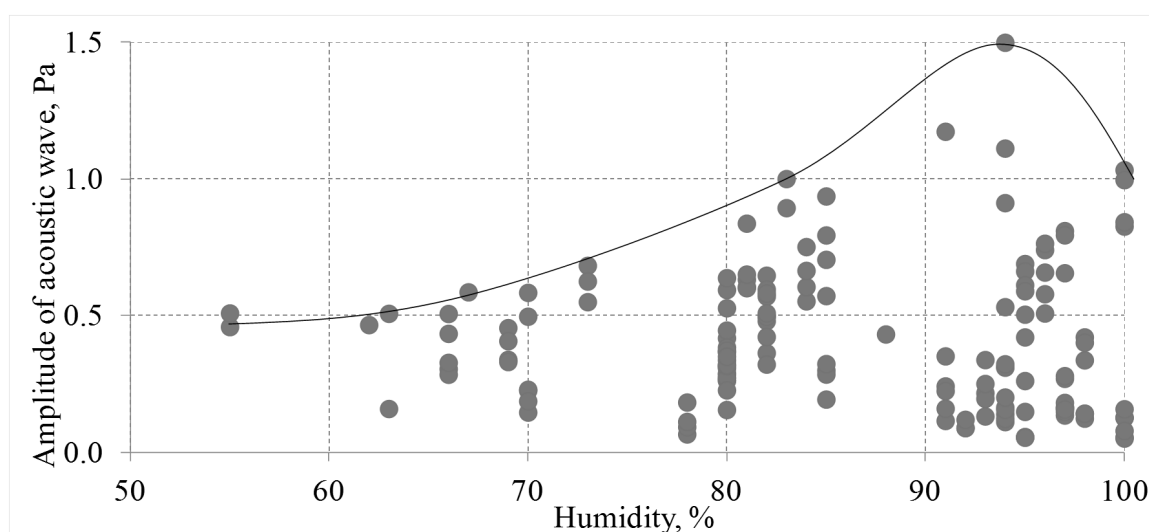


Рис. 8. Уровни акустических колебаний вибратора СВ-40 в зависимости от влажности на удалении 50 км

колебаний в этом случае составил 6,25–11,23 Гц. На рис. 8 представлено множество измеренных значений акустического давления в зависимости от влажности.

Кривая максимальных значений акустического давления характеризует 2–3-кратное возрастание его до 95 %, после чего происходит спад. Спад может быть объяснен нарастающей плотностью влажности в воздухе, что вызывает повышенное рассеяние и поглощение акустической энергии.

Заключение. Рассмотрена проблема взаимодействия геофизических полей разной природы на основе предложенного авторами вибро-сейсмо-акустического метода зондирования природной среды в системе литосфера–атмосфера.

Теоретически и экспериментально обоснована применимость подхода для предсказания геоэкологических рисков, порождаемых техногенными и природными взрывами. Приводятся результаты исследований по изучению взаимодействия сейсмических, акустических и метеополей с приложением к решению задачи оценивания геоэкологических рисков для социальной среды.

В качестве основных источников зондирования используются маломощные в сравнении с мощными взрывами сейсмические вибраторы, что определяет их высокую экологичность и высокую повторяемость результатов экспериментов в решении задач активного мониторинга природной и техногенной среды.

Список литературы

1. Николаев А. В., Артюшков Е. В., Чичинин И. С., Троицкий П. А., Галкин И. Н. Вибрационное просвечивание Земли. Институт физики Земли АН СССР, деп. № 2549, М.; 1974.
2. Алексеев А. С., Ряшенцев Н. П., Чичинин И. С. Как заглянуть в глубь планеты // Наука в СССР. 1982. № 3. С. 31–37.
3. Алексеев А. С., Глинский Б. М., Ковалевский В. В., Хайретдинов М. С. Активные методы сейсмических исследований с мощными вибрационными источниками / Сб. Современные проблемы сейсмологии. Изд. Вузовская книга. М. 2000. С. 1–20.

