

# МНОГОФАКТОРНЫЙ МЕТОД ГЕОЭКОЛОГООХРАННОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ.

ХАЙРЕТДИНОВ М.С.\*<sup>1</sup>, АГАФОНОВ В.М.<sup>2</sup>, КОВАЛЕВСКИЙ В.В.<sup>3</sup> ВОСКОБОЙНИКОВА Г.М.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>[MARAT@OPG.SSCC.RU](mailto:MARAT@OPG.SSCC.RU), <sup>2</sup>[AGVADIM@YANDEX.RU](mailto:AGVADIM@YANDEX.RU), <sup>3</sup>[KOVVALEVSKY@SSCC.RU](mailto:KOVVALEVSKY@SSCC.RU), <sup>4</sup>[GULYA@OPG.SSCC.RU](mailto:GULYA@OPG.SSCC.RU)

НОВОСИБИРСК, ИНСТИТУТ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ГЕОФИЗИКИ СО  
РАН,

<sup>2</sup> МОСКВА, МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

12 –я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ»

ГАЭТА, 2018

## ПЛАН ДОКЛАДА

---

- ✘ 1. Введение - геовибрационные технологии
- ✘ 2. Многофакторная проблема прогнозирования геоэкологических рисков от техногенных и природных взрывов
- 4. Метеозависимые факторы оценивания рисков
- 5. Роль пространственной фокусировки акустических колебаний в увеличении геоэкологических рисков для социальной среды.
- 6. Результаты экспериментов по оцениванию рисков.
- 7. Заключение
- 8. Список публикаций

# ВИБРАЦИОННЫЕ ГЕОТЕХНОЛОГИИ В РЕШЕНИИ НАУЧНО– ПРАКТИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ

- ✘ Вибрационные геотехнологии- современные экологически безопасные технологии, предназначенные для активного мониторинга и контроля параметров окружающей природной среды в интересах решения широкого круга народнохозяйственных и научных задач.
- ✘ Основаны на использовании сейсмических вибраторов в качестве источников сейсмических, акустических, электромагнитных колебаний с высокоточными силовыми, фазо-частотными и временными характеристиками. Используются в комплексе с программно-техническими системами регистрации, обработки и интерпретации геофизических данных.
- ✘ **Цель рассмотрения:** технологии оценивания и прогнозирования геоэкологических рисков от природных и техногенных (карьерных, полигонных) взрывов с использованием сейсмоакустических колебаний сейсмических вибраторов.
- ✘ Соответствие критической технологии РФ: **19.Технологии мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды.**

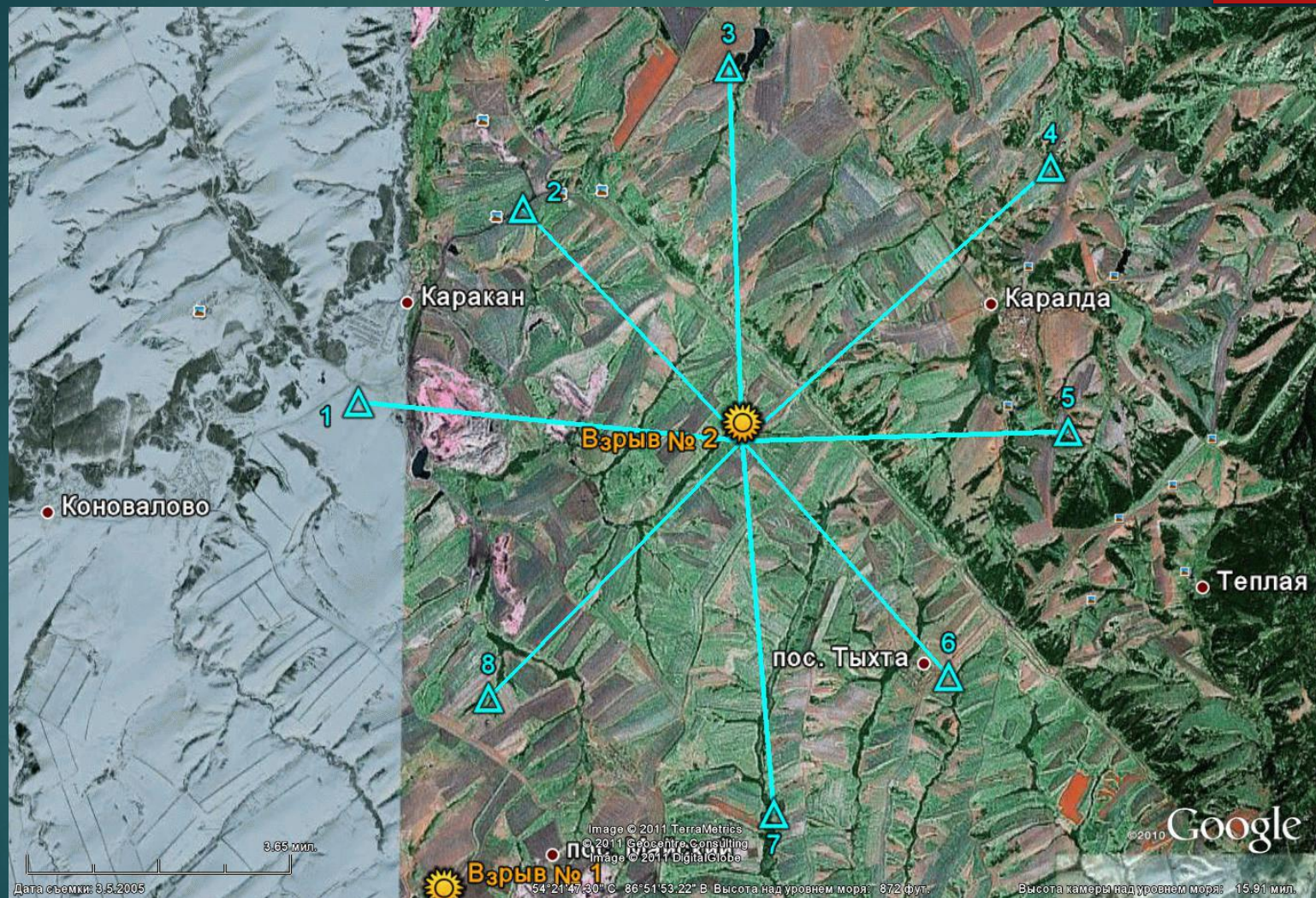
Взрывы, транспортные шумы





# регистрация акустических волн на угольных карьерах Кузбасса

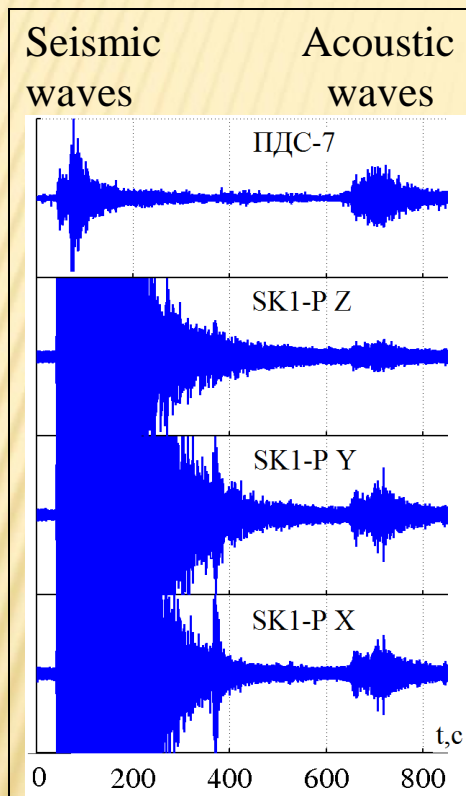
6



Карта расстановки сейсмодатчиков 1-8 по отношению к карьерному взрыву (разрез Виноградовский, Кузбасс).

