

## ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ШУМОВ

*О.А. Копылова, М.С. Хайретдинов, Г.М. Шиманская*

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск  
oksana@opg.sccc.ru, marat@opg.sccc.ru, gulya@opg.sccc.ru

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема геоэкологического мониторинга низкочастотных техногенных акустических шумов и сейсмических вибраций. В качестве мощных источников транспортных шумов рассматриваются тяжелый колесный и гусеничный виды транспорта, электропоезда и грузовые поезда. А в качестве объектов производственного характера с повышенным уровнем шумового и вибрационного воздействия на окружающую среду – мощные стационарные сейсмические вибрационные источники, промышленные и карьерные взрывы, проводимые в местах угледобычи.

Исследуются особенности сейсмических и акустических колебаний от указанных выше типов источников. Показано, что частотный спектр их шумов находится в области низких и инфранизких частот, являющихся наиболее экологически опасными. Проведены полевые и численные эксперименты по исследованию влияния метеофакторов на распространение инфразвука. В частности, показана высокая зависимость уровня акустической энергии от направления ветра и влажности воздуха.

**Ключевые слова:** сейсмические и акустические колебания, транспортные шумы, геоэкология взрывных работ, геофизический мониторинг, низкие и инфранизкие частоты, метеозависимость распространения волн.

**Введение.** Проблема оценивания и предотвращения геоэкологических рисков для окружающей среды, связанных с воздействием техногенных шумов разной природы – транспортных, производственных, – является одной из актуальных проблем в области охраны окружающей среды. Степень шумового загрязнения является одним из ключевых факторов, определяющих уровень комфорта жизни людей в городских условиях [1; 2]. Последствия воздействия шума на человека были изучены в работе [3]. Исследованию влияния транспортных колебаний на здания и сооружения посвящены работы [4–7]. Вопросы, связанные с воздействием вибрации от взрывных работ на здания и окружающую среду рассматриваются в трудах [8–10].

Проблема вредного воздействия возрастает в области низких и инфранизких частот. Сильные шумовые колебания и вибрации в данном диапазоне частот представляют серьезную угрозу для здоровья человека и наносят разрушения крупным конструкциям, таким как мосты, здания, производственные объекты и т.д. Это связано с тем, что в диапазоне низких и инфранизких частот находятся электрофизиологические процессы человека: электрическая активность головного мозга, ритм сердца и др. [11; 12], а также находят-

ся собственные частоты колебаний сооружений [6; 13].

Геоэкологическое влияние шумовых источников на окружающую среду обусловлено двумя основными факторами: воздействием сейсмических вибраций и инфразвуковых акустических колебаний, которые распространяются в приповерхностном слое атмосферы. Актуальным здесь является исследование воздействия на человека шумов интенсивного транспортного потока на загруженных городских автодорогах. Такое воздействие может многократно усиливаться под воздействием метеофакторов, прежде всего направления и скорости ветра.

Сказанное выше обуславливает решение задач оценивания количественных пространственно-частотно-временных характеристик разного типа шумов и оценивания их геоэкологических рисков, особенно в области инфранизких частот. Это определяет научную направленность данной работы.

**Постановка задачи.** Воздействие низкочастотных техногенных шумов на окружающую среду обусловлено одновременным возникновением и распространением от различных техногенных источников сейсмических колебаний (вибраций) в земле и акустических в атмосфере.

Количественной мерой возникающих при этом геоэкологических рисков является удельная плотность волновой энергии – акустической:

$$E = \frac{1}{\rho c^0} \int_0^T p^2(t) dt. \quad (1)$$

Здесь  $\rho c$  – удельное акустическое сопротивление воздуха, равное  $42 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ;  $p(t)$  – акустическое давление, регистрируемое на выходе акустического датчика;  $T$  – длительность акустической волны. Допустимые акустические воздействия на объекты социальной инфраструктуры определяются табулированными значениями удельной плотности энергии в единицах  $\text{Дж}/\text{м}^2$ .

