

## ВИБРАЦИОННЫЕ ГЕОТЕХНОЛОГИИ В ЭКОЛОГООХРАННОМ ПРОГНОЗИРОВАНИИ

Хайретдинов М.С.<sup>1,2</sup>, Ковалевский В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, <sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет  
(8383)-330-87-43, marat@opg.sccc.ru

В докладе дается краткая характеристика разработанной авторами геоинформационной технологии прогнозирования экологических рисков и результаты ее использования при акустическом мониторинге приземной атмосферы сейсмическими вибраторами и взрывами, грязевого вулкана в Таманской грязевулканической провинции.

Ключевые слова –вибраторы, геоакустический мониторинг, вибрационная геотехнология, акустосейсмические поля, геоэкологические риски, метеопараметры, взрывы, сейсмovolканоопасные зоны.

Innovative geotechnologies in environment monitoring. Khairtdinov M.S., Kovalevsky V.V. Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk State Technical University

In the report the short characteristic of the geoinformation technology of forecasting of geoeological risks, developed by authors, and results of its use at geoacoustic monitoring of ground atmosphere by seismic vibrators and explosions, in a Taman mud volcano province is given.

Keywords-vibrators, geoacoustic monitoring, vibrational geotechnology, acoustoseismic fields, geoeological risks, meteorparameters, explosions, seismic and volcano-prone zones.

### 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 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, носящих *инновационный* характер [4]. В качестве одной из них в данной работе рассматривается предложенная авторами оригинальная геотехнология, направленная 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 боеприпасов, извержения грязевых и магматических вулканов, землетрясений и др. Подобные эффекты рассматривались ранее [5]. В тоже время следует отметить их слабую изученность от воздействия внешних метеофакторов, включающих в себя, в первую очередь, направление и скорость ветра, температуру и влажность окружающего воздуха, турбулентность атмосферы. Комплексное воздействие их на распространение акустических волн может приводить к многократному усилению разрушительного воздействия взрывов на окружающую среду на определенных азимутальных направлениях. Этоопределяет 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 энергии*:

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

Здесь  $\rho c$  – удельное акустическое сопротивление воздуха, равное 42 г/(см<sup>2</sup>·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 Дж/м<sup>2</sup>. В (1) акустическое давление является функцией многих параметров, определяемых условиями излучения и дальнего распространения акустических колебаний.

Многофакторная модель интегрального давления как уравнение энергетического баланса может быть представлена в виде:

$$P_{\Sigma}(t, f, r) = P_{II}(f) + P_{abs} + P_{метео}(e, \tau, \omega, \varphi) + P_{сфер} + P_{нов} \quad (2)$$

$P_{\Sigma}(t, f, r)$  – давление в точке регистрации на удалении  $r$  от источника;

$P_{II}(f)$  – частотно зависимое акустическое давление от вибратора;

$P_{abs}$  – поглощение инфразвука по расстоянию;

$P_{метео}(e, \tau, \omega, \varphi)$  – давление, как функция метеопараметров: относительной влажности, температуры, направления и силы ветра;  $\varphi$  – угол между направлением ветра и волновым фронтом от источника;

$P_{сфер}$  – сферическая расходимость волнового фронта;

$P_{нов}$  – вариации давления из-за поглощения дневной поверхностью Земли.

Таким образом, задача оценивания экологических рисков является в общем случае многопараметрической. Получение оценки (1) в такой постановке наталкивается на сложности из-за отсутствия полноты априорных сведений. Получение аналитической зависимости возможно для некоторых частных случаев. Другой путь преодоления априорной неопределенности связан с получением оценок (1) на основе экспериментов с применением вибраторов, а также взрывов в качестве излучателей инфранизкочастотных акустических колебаний.

#### Информативные факторы взаимодействия сопряженных геофизических полей.

В качестве решения одной из задач здесь рассмотрено влияние фактора  $P_{метео}(e, \tau, \omega, \varphi)$  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]:

$$f = I[z, \theta, \varphi] / I_0, \quad (3)$$

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. Более подробно методика расчета (2) представлена в [7]. На рис. 1 приведены расчетные зависимости  $f$  от азимута 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). Высота источника над землей – 5 м. Красный график соответствует экспериментально полученной при радиусе круговой расстановки 12 км и скорости ветра 4–6 м/с. 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 расчетного и экспериментального графиков значения раскрытия  $\Delta\varphi$  в обоих случаях в основном 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 давление  $p$ , плотность (сжатие)  $\rho$  и температуру  $t$  воздуха. Как известно [8] из него следует

определение скорости звука в воздухе по Лапласу:  $c_{л} = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p}{\rho}}$ , где  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  – есть 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

