

## Многофакторный метод геоэкологоохранного прогнозирования\*

М. С. Хайретдинов<sup>1,3</sup>, В. М. Агафонов<sup>2</sup>, В. В. Ковалевский<sup>1</sup>, Г. М. Воскобойникова<sup>1</sup>  
marat@opg.sssc.ru; agvadim@yandex.ru; kovalevsky@sscc.ru; gulya@opg.sssc.ru

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 630090, Новосибирск, проспект ак. Лаврентьева, 6;

<sup>2</sup>Москва, Московский физико-технический институт, 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9;

<sup>3</sup>Новосибирский государственный технический университет, 630073, Новосибирск, пр-т К.Маркса, 20

В работе представлен разработанный авторами многофакторный метод прогнозирования метеозависимых геоэкологоопасных рисков для социальной среды в районах проведения регулярных техногенных взрывов, в основе которого лежит мониторинг приземной атмосферы акустическими колебаниями низкочастотных сейсмических вибраторов. Приводятся результаты численного анализа и экспериментальных исследований, отражающих применение предложенного подхода.

**Ключевые слова:** Сейсмический вибратор, техногенные взрывы, акустосейсмические поля, полевые эксперименты, численные расчеты, геоэкологический риск, метео условия

## Multifactorial method of geoeological protection prediction.\*

M. S. Khairetdinov<sup>1,3</sup>, V. M. Agaphonov<sup>2</sup>, V. V. Kovalevsky<sup>1</sup> and G. M. Voskoboinikova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, 630090, Novosibirsk, Lavrentjeva av., 6;

<sup>2</sup>Moscow Institute of Physics and Technology, Institutskiy per., Dolgoprudny, 9, Moscow Region, 141701, Russia;

<sup>3</sup>Novosibirsk State Technical University, 630073, Novosibirsk, K. Marksa av., 20, Russia

The paper presents a multifactor method developed by the authors for forecasting meteorological geoeological risks for the social environment in the areas of regular technogenic explosions based on monitoring of the surface atmosphere by acoustic vibrations of low-frequency seismic vibrators. The results of numerical analysis and experimental studies reflecting the application of the proposed approach are presented.

**Keywords:** Seismic vibrator; technogenic explosions; acousto seismic fields; field experiments; numerical computations; geoeological risks; meteo conditions

## Введение

Технологии мониторинга и прогнозирования окружающей среды, снижения рисков и смягчения последствий природных и техногенных катастроф относятся к числу приоритетных направлений развития науки, технологий и техники [1]. При этом особый упор ставится на экологически чистые технологии, сочетающие в себе высокие точностные свойства и реализуемость на современной инструментальной основе. Таким требованиям отвечают вибрационные геотехнологии, технической основой которых являются мощные низкочастотные управляемые вибраторы. Такие источники с начала 80-х годов 20-го века были созданы в Сибирском отделении РАН [2]. В отличие от традиционно использовавшихся взрывов они обладают высокими метрологическими характеристиками и экологической чистотой. К тому же такие источники наряду с основными сейсмическими колебаниями в земле способны излучать акустические колебания в атмосферу, представляя этим самым класс инфранизкочастотных акустических источников, не имеющих аналогов в мире [3]. Благодаря таким достоинствам рассматриваемые источники легли в основу создания и развития ряда новых вибрационных геотехнологий [4]. Имея ввиду такие источники в данной работе излагается предложенный авторами оригинальный метод, направленный на предупреждение либо снижение геоэкологических рисков для социальной и природной среды от техногенных и природных взрывов. Известно, что мощные взрывы являются источниками ударных воздушных и сейсмических волн, оказывающих разрушительное воздействие на промышленные и жилые объекты, ударное воздействие на биообъекты. Такие процессы, например, развиваются во время взрывов в зонах открытых промышленных карьеров, полигонов при утилизации накопленных запасов боеприпасов и др. Подобные эффекты рассматривались ранее [5]. В тоже время следует отметить их слабую изученность от воздействия внешних метеофакторов (направление и скорость ветра, температуру и влажность окружающего воздуха) Комплексное воздействие их на распространение акустических волн может приводить к многократному

усилению разрушительного воздействия взрывов на окружающую среду на определенных азимутальных направлениях. Это определяет необходимость прогнозирования рисков от массовых взрывов с учетом воздействия указанных факторов. Авторами предлагается и анализируется подход к решению проблемы с применением вибрационных источников.