В формуле (1) акустическое давление является функцией многих параметров, определяемых условиями излучения и дальнего распространения акустических колебаний. Эта зависимость может быть представлена в виде некоторого функционала:  $p(t) = F[Q f_1(c, \varphi, w, \alpha), f_2(T), \delta(H), \psi(t)]$ . Здесь  $Q$  – мощность источника;  $f_1(c, w)$  – функциональная зависимость акустического давления от соотношения скорости  $c$  и направления  $\varphi$  распространения акустической волны от источника с одной стороны и скорости  $w$  и азимутального направления  $\alpha$  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 экологических рисков является многопараметрической. В качестве объектов с повышенными геоэкологическими рисками в работе рассматриваются различные типы источников шумов:

– *транспортные шумы* – тяжелый колесный и гусеничный виды транспорта, электропоезда и грузовые поезда;

– *производственные шумы* – мощные стационарные сейсмические вибрационные источники, промышленные и карьерные взрывы, проводимые на открытых угольных разрезах.

Одной из ключевых задач здесь является выделение из общего широкополосного спектра регистрируемых шумов характерных частотных областей концентрации энергии соответственно различным видам источников, которые являются определяющими при оценивании геоэкологических рисков (1). Другая важная задача связана

с анализом метеозависимых эффектов распространения инфразвука. В качестве метеофакторов рассматриваются направление и сила ветра, а также влажность воздуха.

**Анализ данных полевых экспериментов.** Основным методом анализа записей является спектрально-временной анализ, в результате которого вычисляются спектрально-временные функции (СВФ):

$$F(k, l) = \sum_{n=0}^{N-1} S_l(t_n) \exp(-i \frac{2\pi n k}{N}), l = 1 \dots L, \quad (2)$$

где  $L$  – количество секций длительностью  $\Delta T = N \cdot \Delta t$  каждая, на которые разделяется искомый сигнал  $S(t)$ ,  $\Delta t$  – интервал выборки дискретных значений из непрерывного сигнала.

Получаемые по  $L$ -реализациям СВФ позволяют оценить динамику изменений спектров шумов по времени и частоте, выделить их основные спектральные моды. По результатам обработки проводится обобщающий анализ и выделение особенностей поведения спектров.

Ниже в качестве примера приводятся результаты анализа записей акустических и сейсмических шумов железнодорожного транспорта. Записи проводилась на расстоянии 30 м от железнодорожных путей. Для рассматриваемых видов железнодорожного транспорта были получены графики СВФ (рис. 1). Установлено, что основной диапазон частот колебаний, возникающих в земле и в воздухе при движении грузовых поездов, находится в пределах до 45 Гц (рис. 1а, б). Анализ записей сейсмоакустических колебаний электропоездов показал, что основной частотный диапазон здесь находится в пределах до 70 Гц (рис. 1в, г).

С точки зрения оценивания геоэкологических рисков выполнен анализ записей экологически опасных техногенных импульсных источников. Ниже в качестве примера приведены графики СВФ записей сейсмоакустических колебаний карьерных взрывов, проводимых при угледобыче в Кузбассе. Видно, что основной диапазон частот колебаний находится в области низких частот до 30 Гц (рис. 2а, б).

**Влияние метеофакторов на распространение инфразвука.** Геоэкологическое воздействие техногенных источников на окружающую среду, оцениваемое выражениями (1) и (2) может многократно усиливаться под влиянием