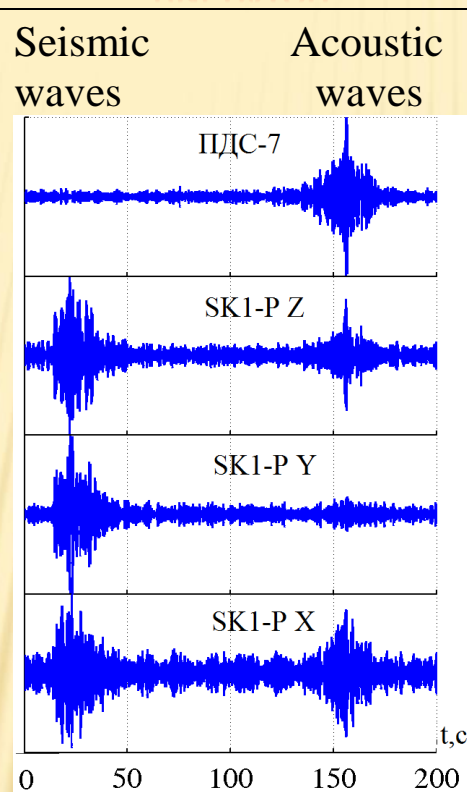
# СЕЙСМИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНЫ ОТ РАЗНЫХ ИСТОЧНИКОВ

## ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ



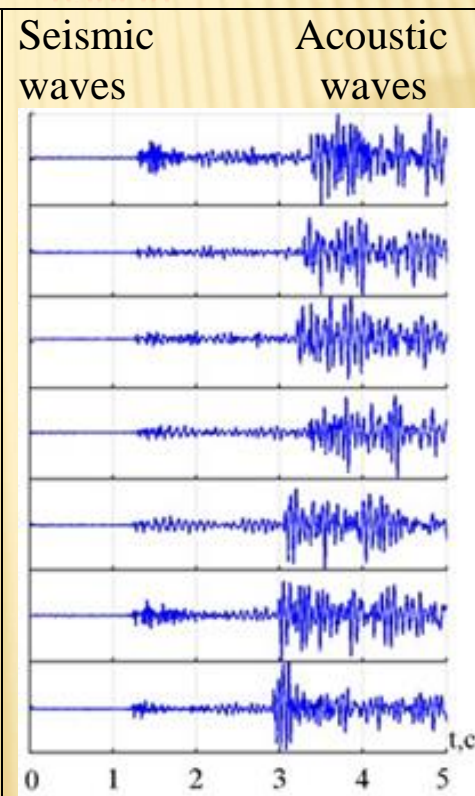
The earthquake to  
remove 205 km

## СЕЙСМИЧЕСКИЙ ВИБРАТОР



The seismic vibrator CV-  
40 to remove 50km

## ПОЛИГОННЫЙ ВЗРЫВ



Surface explosion with a  
charge mass of 200 g to  
remove 956 m.

# ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ ИНФРАЗВУКОВЫХ ВОЛН ОТ МОЩНЫХ ВЗРЫВОВ

В качестве интегральной характеристики при изучении разрушительных свойств инфразвука от взрывов для окружающей среды принимается *удельная плотность акустической энергии*:

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

Здесь  $\rho c$  является волновым импедансом, для воздуха равным 42 г/(см<sup>2</sup>·с);  $p(t)$ - акустическое давление, которое создает распространяющаяся акустическая волна;  $T$  - ее длительность. Акустическое давление одновременно является функцией многих параметров: мощности излучения и расстояния, метеопараметров и неоднородности атмосферы, характеристик покрова и пересеченности дневной поверхности Земли, влияющих на распространение акустических колебаний. Задача определения (1) носит многофакторный характер.



# МНОГОФАКТОРНАЯ МОДЕЛЬ ОЦЕНИВАНИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ

Многофакторная модель интегрального давления как уравнение энергетического баланса:

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

$P_{\Sigma}(t, f, r)$  – 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.

Недостаточность априорных сведений ограничивает возможности получения оценок (1) в численном виде.

**Альтернативный вариант**-использование тестирующих акустосейсмических колебаний вибрационного источника с калиброванными параметрами с привязкой к реальным условиям распространения обоих типов волн. Это позволяет получать прогнозные оценки геоэкологических рисков (1).

# ВИБРАЦИОННЫЕ ИСТОЧНИКИ В ПРОБЛЕМЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ОТ МОЩНЫХ ВЗРЫВОВ

Низкочастотные сейсмические вибраторы предлагаются в качестве **инструмента для прогнозирования геоэкологических рисков** на основе одновременного зондирования смежных сред «земля-атмосфера» в условиях воздействия комплекса природных факторов. .

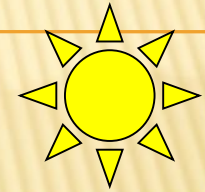
Предпосылки применения вибраторов для проведения исследований:

- ✘ *Многokратно уменьшенная мощность вибраторов в сравнении со взрывами, что определяет их экологическую чистоту;*
- ✘ *Высокие метрологические силовые и частотно-временные характеристики*
- ✘ *Эквивалентность откликов сред в ответ на зондирование вибраторами и взрывами-определяет приемственность методов интерпретации, ранее созданных для традиционных взрывных технологии;*
- ✘ *Способность вибраторов одновременно порождать акустические колебания в атмосфере и сейсмические в земле.*
- ✘ Представлены методологический подход, а также результаты экспериментальных и теоретических исследований по оцениванию влияния метеопараметров на распространение сейсмических и акустических волн от вибраторов, полигонных и карьерных взрывов в интересах геоэкологического прогнозирования, .