### Постановка задачи.

Ударное акустическое воздействие взрывов на окружающую среду оценивается удельной плотностью акустической энергии:

$$E = \frac{1}{\rho c} \int p^2(t) dt.$$

Здесь  $\rho c$  – удельное акустическое сопротивление воздуха, равное  $42 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ ;  $p(t)$  – регистрируемое акустическое давление,  $T$  – длительность акустической волны. Допустимые акустические воздействия на объекты социальной инфраструктуры и человека определяются табулированными значениями удельной плотности энергии в единицах  $\text{Дж}/\text{м}^2$ . Акустическое давление является функцией многих параметров, определяемых условиями излучения и дальнего распространения акустических колебаний. Многофакторная модель интегрального давления как уравнение энергетического баланса может представляться в виде:

$$P_{\Sigma}(t, f, r) = P_s(f) + P_{abs} + P_{meteo}(e, \tau, \omega, \varphi) + P_{spher} + P_{sur}$$

Здесь  $P_{\Sigma}(t, f, r)$  – давление в точке регистрации на удалении  $r$  от источника;  $P_s(f)$  – частотно зависимое акустическое давление от вибратора;  $P_{abs}$  – поглощение инфразвука по расстоянию;  $P_{meteo}(e, \tau, \omega, \varphi)$  – давление, как функция метеопараметров: относительной влажности, температуры, направления и скорости ветра;  $\varphi$  – угол между направлением ветра и волновым фронтом от источника;  $P_{spher}$  – сферическая расходимость волнового фронта;  $P_{sur}$  – вариации давления из-за поглощения дневной поверхностью Земли.

Получение оценок рисков в аналитическом виде в большинстве случаев наталкивается на сложности из-за отсутствия необходимой полноты априорных сведений, касающихся не только метеопараметров, но и сведений о пересеченности поверхности Земли и ее покрове (растительный и снежный покровы) и др. факторы. Получение аналитической зависимости возможно для некоторых частных случаев. Другой путь преодоления априорной неопределенности связан с изучением закономерности зависимости интегрального давления на основе экспериментов с применением вибраторов, а также взрывов в качестве излучателей инфранизкочастотных акустических колебаний. При этом учитывается вся полнота факторов, определяющих условия излучения и распространения в атмосфере акустических колебаний. Оба пути решения задачи рассматриваются в работе.

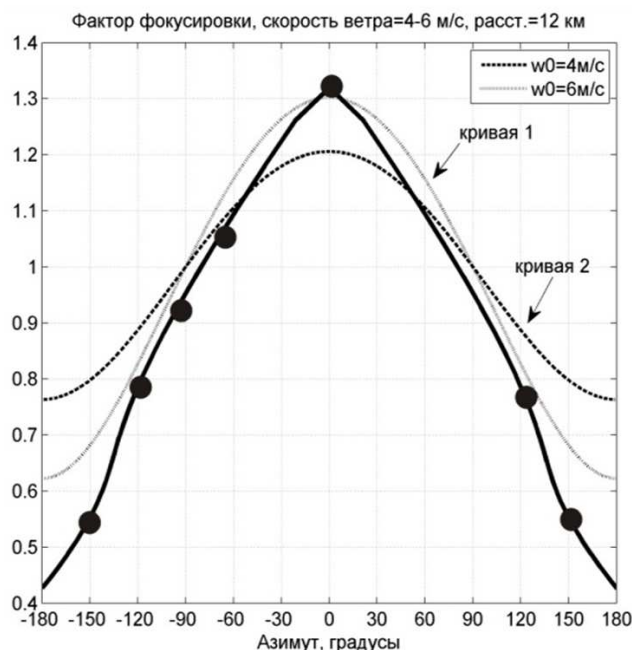
**Информативные факторы взаимодействия сопряженных геофизических полей** В качестве решения одной из задач здесь рассмотрено влияние фактора  $P_{meteo}(e, \tau, \omega, \varphi)$  направления и скорости ветра на распространение инфразвука, порождаемого сейсмическими вибраторами ЦВ-40, ЦВ-100. Результатом такого взаимодействия является явление пространственной фокусировки акустических колебаний, при которой максимум акустического давления  $p$  достигается при совпадении направлений фронтов распространения колебаний от вибратора и ветра. Описывается такое явление с помощью фактора фокусировки, равного отношению интенсивности инфразвука в неоднородной движущейся среде к интенсивности его в безграничной неподвижной среде [6]:

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

где сферические углы  $\theta$  (зенитный угол) и  $\varphi$  (азимут) характеризуют начальное направление луча от источника по отношению к вертикальной координате  $z$  и горизонтальной оси  $x$  соответственно. При этом направление последней совпадает с направлением ветра. На рис. 1 приведены расчетные и экспериментальная зависимости фактора фокусировки от азимута точки наблюдения [7].