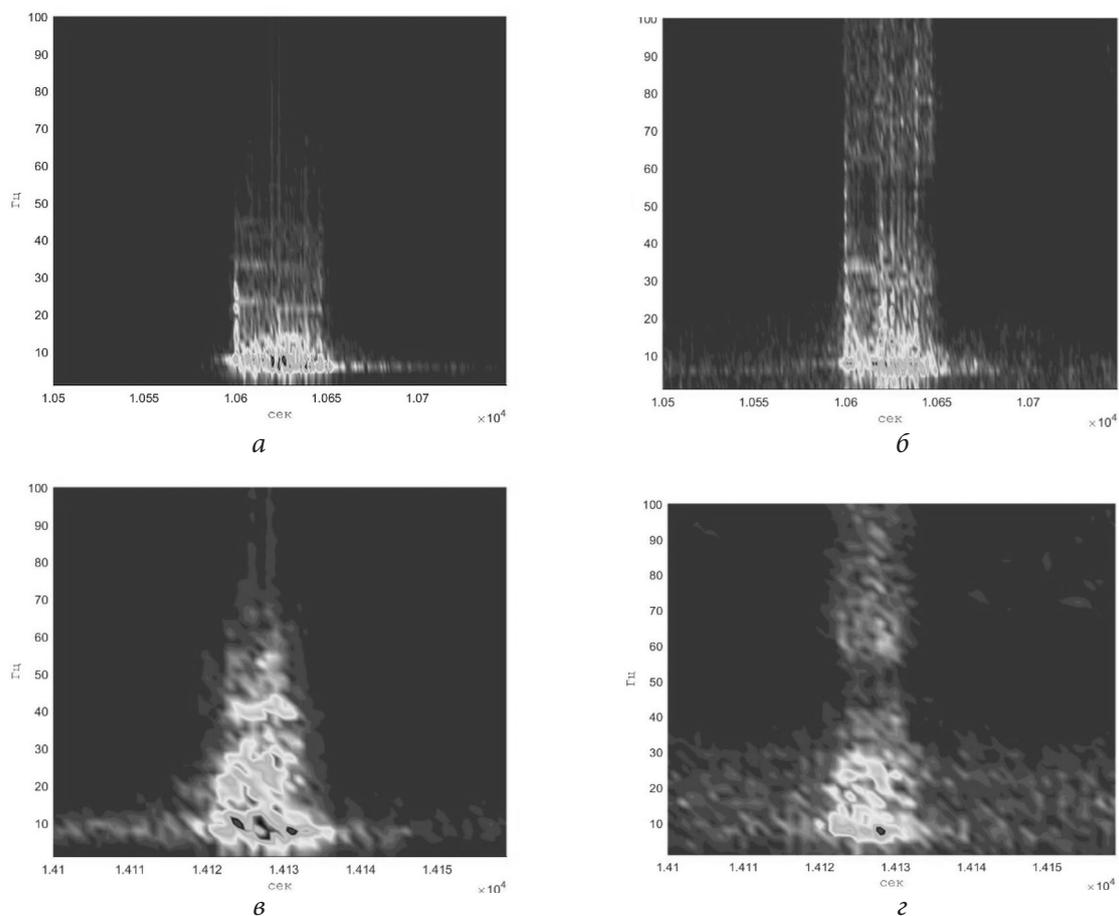


Рис. 1. Спектрально-временные функции (СВФ) для шумов грузовых поездов: а) сейсмических, б) акустических; для электропоездов: в) сейсмических, г) акустических; расстояние 33 м

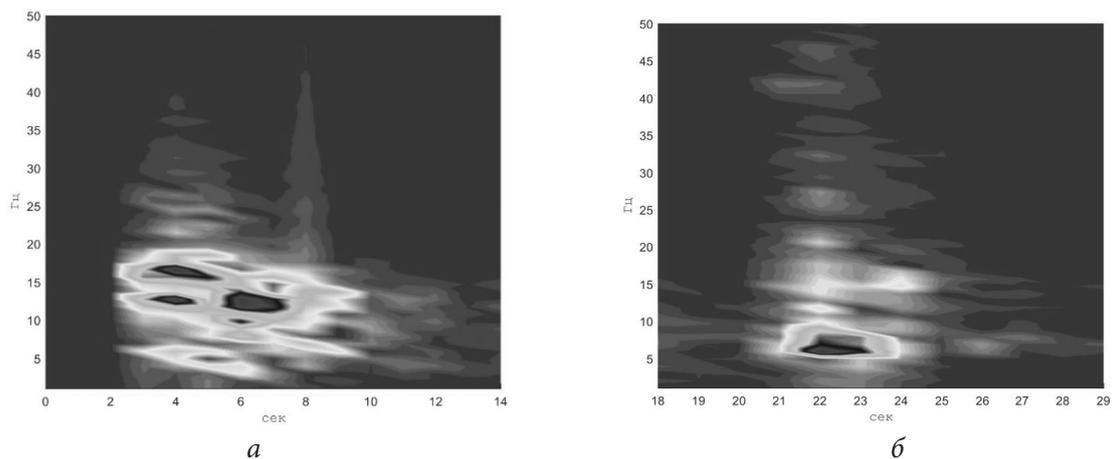


Рис. 2. Спектрально-временные функции (СВФ) записей колебаний карьерных взрывов при угледобыче открытым способом: а) сейсмических, б) акустических