$c_o = 20.1 \sqrt{T \left( 1 + 0.273 \frac{e}{p} \right)}$ , где  $e$  – влажность воздуха,  $T = t + T_o$ , где  $T_o = 273K$ . При нормальном давлении и  $T = T_o = 273K$  (0° 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:

$$p = \frac{\rho}{\gamma} (331 + 0.6t + 0.07e + c_0 + w_0 \cos \varphi)^2. \quad (4)$$

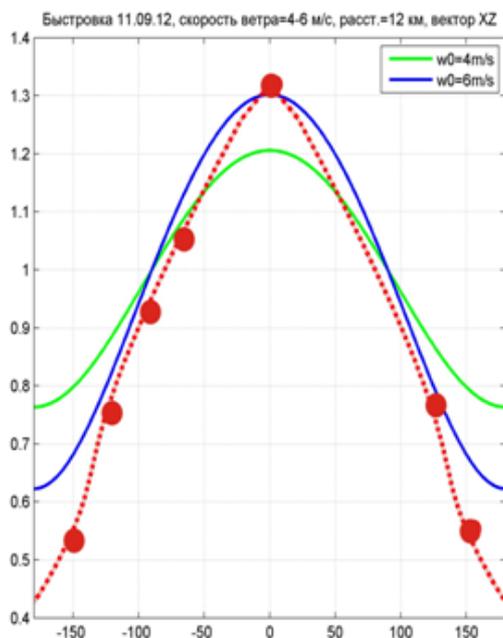


Рис.1. Зависимость фактора фокусировки  $f$  от горизонтального расстояния от источника  $r$  и азимута точки наблюдения: Расчетные графики для радиуса круговой расстановки датчиков с радиусом 12 км и скоростей ветра 6 м/с (кривая синего цвета) и 4 м/с (кривая зеленого цвета). Высота источника над землей-5 м. Красный точечный график экспериментально полученный для той же расстановки для вибратора ЦВ-40 при скорости ветра 4-6 м/с.

#### 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.

Из анализа полученных экспериментальных данных ветровая зависимость уровней инфразвука характеризует остро выраженную азимутальную направленность распространения акустических колебаний, приводящей к явлению пространственной фокусировки (рис.1). 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 Шилово имеют аналогичный острорезонансный характер [7].

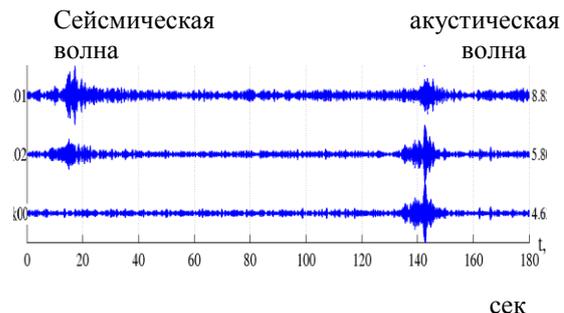


Рис.3. Вибрационный источник ЦВ-40 и сейсмические и акустические волны от него, полученные на удалении 50км.

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, в частности, показывают, что в схожих метеоусловиях повышение влажности до 95 % может приводить к (3-5)- кратному повышению акустического давления вдоль направления ветра. Как показывают результаты экспериментов, свыше 95% -ной влажности уровни давления существенно уменьшаются.

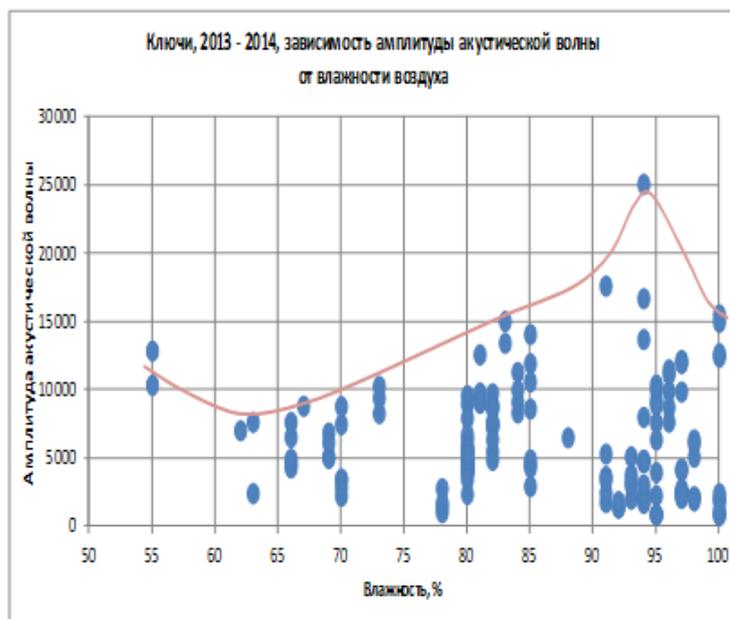


Рис.4. Зависимость амплитуды акустической волны от влажности на трассе протяженностью 50 км

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, характеризуемым мощностью в тротиловом 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.1), а также в контрольной точке вблизи взрыва (на удалении от эпицентра 0.5 км). В качестве примера на рис.5 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 тротиловым 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.