Расчетные зависимости соответствуют радиусу круговой расстановки датчиков 12 км и скоростям ветра 6 м/с (кривая 1) и 4 м/с (кривая 2). Высота источника в расчетах над землей принята равной 5 м. Для сравнения приводится экспериментально полученный график фактора фокусировки с использованием сейсмического вибратора ЦВ-40 и круговой расстановки датчиков с радиусом 12 км при скорости ветра 4-6 м/с. Как видно из сравнения расчетных и экспериментального графиков расхождение между ними имеет место в области больших азимутов. В основной части значения раскрытия  $\Delta\varphi$ , характеризующего остроту фокусировки, в обоих случаях примерно совпадают.

Зависимости акустического давления  $p$  от дополнительных метеофакторов – температуры, влажности воздуха – вытекают из обобщенного выражения состояния газа  $f(p, \rho, t) = 0$ , связывающего между собой



**Рис. 1.** Зависимость фактора фокусировки от азимута точки наблюдения. Расчетные графики для радиуса круговой расстановки датчиков 12 км и скоростей ветра: 6 м/с (кривая 1) и 4 м/с (кривая 2); Высота источника - 5 м. Черный график соответствует экспериментально полученному от вибратора ЦВ-40 радиусе круговой расстановки 12 км и скорости ветра 4-6 м/с.

давление  $p$ , плотность (сжатие)  $\rho$  и температуру  $t$  воздуха. Из него следует определение скорости звука в воздухе по Лапласу [8]:

$$C_L = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p}{\rho}}, \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

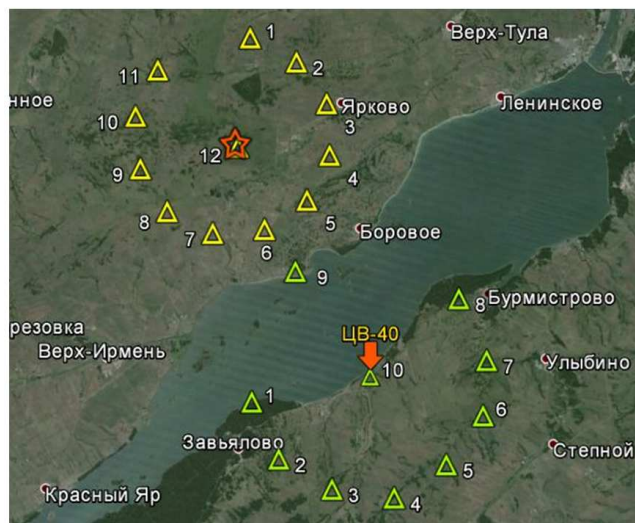
где  $\gamma$  – отношение теплоемкости воздуха при постоянном давлении к теплоемкости воздуха при постоянном объеме, следует, что давление является квадратичной функцией скорости звука, зависящей, в свою очередь, от температуры и влажности воздуха. Так, скорость звука во влажном воздухе составляет  $c_0 = 20.1 \sqrt{T(1 + 0.273e/p)}$ , где  $e$  – влажность воздуха,  $T = t + T_0$ , где  $T_0 = 273K$ . При нормальном давлении и  $T = T_0 = 273K$  ( $0^\circ C$ ) скорость звука в сухом воздухе равна 331 м/с. В случае наличия 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 источника звука. С учетом перечисленных метеофакторов интегральная зависимость давления от них может быть представлена в виде:

$$p = \frac{\rho}{\gamma} (331 + 0.6t + 0.07e + w_0 \cos \varphi)^2.$$

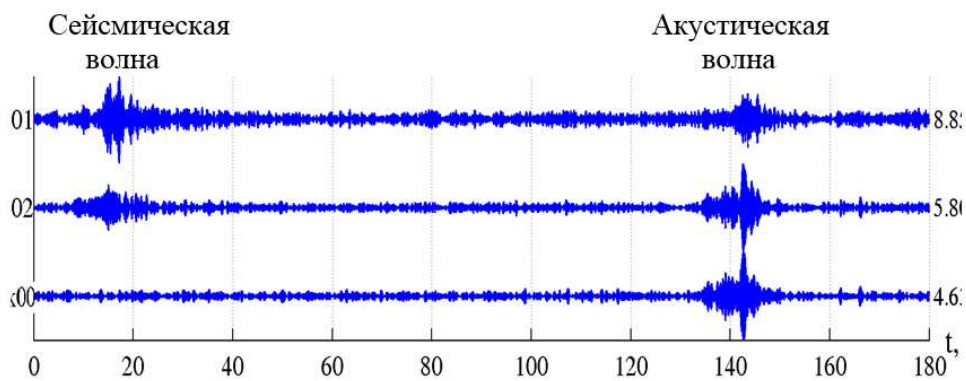
### Экспериментальные исследования эффектов взаимодействия акусто-метео полей и оценивание геоэкологических рисков

В качестве источников акустических колебаний использовались сейсмический вибратор ЦВ-40 [1], базирующийся на Быстровском полигоне (Новосибирская область) и взрывы утилизируемых боеприпасов на полигоне Шилово (Новосибирская обл.). В обоих случаях применялся принцип регистрации акустических колебаний с помощью круговой расстановки датчиков (рис.2).

В центре каждой отдельно взятой расстановки находится один из источников: либо вибрационный источник ЦВ-40 (рис.3), либо взрывы с тротильным эквивалентом 125 кг. В методическом плане в экспериментах изучалось воздействие направления и скорости ветра на распространение акустических волн от обоих источников. Для оценивания параметров явления пространственной фокусировки экспериментально получены графики (рис.4) 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.



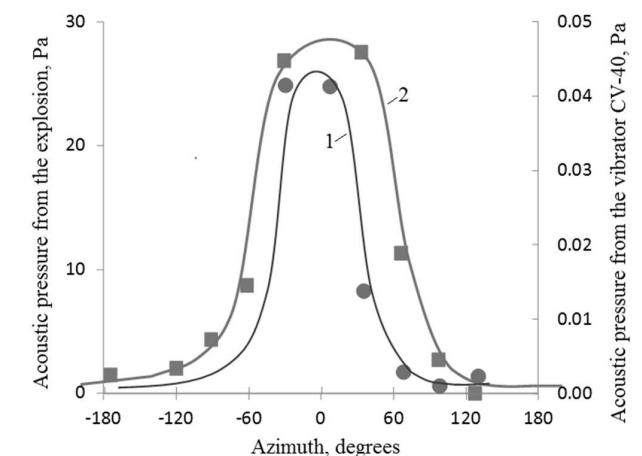
**Рис. 2.** Карта расстановки источников и датчиков для регистрации сейсмоакустических колебаний от сейсмического вибратора ЦВ-40 (красная стрелка) и взрывов на полигоне Шиловое (красная звездочка).



**Рис. 3.** Вибрационный источник ЦВ-40 и сейсмические и акустические волны от него, полученные на удалении 50 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.





**Рис. 4.** 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 тротильным эквивалентом 125 кг и радиуса круга 10 км

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.

Из анализа полученных экспериментальных данных следует, что ветровая зависимость уровней инфразвука характеризует остро выраженную азимутальную направленность распространения акустических колебаний, приводящей к явлению пространственной фокусировки (рис.4). В частности, как следует из рисунка для случая круговой расстановки датчиков вокруг вибратора с радиусом 6 км и скорости ветра 2-4 м/с угол раскрытия характеристики направленности составляет  $\Delta\varphi=60$  град. В этом случае соотношение максимального и минимального значений акустического давления достигает 50 раз. С учетом такого перераспределения акустического давления по пространству следует важный вывод, что даже маломощные взрывы могут становиться экологически опасными вследствие многократного увеличения потока энергии в определенном направлении. Оцененные по экспериментальным данным эффекты пространственной фокусировки акустических волн от взрывов на полигоне Шиловое имеют аналогичный острорезонансный характер [7].

Влияние фактора влажности на распространение акустических волн оценивалось в экспериментах, связанных с изучением уровней акустических колебаний в условиях меняющейся влажности на трассе "вибратор-приемник" протяженностью 50 км. Регистрируемые акустические волны от вибратора для этого случая представлены на рис.3. Полученные результаты экспериментов (рис.5), в частности, показывают, что в схожих метеоусловиях повышение влажности до 95 % может приводить к (3-5)- кратному повышению акустического давления вдоль направления ветра. Свыше 95% -ной влажности уровни давления существенно уменьшаются, что определяется выраженным фактором рассеяния волн в условиях концентрированной влажности. .