# ИЗЛУЧЕНИЕ СЕЙСМИЧЕСКИХ И АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ВИБРАЦИОННЫМ ИСТОЧНИКОМ

СООТНОШЕНИЕ МОЩНОСТЕЙ АКУСТИЧЕСКИХ И СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН:



Вибратор ЦВ-40

$$W^A / W^P \sim 0.02.$$



Акустическая волна



Мобильная сейсмическая группа

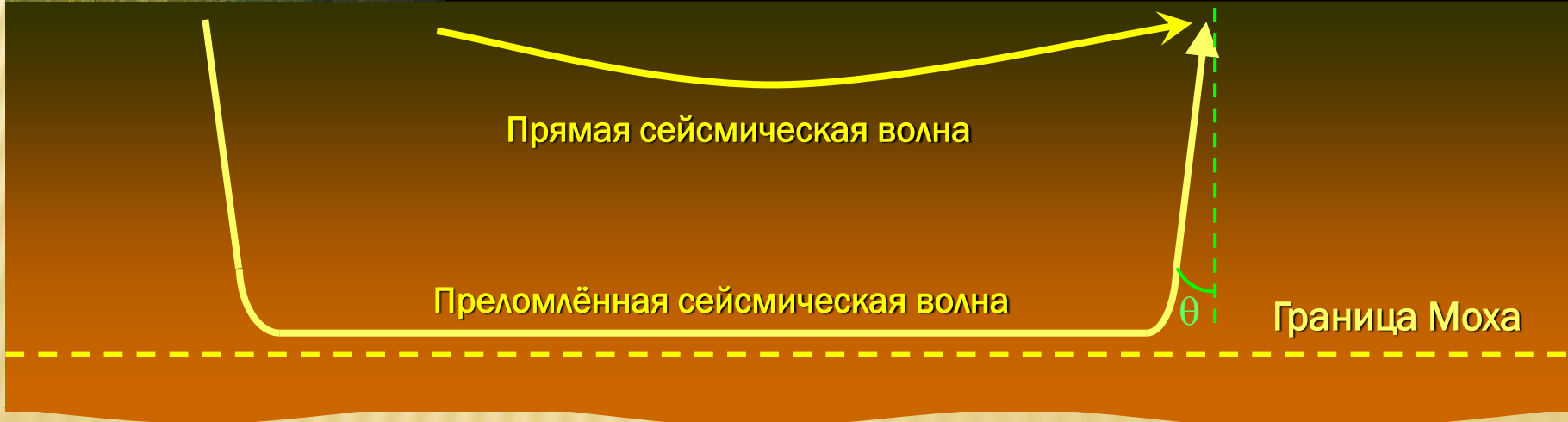


Прямая сейсмическая волна

Преломлённая сейсмическая волна

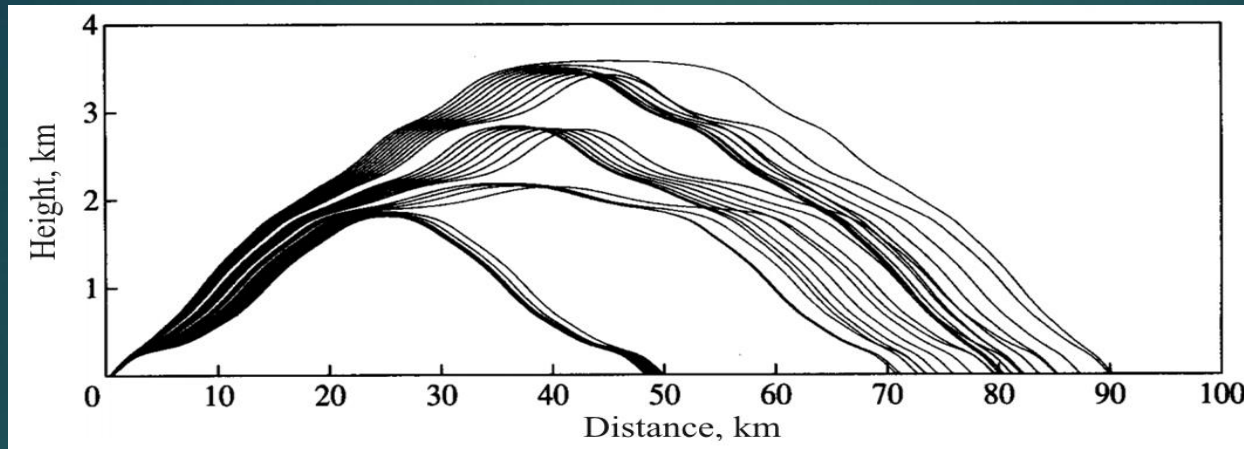
$\theta$

Граница Моха

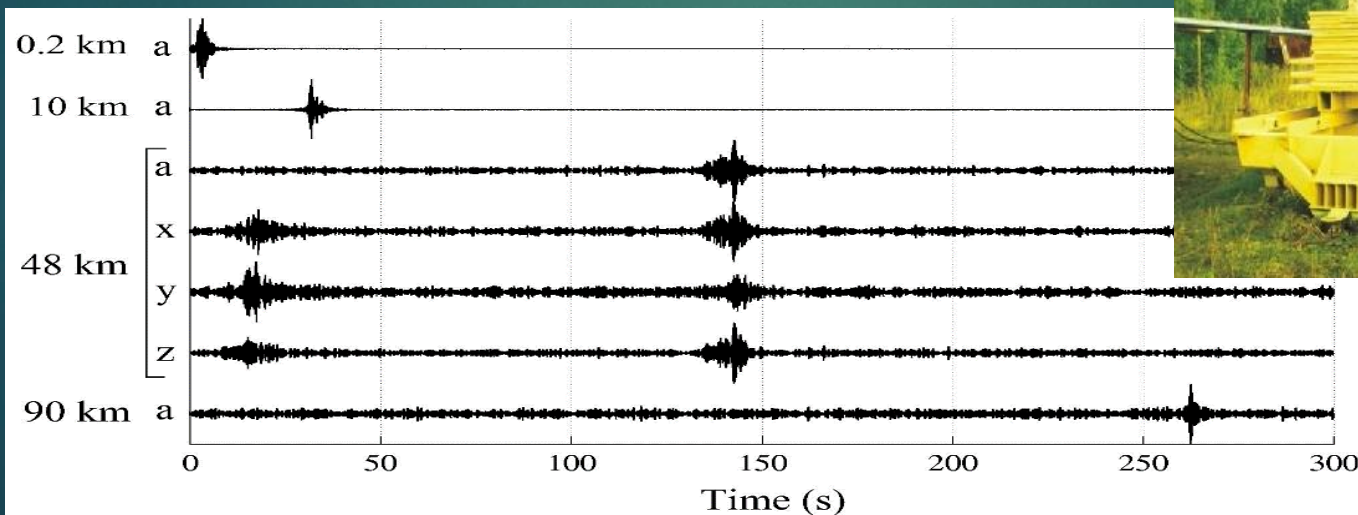


# Зональность акустического зондирования: вычисленные высотные профили распространения инфразвука в атмосфере и акустические волны от вибратора ЦВ-40 на 100-км профиле