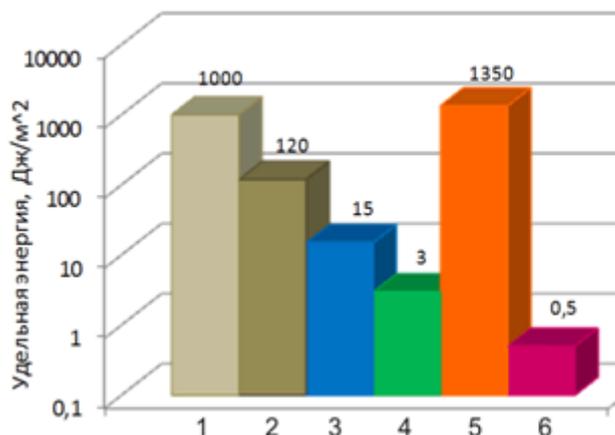


Рис.5. Критические значения удельной энергии для строений: 1 – жилое здание при однократном взрыве; 2 – жилое здание при многократных взрывах; 3 – оконное стекло толщиной 2–3 мм; 4 – для человека. Значения удельной энергии от взрыва: 5 – на удалении от взрыва 0.5 км; 6 – на удалении 10 км.

#### Заключение

1. Предложена 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.

#### Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №17-07-00872-а, №12-01-00773-а,

#### 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., Пушной Б.М., Фатьянов А.Г., Хайретдинов М.С., Шорохов М.Н. Эффект акустосейсмической индукции при вибротсейсмическом 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. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.:Наука, 1973, 261 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 А.М. Общая акустика. М.: Наука, 1973, 496 с.

9. Единые правила безопасности при взрывных работах. М.: НПО ОБТ, 1993. 238с.

УДК 621.373.8

## ЯВЛЕНИЕ ЛАЗЕРА В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

Едалина Д.И., Горячев Н.В., <sup>2</sup>Кузина Е.А., Юрков Н.К.

Пензенский государственный университет, <sup>2</sup>Московский технологический университет

Данная статья представляет собой описание лазера как явления. Рассмотрена история его изобретения, люди, приложившие к этому руку, постепенная эволюция самого лазера, а также удивительное сходство последнего с прибором, описанным в одном небезызвестном фантастическом романе. В числе прочего описаны некоторые сферы применения лазера.

Ключевые слова. Лазер, свет, излучение, изобретение, квант, фотон, Чарльз Таунс, мазер, электрон, гиперболоид.

The phenomenon of the laser in the contemporary world. Edalina D.I., Goryachev N.V., <sup>2</sup>Kuzina E.A., Yurkov N.K. Penza State University, <sup>2</sup>Moscow technological university

This article is a description of the laser as a phenomenon. The history of his invention, people who applied to this hand, the gradual evolution of the laser itself, as well as the surprising similarity of the latter with the device described in one notorious fantasy novel are considered. Among other things, some areas of laser application are described.

Keywords: Laser, light, radiation, invention, quantum, photon, Charles Towns, maser, electron, hyperboloid.

### Введение

Лазер... Что воображение рисует нам, когда кто-то возле нас (или же по телевизору, по радио или в Интернете) произносит это слово? Мы тут же представляем себе тонкий луч очень яркого света, который способен прорезать и уничтожить все, что попадет на его пути. Что ж, мы не так далеки от истины. Правда, далеко не все лазеры так беспощадны к окружающим их предметам, напротив, большинство из них служат во благо и приносят пользу людям. Сегодня такое явление как лазер проникло в очень многие сферы человеческой жизни и применяется в самых разных и непохожих друг на друга отраслях промышленности. Это может быть машиностроение, косметология, медицина, электронная промышленность, а также многие, многие другие, на перечисление всего не хватит и двух таких статей.

Но это сейчас. Это на сегодняшний момент явление лазера в современном мире никого не удивляет и принимается как само-собой разумеющаяся данность. Но что было раньше? Давайте же вкратце рассмотрим историю изобретения этого во многом сейчас незаменимого устройства.

### История создания

Вначале, как водится, не было ничего, а затем посыпались теории и изыскания самых разных ученых из разных уголков света.

Свое начало история берет в 1900 году, когда ученый Макс Планк, немец по происхождению, открывает так называемый квант – неделимую порцию какой бы то ни было физической величины, и дает теоретическое описание частоты электромагнитного излучения, вызывающего, собственно, появление кванта с его энергией. Спустя несколько лет Планк был удостоен Нобелевской премии за свое открытие. Примерно в это же время, не нуждающийся в представлении Альберт Эйнштейн, делает похожее открытие, описывает фотон – наименьшую частицу света, а затем выдвигает и доказывает теорию световой дискретизации (рис. 1).