Допустимые акустические воздействия на объекты социальной инфраструктуры определяются табулированными значениями удельной плотности энергии в единицах Дж/м<sup>2</sup> [9]. В частности, для жилого здания при однократном взрыве критической является величина 1000 Дж/м<sup>2</sup>, для оконного стекла толщиной 2-3 мм -15 Дж/м, для человека - 3 Дж/м<sup>2</sup>. По отношению к полигонным взрывам (рис.2), характеризующимся мощностью в тротильном эквиваленте около 125 кг, в соответствии с (1) были получены оценки удельной акустической энергии в точках 1-11 круговой расстановки датчиков с радиусом 10 км (рис.2), а также в контрольной точке вблизи взрыва (на удалении от эпицентра 0.5 км). В качестве примера на рис.6 приводятся соотношения значений удельной плотности энергии (1) от взрывов с критическими значениями для разных объектов .

Номера столбцов 1-4 соответствуют типам объектов, 5,6 - значениям удельной энергии от взрыва на расстояниях от 0.5 и 10 км соответственно. Допустимые и измеренные значения удельной энергии проставлены сверху над каждым столбиком. Представленный рисунок характеризует уровень опасности взрывов данной мощности для разные типов объектов. В частности, видно, что взрыв с тротильным

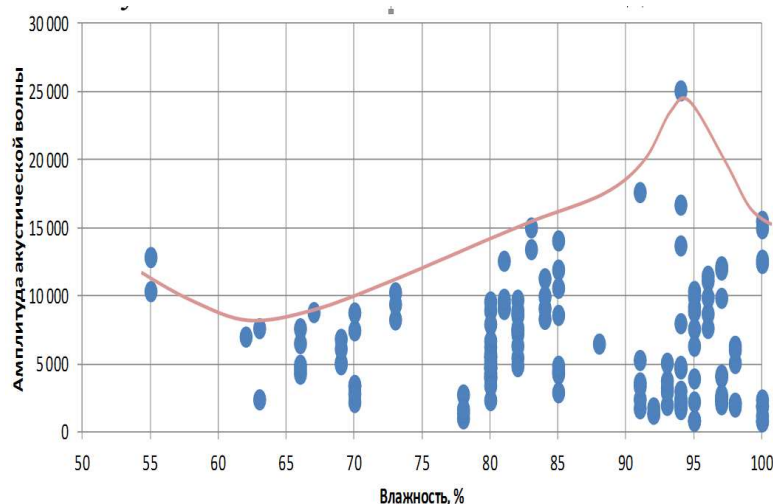


Рис. 5. Зависимость амплитуды акустической волны от влажности на трассе протяженностью 50 км

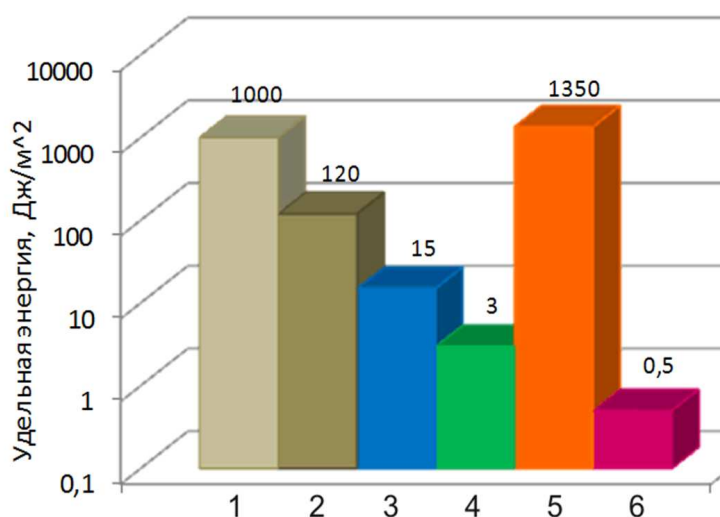


Рис. 6. Критические значения удельной энергии для строений: 1 - жилое здание при однократном взрыве; 2 - жилое здание при многократных взрывах; 3 - оконное стекло толщиной 2-3 мм; 4 - для человека. Значения удельной энергии от взрыва: 5 - на удалении от взрыва 0.5 км; 6 - на удалении 10 км.

эквивалентом в 125 кг на удалении 0.5 км является разрушительным для строений и тем более опасен для человека, поскольку превышение допустимой нормы составляет ориентировочно 400 раз.