Г Gulyev V.T., Kuznetsov V.V.,  
Plotkin V.V., Khomutov S.Yu. (2



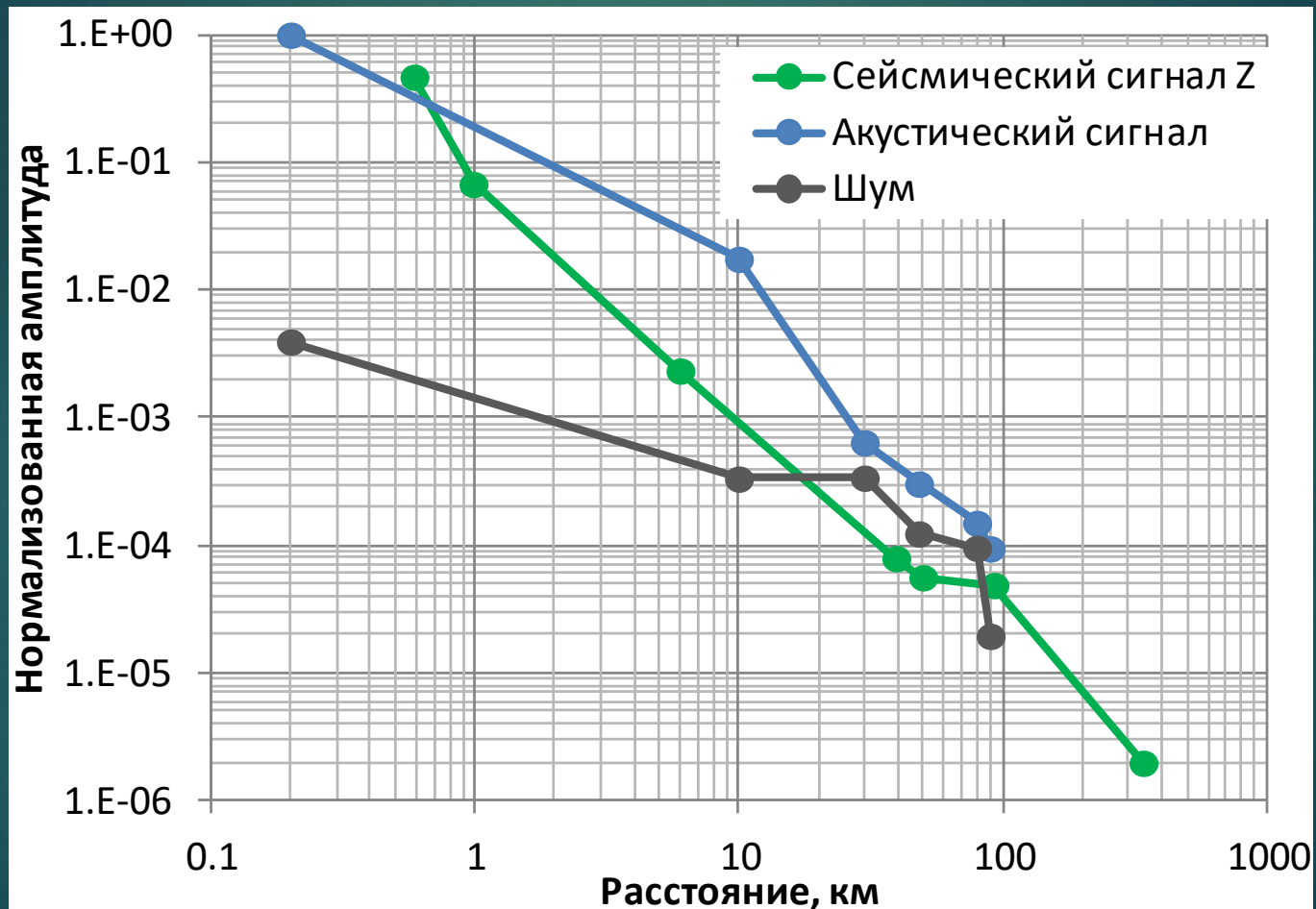
Calculated height profiles of infrasonic waves



Seismic CV-40 vibrator

Results of experiments on the detection of waves from the seismic CV-40 vibrator at distances of 0.2, 10, 48, and 90 km: acoustic waves; at a distance of 48 km for the x, y, z components of the seismic sensor a time of 8.27 s corresponds to the arrivals of longitudinal seismic waves, and a

Графики затухания сейсмических и акустических волн в инфразвуковом диапазоне частот в диапазоне расстояний 0-100 км.



## ДОСТОИНСТВО ИНФРАНИЗКИХ ЧАСТОТ В ПРОБЛЕМЕ АКТИВНОГО ГЕОФИЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

В диапазоне дальностей 0-100 км затухание силы инфразвука составляет 40 дБ (0.4дБ/км). Это означает, что на инфранизких частотах ослабление силы звука по расстоянию практически определяется геометрическим расхождением фронта волны. Следовательно, фактор поглощения акустической энергии в атмосфере при этом играет менее существенную роль. Это определяет ценность применения инфранизких частот для решения практических задач геофизического мониторинга, в частности, в изучении проблемы взаимодействия геофизических полей, рассматриваемой в данной работе.

# 1. СВЯЗЬ ИНТЕГРАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ С МЕТЕОФАКТОРАМИ: НАПРАВЛЕНИЕ И СКОРОСТЬ ВЕТРА, ТЕМПЕРАТУРА, ВЛАЖНОСТЬ

Уравнение состояния

$$f(p, \rho, t) = 0$$

Скорость звука по Лапласу:

$$c_{Л} = \sqrt{\gamma \cdot \frac{p}{\rho}} \rightarrow p = \frac{\rho}{\gamma} c_{Л}^2, \quad \gamma = \frac{c_P}{c_V}$$

где  $c_P$  - удельная теплоемкость при постоянном давлении,  $c_V$  - удельная теплоемкость при постоянном объеме.

$$c_o = 20.1 \sqrt{T \left( 1 + 0.273 \frac{e}{p} \right)}, \text{ скорость звука во влажном воздухе.}$$

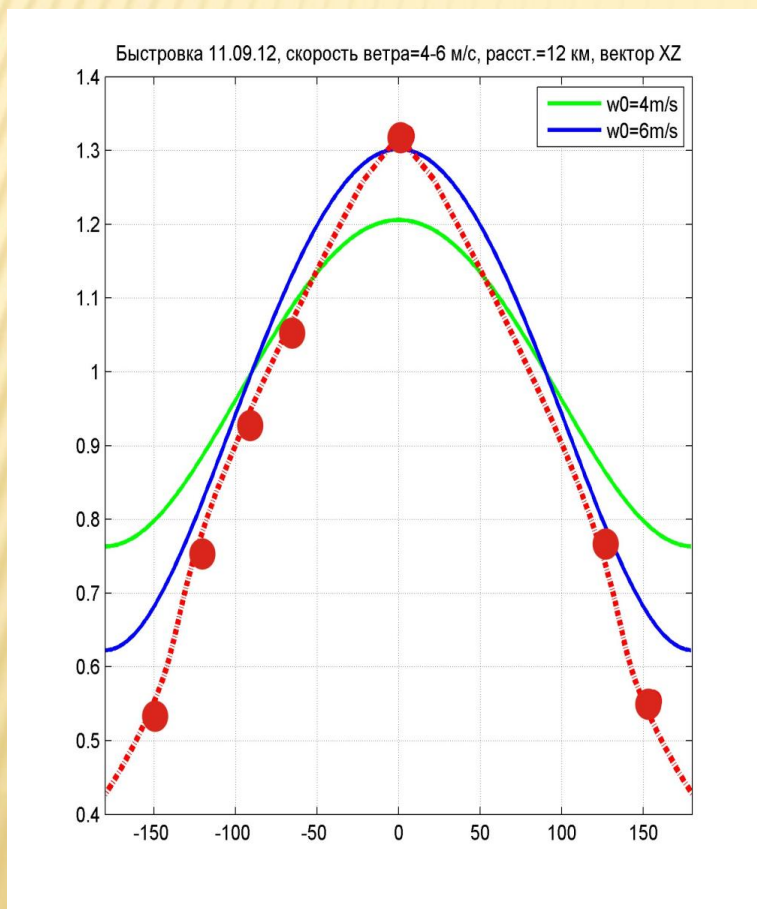
$e$  - влажность воздуха,  $T = t + T_o$ , где  $T_o = 273K$ ;  $C_o = 331 \text{ м/с}$  при  $T = T_o = 273K$

$$c = c_o + w_o \cos \varphi$$

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

## ФАКТОР 2: РАСЧЕТНЫЙ ФАКТОР ФОКУСИРОВКИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН В ПРОСТРАНСТВЕ С УЧЕТОМ ВЕТРА

$f = I[z, \theta, \varphi] / I_0$  – фактор фокусировки = отношению интенсивности звука в неоднородной движущейся среде к интенсивности звука в неподвижной однородной среде (Бреховских Л.М., 1973).