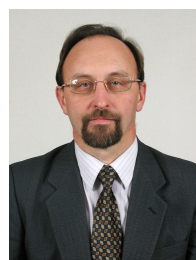
4. Алексеев А. С., Глинский Б. М., Ковалевский В. В., Хайретдинов М. С., Чичинин И. С. и др. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками. Издательство СО РАН „Гео“, Новосибирск, 2004.
5. Алексеев А. С., Глинский Б. М., Дряхлов С. И., Ковалевский В. В., Михайленко Б. Г., Пушной Б. М., Фатьянов А. Г., Хайретдинов М. С., Шорохов М. Н. Эффект акустосейсмической индукции при вибросейсмическом зондировании // Докл. РАН. 1996. С. Т. 346. № 5. С. 664–667.
6. Заславский Ю. М. Излучение сейсмических волн вибрационными источниками. Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 2007.
7. Хайретдинов М. С., Ковалевский В. В., Воскобойникова Г. М., Седухина Г. Ф., Якименко А. А. Сейсмоакустические волны сеймовибраторов в системе литосфера-атмосфера // Вестник НЯЦ РК. 2018. Вып. 2, С. 44–49.
8. Гуляев В. Т., Кузнецов В. В., Плоткин В. В., Хомутов С. Ю. Генерация и распространение инфразвука в атмосфере при работе мощных сеймовибраторов // Изв. АН СССР: Физика атмосферы и океана. 2001. Т. 37. № 3. С. 303–312.
9. Исакович А. М. Общая акустика. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1973.
10. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973.
11. Razin A. V. On Propagation of sound in an inhomogeneous moving atmosphere // Izv. Akad. nauk SSSR. Physics of Atmosphere and Ocean. 1982. V. 18. N 6. P. 674–676.
12. Gubarev V. V., Kovalevskii V. V., Khairtdinov M. S., Avrorov S. A., Voskoboinikova G. M., Sedukhina G. F., and Yakimenko A. A. Prediction of Environmental Risks from Explosions Based on a Set of Coupled Geophysical Fields // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2014. V. 50. N 4. P. 3–13.
13. Хайретдинов М. С., Ковалевский В. В., Воскобойникова Г. М., Седухина Г. Ф. Оценивание метеозависимых геоэкологических рисков от взрывов с помощью сейсмических вибраторов // Технология сейсморазведки. 2016. № 3. С. 132–138.



Хайретдинов Марат Саматович — главный научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Профессор Новосибирского государственного технического университета. Канд. техн. наук, 1972, доктор техн. наук, 1994. Автор и соавтор более 250 научных работ, в том числе 5 монографий, 10 изобретений. Область научных интересов: геофизическая информатика, распространение и взаимодействие геофизических и оптических волновых полей, информационные сети и системы, статистическая обработка и распознавание сигналов. e-mail: marat@opg.sscc.ru.

Khairtdinov Marat Samatovich — principal research scientist of Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, professor of Novosibirsk State Technical University. Candidate of sciences degree, 1972, doctor of sciences degree, 1994. Author and co-author of 250 scientific

papers, including 5 monographs. Research Interests: geophysical informatics, propagation and interaction of geophysical and optical wavefields, information networks and systems, statistical processing and recognitionsignals.



Ковалевский Валерий Викторович — д-р. техн. наук, Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, заместитель директора по научной работе, главный научный сотрудник лаборатории геофизической информатики, e-mail: kovalevsky@sscc.ru, тел.: +7 383 330-71-96.

Валерий Ковалевский окончил с отличием физический факультет Новосибирского государственного университета в 1975 г. С 1976 г. — сотрудник Института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН. В Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН работает с 1986 г. В 1986 г.

защитил кандидатскую диссертацию, а в 2006 г. докторскую диссертацию по специальности 05.13.18. — „Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ“. Область научных интересов: математическое моделирование и экспериментальные исследования в активной сейсмологии, вибросейсмические методы зондирования Земли и мониторинга геодинамических процессов, информационные технологии в геофизических исследованиях. Автор и соавтор более 150 научных работ, в том числе 5 монографий, 10 изобретений.

Valeriy Kovalevsky — Dr. Tech. Sci., Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Deputy Director for Research, Chief Researcher, Laboratory of Geophysical Informatics, e-mail: kovalevsky@sscc.ru, tel .: +7 383 330-71-96. **Valeriy Kovalevskiy** graduated with honors Physics Department of the Novosibirsk State University in 1975. From 1976 — researcher at Institute of Hydrodynamics M. A. Lavrentyeva SB RAS. He has been working at the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the SB RAS since 1986. Ph. D. degree in Technical Science (1986). Doctor of Technical Sciences degree (2006) on the specialty 05.13.18. — „Mathematical modeling, numerical methods and program complexes“. Research interests: mathematical modeling and experimental research in active seismology, vibroseismic methods of Earth's sounding and monitoring of geodynamic processes, information technology in geophysical research. Author and co-author of more than 150 scientific papers, 10 inventions.



Воскобойникова Гюльнара Маратовна — научный сотрудник Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Канд. техн. наук, 2015. Автор более 70 научных работ.

Научные интересы: геофизическая информатика, численное моделирование, геофизические волновые процессы и их взаимодействие, статистическое обнаружение, дискретная оптимизация, апостериорные алгоритмы, динамическое программирование. e-mail: gulya@opg.sssc.ru.

Voskoboinikova Gyulnara M. Research scientist of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS. Phd. Degree, 2015.

Author and co-author of over 70 scientific papers. Research interests: Geophysical informatics, numerical simulation, geophysical wave processes and interactions, statistical detection, discrete optimization, a posteriori algorithms, dynamic programming. e-mail: gulya@opg.sssc.ru.



Седухина Галина Федоровна — научный сотрудник лаборатории геофизической информатики ИВМ и МГ СО РАН, e-mail: galya@opg.sssc.ru.

Segukhina G. F. — research scientist of Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS. She has 53 scientific works.

Дата поступления — 29.08.2018