метеофакторов. Для оценивания вклада последних были проведены полевые исследования, а также численные расчеты по оцениванию эффектов пространственной направленности аку-

стического волнового поля инфранизкочастотных источников, возникающих на фоне ветра, характеризуемого азимутальным направлением и скоростью.

В случае ветра в атмосфере возникает дрейф скорости звука, с учетом которого скорость звука будет складываться из скорости звука в невозмущенной атмосфере ( $c_0$ ) и скорости ветра ( $w_0$ ):  $c = c_0 + w_0 \cos \varphi$ , где  $\varphi$  – угол между направлением ветра и направлением на точку наблюдения звука. Другими метеофакторами, влияющими на распространение акустических волн, являются температура  $t$  и влажность воздуха  $e$ . С учетом перечисленных метеофакторов интегральная зависимость давления  $p$  в выражении (1) имеет вид:

$$p = \frac{\rho}{\gamma} (331 + 0,6t + 0,07e + w_0 \cos \varphi)^2. \quad (4)$$

Здесь  $\rho$  – плотность воздуха,  $\gamma = \frac{\tilde{n}_p}{c_v}$  – есть отношение теплоемкости воздуха при постоянном давлении к теплоемкости воздуха при постоянном объеме. Как видно, давление нарастает с увеличением температуры и влажности воздуха по квадратичной зависимости.

Экспериментально эффекты направленности акустического волнового поля изучались с помощью вибрационного источника ЦВ-40, излучающего акустические колебания с эквивалентной мощностью около 40 Вт в диапазоне частот

5–12 Гц [14]. Эффект направленности акустического волнового поля характеризуется фактором фокусировки  $f$ , равным отношению интенсивности инфразвука в неоднородной движущейся среде к интенсивности его в безграничной неподвижной среде [15]. На рисунке 3 приведены графические зависимости фактора фокусировки  $f$  от азимута  $\alpha$  точек наблюдения. Приведенные результаты соответствуют радиусу круговой расстановки датчиков 12 км и скоростям ветра 6 м/с (синий график) и 4 м/с (зеленый график). Красный график соответствует экспериментально полученной при радиусе круговой расстановки 12 км и скорости ветра 4–6 м/с. Как видно из сравнения расчетного и экспериментального графиков, значения  $\Delta\alpha$  (ширина диаграммы направленности на уровне 0,7 от максимального значения) в обоих случаях приблизительно совпадают и характеризуют ветрозависимую направленность излучения. С другой стороны, из анализа графиков следует важный вывод о том, что благодаря формирующемуся эффекту пространственной направленности наблюдается почти 50-кратное увеличение уровня излучения в азимутальном направлении, совпадающем с направлением ветра. Соответственно, это влечет увеличение геоэкологического риска в этом же направлении.