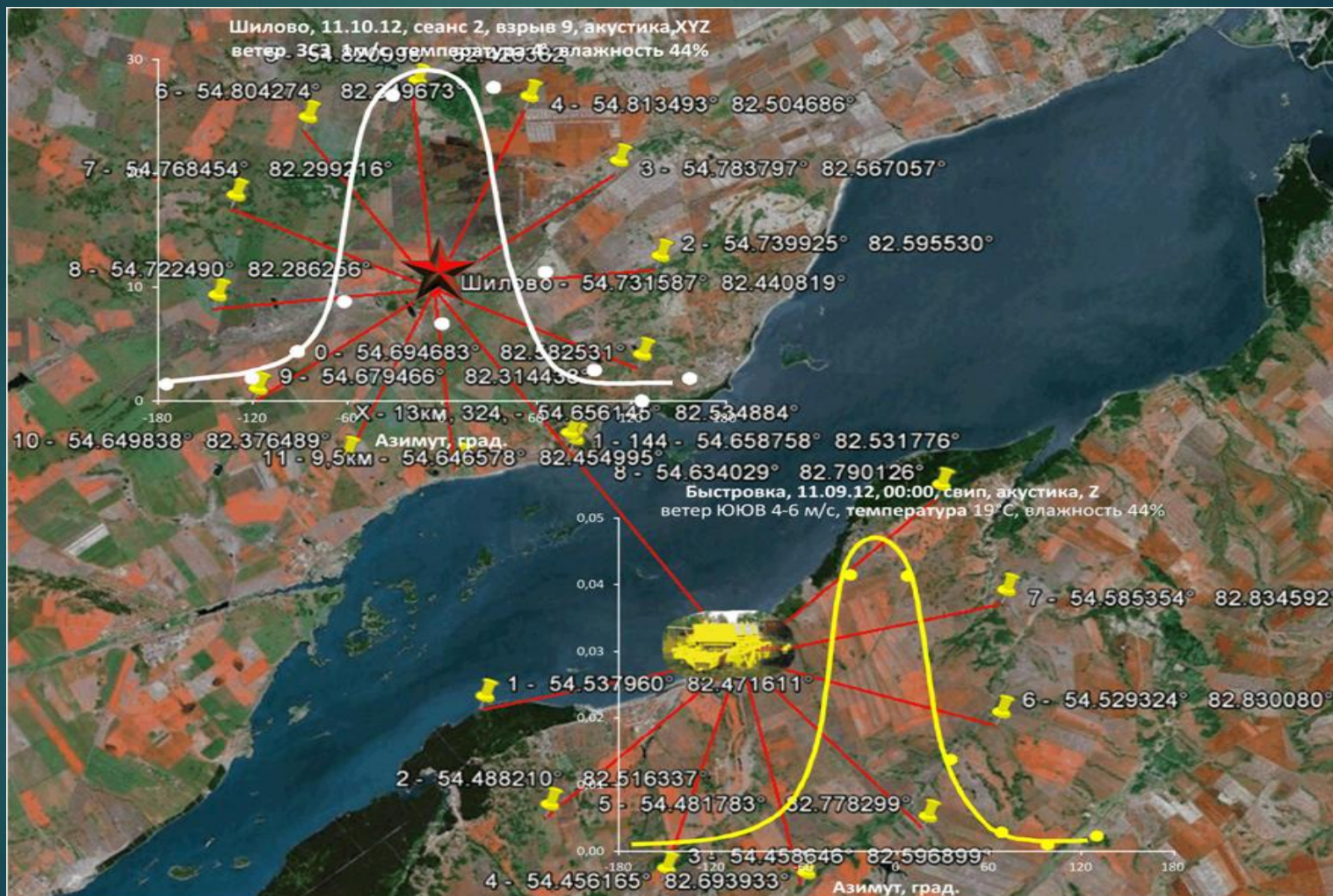


азимут, град.

Зависимость фактора фокусировки  $f$  от горизонтального расстояния от источника  $r$  и азимута  $\alpha$  точки наблюдения: Расчетные графики для радиуса круговой расстановки датчиков с радиусом 12 км и скоростей ветра 6 м/с (синяя кривая) и 4 м/с (зеленая кривая). Высота источника над землей-5 м. Красная кривая : экспериментальная для той же расстановки, скорость ветра 4-6 м/с.



# Изучение эффекта пространственной фокусировки акустических колебаний: круговая расстановка датчиков вокруг взрыва (R=10 км) и вибратора R=12 км)



Датчики

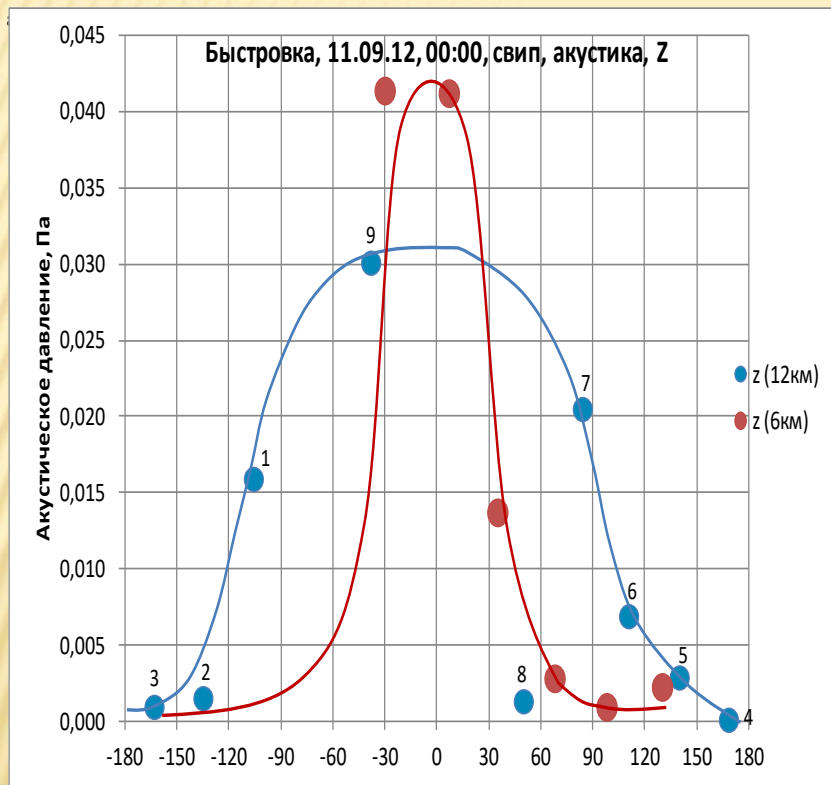


Взрывы на полигоне Шилово



Сейсмический вибратор ЦВ-40

# ЭФФЕКТ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ФОКУСИРОВКИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ОТ ВИБРАТОРА И ПОЛИГОННОГО ВЗРЫВА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ ВЕТРА