## Выводы

1. Рассмотрена предложенная авторами оригинальная геотехнология, направленная на прогнозирование геоэкологических рисков для окружающей социальной и природной среды, которые порождают мощные техногенные и природные взрывные процессы. В основе ее лежит идея использования сейсмических вибраторов в качестве источников высокоточного активного сейсмического и акустического мониторинга природной среды.
2. Приведены результаты натурных экспериментов по мониторингу приземной атмосферы с использованием вибраторов в виде оценок уровней инфразвука на разных азимутальных направлениях с учетом воздействия метеопараметров окружающего воздуха-направления и скорости ветра, влажности.
3. Проведен сравнительный анализ полученных оценок с критически допустимыми для разных объектов социальной инфраструктуры, на основе которого следуют рекомендации по проведению взрывных работ применительно к метеообстановке на трассах распространения инфразвука.

## Литература

- [1] Оценка и пути снижения негативных последствий экстремальных природных явлений и техногенных катастроф. Монография под ред. акад. Лаверова Н.П., М.: ИФЗ РАН, 2011.-220с.
- [2] 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, Филиал "Гео"Издательства СО РАН, 2004. 387с.
- [3] Алексеев А.С., Глинский Б.М., Дряхлов С.И., Ковалевский В.В., Михайленко Б.Г., Пушиной Б.М., Фатьянов А.Г., Хайретдинов М.С., Шорохов М.Н. Эффект акустосейсмической индукции при вибросейсмическом зондировании. // Доклады АН. 1996. Т.346. № 5. С.664-667.
- [4] Новые геотехнологии и комплексные геофизические методы изучения внутренней структуры и динамики геосфер. Вибрационные геотехнологии. Под ред. акад. Н.П. Лаверова. М.: Региональная общественная организация ученых по проблемам прикладной геофизики. 470с.
- [5] Адушкин В.В., Спивак А.А., Соловьев С.П. Геоэкологические последствия массовых химических взрывов на карьерах. // Геоэкология. Инженерная Геология. Гидрогеология. Геокриология. 2000. №6. С.554-563.
- [6] Бреховский Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973, 343 с.
- [7] М.С. Хайретдинов, В.В. Ковалевский, Г.М. Воскобойникова, Г.Ф. Седухина. Оценивание метеозависимых геоэкологических рисков от взрывов с помощью сейсмических вибраторов // Технологии сейсморазведки, № 3, 2016, с. 132-138.
- [8] Исакович М.А. Общая акустика. М.:Наука, ИФМЛ, 1973, 495 с.
- [9] Единые правила безопасности при взрывных работах. М.: НПО ОБТ, 1993. 238с.

## References

- [1] Assessment and ways to reduce the negative consequences of extreme natural phenomena and man-made disasters. The monograph under. acad. Laverova NP, Moscow: IPP RAS, 2011.-220s.
- [2] Alekseev A.S., Glinsky B.M., Kovalevsky V.V., Khayretdinov M.S. Active seismology with powerful vibrational sources / Отв. Ed. G.M. Cybil. Novosibirsk: IVMMG SB RAS, Geo Branch of the Publishing House of the SB RAS, 2004. 387p.
- [3] Alekseev AS, Glinsky BM, Dryakhlov SI, Kovalevsky VV, Mikhaylenko BG, Pushnoy BM, Fatyantov AG, Khayretdinov MS, Shorokhov M.N. The effect of acoustic seismic induction in vibroseismic sounding. // Reports of the Academy of Sciences. 1996. T.346. No 5. P.664-667.
- [4] New geotechnologies and complex geophysical methods for studying the internal structure and dynamics of geospheres. Vibration geotechnology. Under red.akad. N.P. Laverova. M.: Regional public organization of scientists on problems of applied geophysics. 470s.
- [5] Adushkin V.V., Spivak A.A., Soloviev S.P. Geoecological consequences of mass chemical explosions in quarries. // Geoecology. Engineering Geology. Hydrogeology. Geocryology. 2000. No 6. P.554-563.
- [6] Brekhovskikh L.M. Waves in layered media. Moscow: Nauka, 1973, 343 p.
- [7] M.S. Khayretdinov, V.V. Kovalevsky, G.M. Voskoboynikova, G.F. Sedukhina. Estimation of meteodependent geoecological risks from explosions by means of seismic vibrators // Technologies of seismic exploration, No. 3, 2016, p. 132-138.
- [8] Isakovitch M.A. General acoustics. M.: Science, IFML, 1973, 495 p.
- [9] Uniform safety rules for blasting operations. M.: NGO OBT, 1993. 238p.