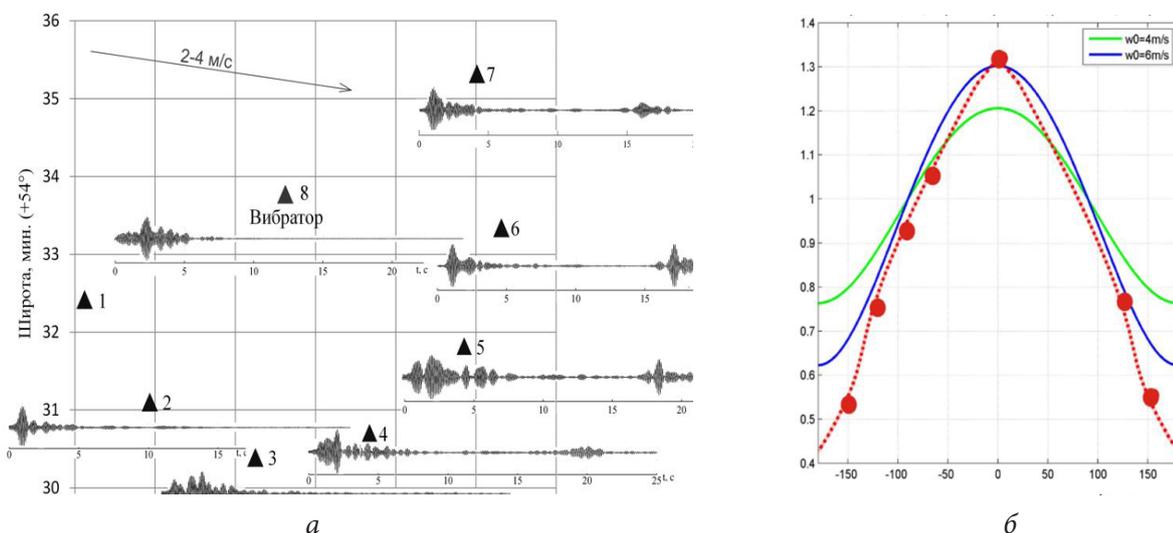


Рис. 3. Схема расстановки датчиков (а) и зависимость фактора фокусировки  $f$  (по вертикали) от горизонтального расстояния от источника  $r$  и азимута  $\alpha$  точки наблюдения (по горизонтали)

Примечание. На рис. 3а стрелкой показано направление ветра, приведены вибрационные кореллограммы, иллюстрирующие вступление сейсмических (первичных) и акустических (вторичных) волн. На рис. 3б представлены расчетные графики для радиуса круговой расстановки датчиков и скоростей ветра 6 м/с (кривая синего цвета) и 4 м/с (кривая зеленого цвета). Красный точечный график – экспериментально полученный для той же расстановки, скорость ветра 4–6 м/с.

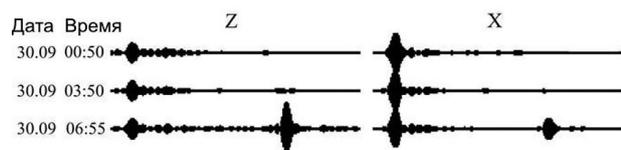


Рис. 4. Записи сейсмических и акустических волн в ночное и утреннее время, излучаемых вибратором ГРВ-50 в диапазоне частот 3–7 Гц на удалении 20 км от источника

Рассмотрено влияние другого метеофактора – влажности, оказывающего влияние на распространение акустических волн (4). С помощью сейсмических вибраторов – гидрорезонансного типа HRV-50 и центробежного типа CV-40 – выполнены эксперименты по регистрации феномена температурной инверсии в приземном низкотемпературном слое воздуха в утренние часы, при переходе от ночи ко дню. Эксперименты выполнялись с применением излучений сейсмических и акустических колебаний в диапазоне частот 3–7 Гц и при расстоянии от источника к приемнику в 20 км. Частный результат такого эксперимента представлен на рисунке 7, где приведены записи сейсмических волн (компоненты Z, X) на

времени прихода волн 4–6 с и акустической волны со временем вступления ~60 с, полученные в ночные и утренние часы. Первые вступления волн соответствуют: на 4–6 с – сейсмическим волнам, на 58–59 с – акустическим волнам.

Как видно из записей, акустическая волна возникает при смене ночи и дня (в данном случае в 06:55). Таким образом, хорошо прослеживается проявление температурной инверсии приземного слоя воздуха.

Влияние влажности воздуха на уровни акустических колебаний оценивалось в серии экспериментов с вибратором ЦВ-40 на удалении 50 км. Диапазон частот зондирующих колебаний в этом случае составил 6,25–11,23 Гц. На рисунке 5 представлено множество измеренных значений акустического давления в зависимости от влажности.

Кривая максимальных значений акустического давления характеризует 2–3-кратное его возрастание до 95 %. После этого происходит спад, который может быть объяснен нарастающей плотностью влажного воздуха, вызывающей возрастание рассеяния и поглощения акустической энергии.