Графики зависимости акустического давления от азимута в зависимости от ветра при регистрации колебаний от вибратора ЦВ-40. Красная линия-случай круговой расстановки датчиков с радиусом 6 км при скорости ветра 2-4 м/с; голубая линия- соответственно 12км и 4-

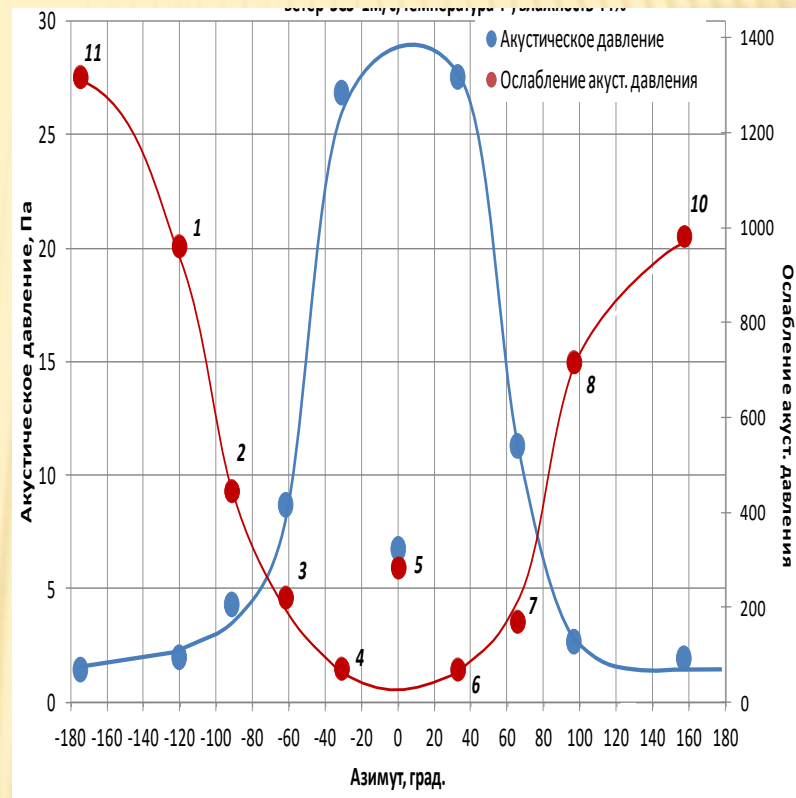
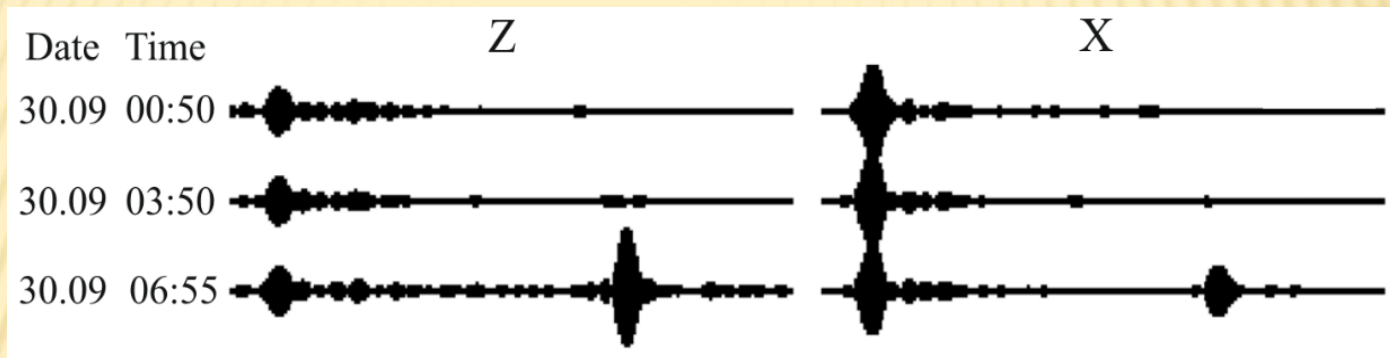


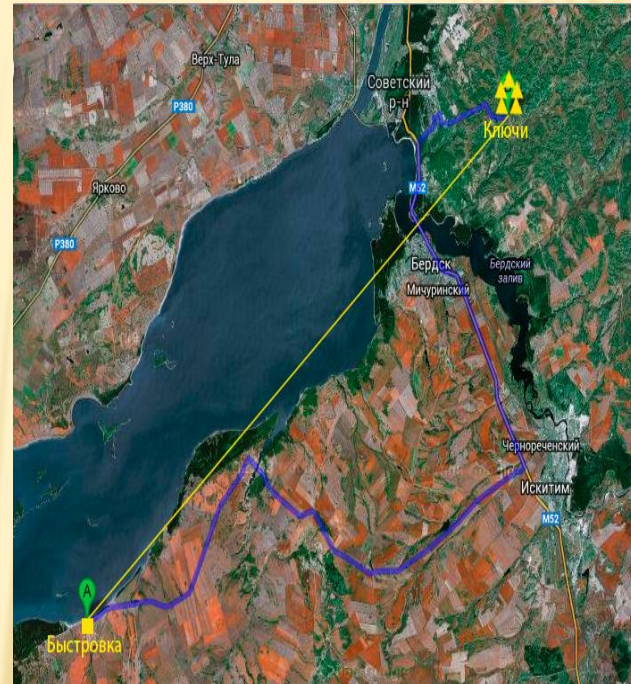
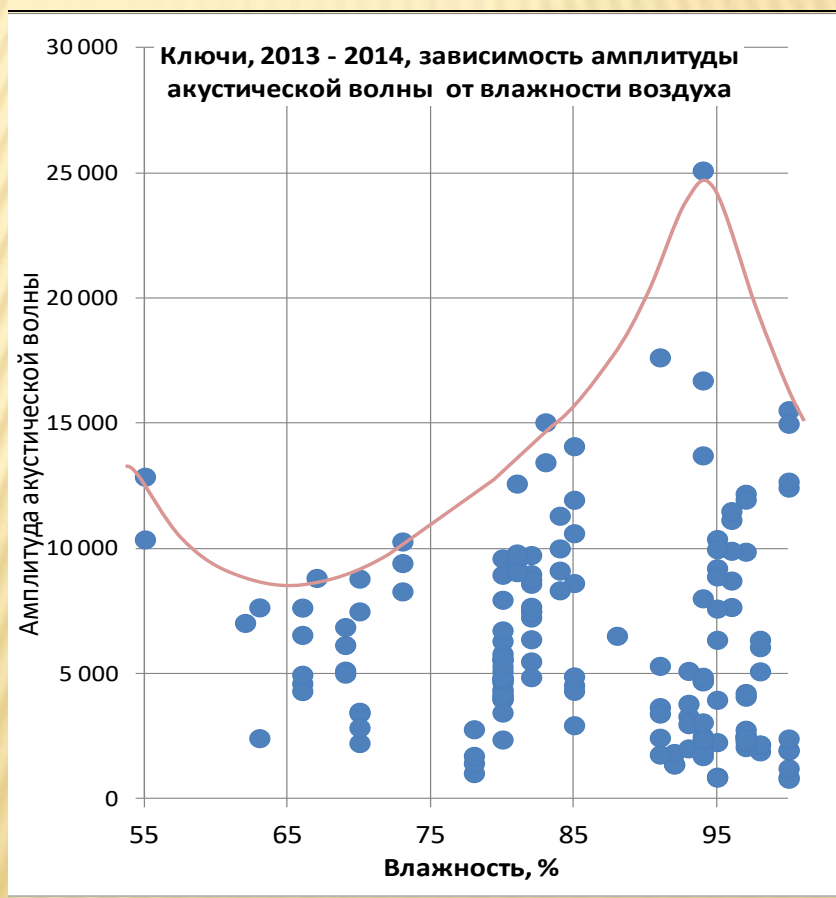
График голубого цвета- зависимость акустического давления от азимута для полигонного взрыва мощностью 125 кг, силе ветра 1 м/с. и расстановки датчиков по кругу с радиусом 10 км. График красного цвета-ослабление уровня акустического давления по отношению к его уровню в контрольной точке