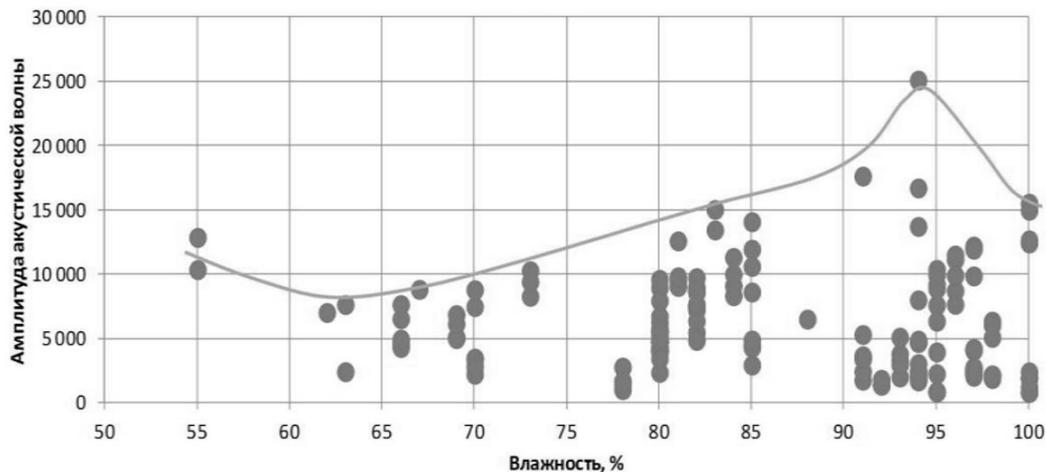


Рис. 5. Зависимость амплитуды акустической волны от влажности воздуха

**Заключение.** Рассмотрена задача оценивания влияния совместно сейсмических и акустических низкочастотных техногенных шумов на окружающую среду. Результаты полевых экспериментов по записи шумов от транспортных и взрывных источников показали, что основная энергия порождаемых ими колебаний сосредоточена соответственно в областях частот до 70 Гц и 30 Гц.

Были проведены полевые и численные эксперименты по оцениванию эффектов зависимости распространения низкочастотных техногенных колебаний от метеофакторов. На экспериментальных данных и данных численного моделирования показана зависимость амплитуды акустической волны от направления ветра и выраженная фокусировка энергии акустической волны в азиму-

тальном направлении, соответствующем направлению ветра. При этом показано, что благодаря формирующему эффекту пространственной направленности наблюдается почти 50-кратное увеличение уровня излучения в азимутальном направлении, совпадающем с направлением ветра. Соответственно, это влечет увеличение геоэкологического риска в этом же направлении.

Показана и численно охарактеризована зависимость амплитуды акустической волны от влажности воздуха. На результатах полевых экспериментов показано, что в схожих метеоусловиях повышение влажности до 95 % может приводить к 3–5-кратному повышению акустического давления вдоль направления ветра.

*Работа выполнена в рамках госзадания FWNM–2022–0004.*

#### Список литературы

1. Харченко С.В. Влияние рельефа городской территории на формирование акустической обстановки: эксперимент и моделирование // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2016. № 3. С. 26–34.
2. Munzel T., Gori T., Babisch W., Basner M. Cardiovascular effects of environmental noise exposure // *European Heart Journal*. Vol. 35. No. 13. 2014. P. 829–836.
3. Бабанов С.А., Татаровская Н.А. Вибрационная болезнь: современное понимание и дифференциальный диагноз // *Русский медицинский журнал. Медицинское обозрение*. 2013. Vol. 21. No. 35. P. 1777–1784.
4. Экспериментальная динамика сооружений. Мониторинг транспортной вибрации: монография / Е.К. Борисов, С.Г. Алимов, А.Г. Усов и др. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2007. 128 с.
5. Zou C., Wang Y., Tao Z. Train-induced building vibration and radiated noise by considering soil properties // *Sustainability*. 2020. No. 12. P. 1–17. DOI: 10.3390/su12030937.
6. Хазов П.А., Кожанов Д.А., Анущенко А.М., Сатанов А.А. Динамика строительных конструкций при экстремальных природных воздействиях: колебания, прочность, ресурс: монография / Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. Н. Новгород: ННГАСУ, 2022. 96 с.
7. Kouroussis G., Van Parys L., Conti C., Verlinden O. Prediction of ground vibrations induced by urban railway traffic: an analysis of the coupling assumptions between vehicle, track, soil, and buildings // *International Journal of Acoustics and Vibration*. 2013. Vol. 18. No. 4. P. 163–172.
8. Soltys A., Twardosz M., Winzer J. Control and documentation studies of the impact of blasting on buildings in the surroundings of open pit mines // *J Sustain. Min.* 2017. Vol. 16. No. 4. P. 179–188. DOI: 10.1016/j.jsm.2017.12.004.
9. Копытов А.И., Масаев Ю.А., Масаев В.Ю. Влияние технологии взрывных работ на состояние окружающей среды в Кузбассе // *Уголь*. 2020. № 5. С. 57–62. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-5-57-62.
10. Soltys A. Assessment of the impact of blasting works on buildings located in the vicinity of open-pit mines using matching pursuit algorithm // *Arch. Min. Sci.* 2020. No. 65. P. 199–212.
11. Van Albada S.J., Robinson P.A. Relationships between electroencephalographic spectral peaks across frequency bands // *Front. Hum. Neurosci.* 2013. Vol. 7. No. 56. DOI: 10.3389/fnhum.2013.00056.
12. Buzsáki G. *Rhythms of the Brain*. Oxford; N.Y.: Oxford University Press, 2006.
13. Капустян Н.К., Климов А.Н., Антоновская Г.Н. Высотные здания: опыт мониторинга и пути его использования при проектировании // *Жилищное строительство*. 2013. № 11. С. 6–12.
14. Алексеев А.С., Глинский Б.М., Ковалевский В.В., Хайретдинов М.С. и др. Активная сейсмология с мощными вибрационными источниками / отв. ред. Г.М. Цибульчик. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2004. 387 с.
15. Хайретдинов М.С., Ковалевский В.В., Воскобойникова Г.М., Седухина Г.Ф. Оценивание метеозависимых геоэкологических рисков от взрывов с помощью сейсмических вибраторов // *Технологии сейсморазведки*. № 3. 2016. С. 132–138.

## GEOECOLOGICAL MONITORING OF LOW-FREQUENCY TECHNOGENIC NOISES

*O.A. Kopylova, M.S. Khayretdinov, G.M. Shimanskaya*

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk  
oksana@opg.sccc.ru, marat@opg.sccc.ru, gulya@opg.sccc.ru

**Abstract.** The paper considers the problem of geoeological monitoring of low-frequency technogenic acoustic noise and seismic vibrations. Heavy wheeled and tracked transport, electric trains and freight trains are considered as powerful sources of transport noise. Powerful stationary seismic vibration sources, industrial and quarry explosions carried out in coal mining areas are considered as sources of industrial nature with an increased level of noise and vibration impact on the environment. The features of seismic and acoustic vibrations from the considered types of sources are studied. It is shown that the frequency spectrum of their noise is in the region of low and infra-low frequencies, which are the most environmentally hazardous. Field and numerical experiments were conducted to study the influence of meteorological factors on the propagation of infrasound. In particular, a high dependence of the acoustic energy level on wind direction and air humidity was shown.

**Keywords:** seismic and acoustic vibrations, transport noise, geoeology of blasting operations, geophysical monitoring, low and infra-low frequencies, meteorological dependence of wave propagation.