## НАБЛЮДЕНИЕ ФЕНОМЕНА ТЕМПЕРАТУРНОЙ ИНВЕРСИИ В ПРИЗЕМНОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ СЛОЕ ВОЗДУХА В УТРЕННИЕ ЧАСЫ ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ АТМОСФЕРЫ ВИБРАТОРОМ ГРВ-50 НА УДАЛЕНИИ 20 КМ.



. Записи волн в ночные и утренние часы при зондировании в системе «земля-атмосфера» вибратором ГРВ-50 на удалении 20 км. Волны первых вступлений на временах около 4 с соответствуют сейсмическим, на 60 с-акустическим

# ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ИНФРАЗВУКА ОТ ВИБРАТОРА ЦВ-40. РЕГИСТРАЦИЯ НА УДАЛЕНИИ ОТ ВИБРАТОРА НА 50 КМ:



трасса района проведения экспериментов протяженностью 50 км

# КРИТИЧЕСКИЕ НОРМЫ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ОТ ВЗРЫВОВ.

Геоэкологическое воздействие карьерных взрывов оценивается *удельной плотностью энергии*

$$E = \frac{1}{\rho c_0} \int_0^T p^2(t) dt$$

$\rho c_0$  – удельное акустическое сопротивление воздуха, = 42 г/(см<sup>2</sup>·с);

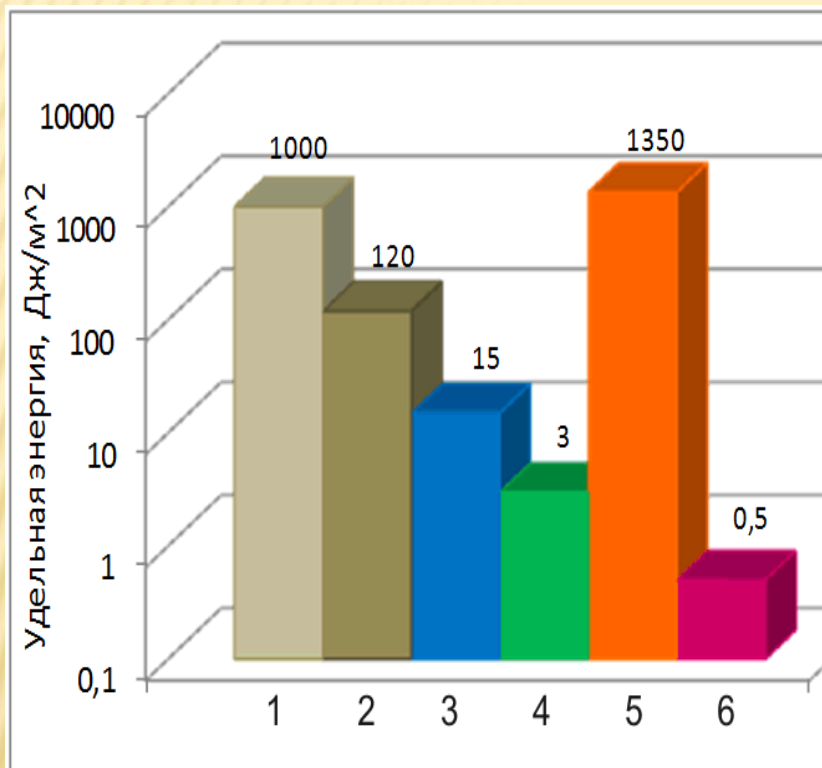
$p(t)$  – акустическое давление, регистрируемое на выходе акустического датчика;

$T$  – длительность акустической волны. Допустимые табулированные значения удельной плотности энергии даются в единицах дж/м<sup>2</sup>.

| Охраняемый объект                          | Критическое значение удельной энергии $\epsilon_{кр}$ , Дж/м <sup>2</sup> |            |
|--|---|------------|
|  | разрушительной  | безопасной |
| Сейсмическая волна                         |   |            |
| Здание жилое, взрыв однократный            | 2600  | 1000       |
| Здание производственное, взрыв однократный |   | 1500       |
| Воздушная волна                            |   |            |
| Оконное стекло толщиной 2–3 см             | 80  | 15         |
| Взрывной шум (раздражающее действие)       |   |            |
| Человек                                    |   | 3          |

Таблица 1  
Допустимые акустические воздействия

# СОТНОШЕНИЯ ИЗМЕРЕННОЙ УДЕЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ВЗРЫВА С ТРОТИЛОВЫМ ЭКВИВАЛЕНТОМ 125 КГ И КРИТИЧЕСКИЕ НОРМЫ ДЛЯ СТРОЕНИЙ И ЧЕЛОВЕКА