### References

1. Harchenko S.V. 2016. Vliyanie re'lefa gorodskoj territorii na formirovanie akusticheskoy obstanovki: jeksperiment i modelirovanie. [The influence of urban terrain relief on the formation of acoustic conditions: experiment and modeling]. *Vestnik VGU, Series: Geografija. Geojekologija*. 3: 26–34.
2. Munzel T., Gori T., Babisch W., Basner M. 2014. Cardiovascular effects of environmental noise exposure. *European Heart Journal*. 35 (13): 829–836.
3. Babanov S.A., Tatarovskaja N.A. 2013. Vibracionnaja bolezn': sovremennoe ponimanie i differencial'nyj diaznoz. [Vibration disease: modern understanding and differential diagnosis]. *Russkij medicinskij zhurnal. Medicinskoe obozrenie*. 21(35): 1777–1784.
4. Borisov E.K., Alimov S.G., Usov A.G. 2007. *Eksperimental'naya dinamika sooruzheniy. Monitoring transportnoj vibratsii*. [Experimental Dynamics of Structures. Monitoring Transport Vibration]: Monografiya. Petropavlovsk Kamchatskiy: KamchatGTU: 128 p.
5. Zou C., Wang Y. and Tao Z. 2020. Train-induced building vibration and radiated noise by considering soil properties. *Sustainability*. 12: 1–17. DOI:10.3390/su12030937.
6. Khazov P.A., Kozhanov D.A., Anushchenko A.M., Satanov A.A. 2022. *Dinamika stroitel'nykh konstruksiy pri ekstremal'nykh prirodnykh vozdeystviyakh: kolebaniya, prochnost', resurs* [Dynamics of building structures under extreme natural influences: vibrations, strength, resource]: monografiya / Nizhegor. gos. arkhitektur.-stroit. un-t. N. Novgorod: NNGASU: 96 p.
7. Kouroussis G., Van Parys L., Conti C., Verlinden O. 2013. Prediction of Ground Vibrations Induced by Urban Railway Traffic: An Analysis of the Coupling Assumptions Between Vehicle, Track, Soil, and Buildings. *International Journal of Acoustics and Vibration*. 18(4): 163–172.
8. Sołtys A., Twardosz M., Winzer J. 2017. Control and documentation studies of the impact of blasting on buildings in the surroundings of open pit mines. *J Sustain Min*. 16(4): 179–188. DOI: 10.1016/j.jsm.2017.12.004.
9. Kopytov A.I., Masayev Yu.A., Masayev V.Yu. 2020. Vliyaniye tekhnologii vzryvnykh rabot na sostoyaniye okruzhayushchey sredy v Kuzbasse. [The Impact of Blasting Technology on the State of the Environment in Kuzbass]. *Ugol'*. 5: 57–62. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-5-57-62.
10. Sołtys A. 2020. Assessment of the impact of blasting works on buildings located in the vicinity of open-pit mines using matching pursuit algorithm. *Arch. Min. Sci*. 65: 199–212
11. Van Albada S.J., Robinson P.A. 2013. Relationships between electroencephalographic spectral peaks across frequency bands. *Front. Hum. Neurosci*. 7: 56. DOI: 10.3389/fnhum.2013.00056.
12. Buzsáki G. 2006. *Rhythms of the Brain*. *Rhythms of the Brain*. Oxford; N.Y.: Oxford University Press, 2006.
13. Kapustyan N.K., Klimov A.N., Antonovskaya G.N. 2013. Vysotnyye zdaniya: opyt monitoringa i puti yego ispol'zovaniya pri proyektirovanii. [High-rise buildings: monitoring experience and ways of its use in design]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo*. 11: 6–12.
14. Alekseyev A.S., Glinskiy B.M., Kovalevskiy V.V., Khayretdinov M.S. 2004. *Aktivnaya seysmologiya s moshchnymi vibratsionnymi istochnikami*. [Active seismology with powerful vibration sources]; ed. G.M. Tsibul'chik. Novosibirsk, IVMiMG SO RAN, Filial "Geo" Izdatel'stva SO RAN: 387 p.
15. Khayretdinov M.S., Kovalevskiy V.V., Voskoboinikova G.M., Sedukhina G.F. 2016. Otsenivaniye meteozavisimyykh geoeologicheskikh riskov ot vzryvov s pomoshch'yu seysmicheskikh vibratorov. [Evaluation of meteorologically dependent geoeological risks from explosions using seismic vibrators]. *Tekhnologii seysmorazvedki*. 3: 132–138. (In Russian).