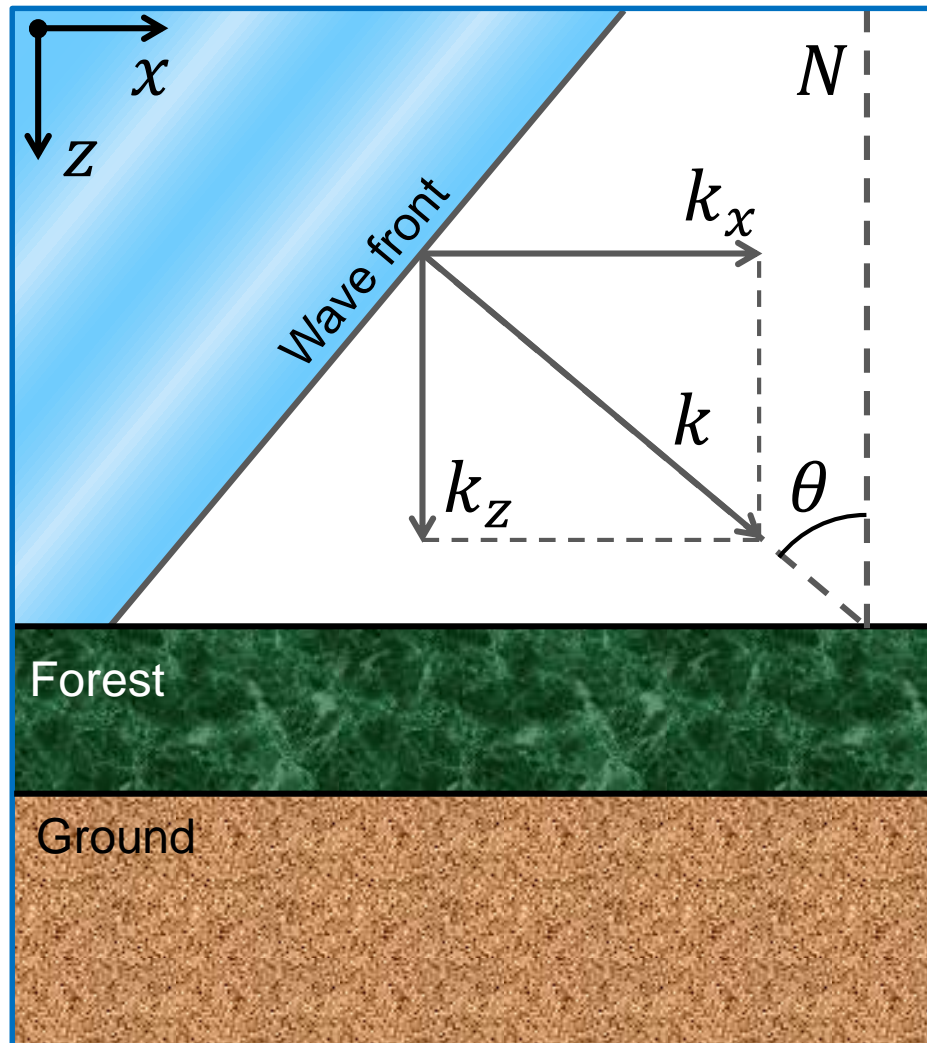


Критические значения удельной плотности энергии для строений: 1- жилое здание при однократном взрыве; 2- жилое здание при многократных взрывах; 3- оконное стекло толщиной 2-3 мм; 4- для человека. Значения удельной плотности энергии от взрыва: 5- на удалении от взрыва 0.5 км; 6- на удалении 10 км.

## Сопоставление акустических воздействий от взрыва и вибратора

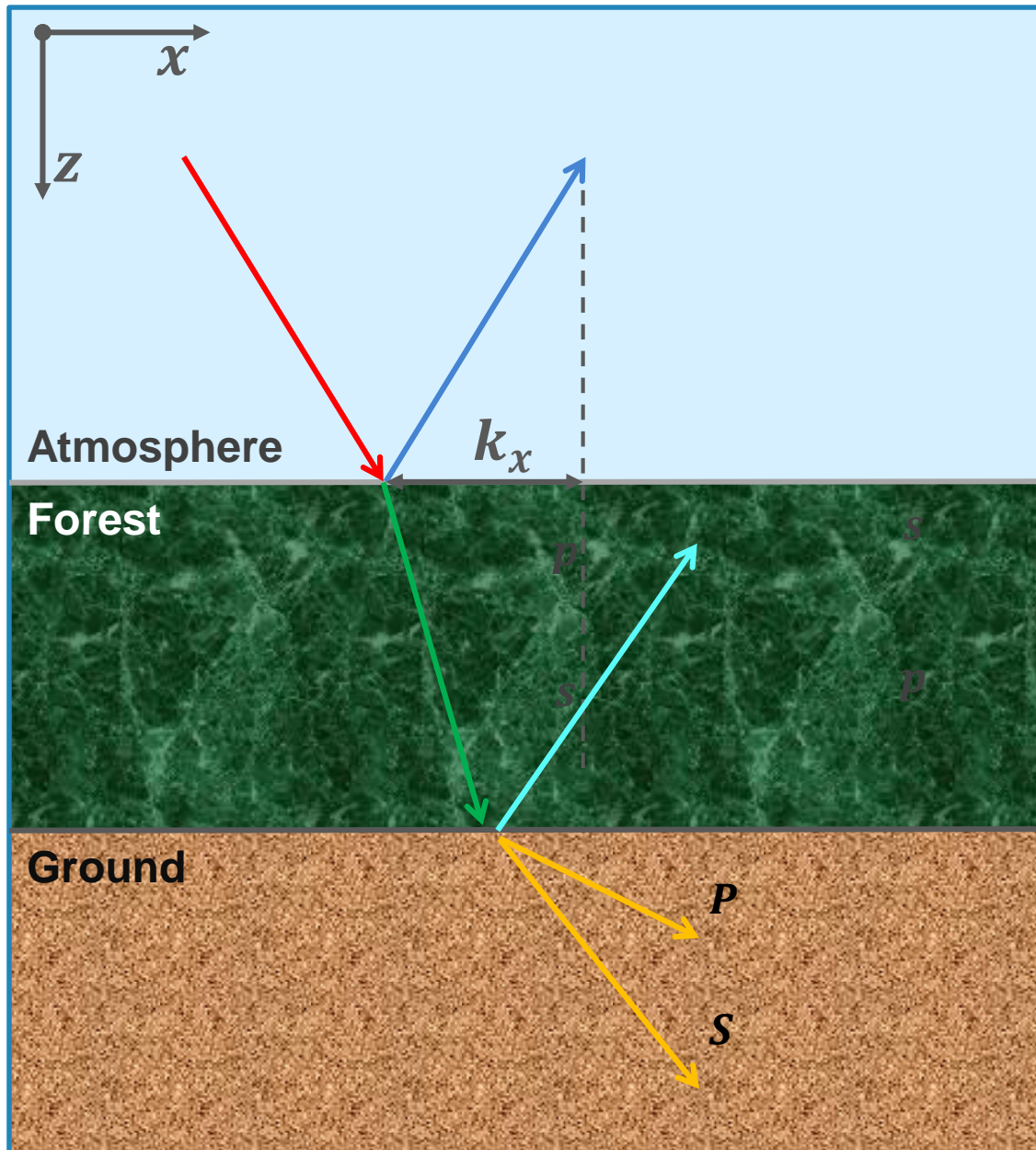
---

- ✘ Оценка максимума давления по записи акустограммы на удалении 10 км от взрыва с тротильным эквивалентом в 125 кг составила  $p_{\max}=15.9$  Па.
- ✘ Для сравнения максимум акустического давления от вибратора ЦВ-40 на удалении 12 км составил  $p=0.013$  Па, т.е. более чем в 1000 раз меньше, чем от взрыва. Это доказывает высокую экологическую безопасность вибраторов как инструментов для проведения экспериментальных исследований.



Acoustic wave falls onto ground with vegetable layer at angle  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ )  
 $k$  – wave vector

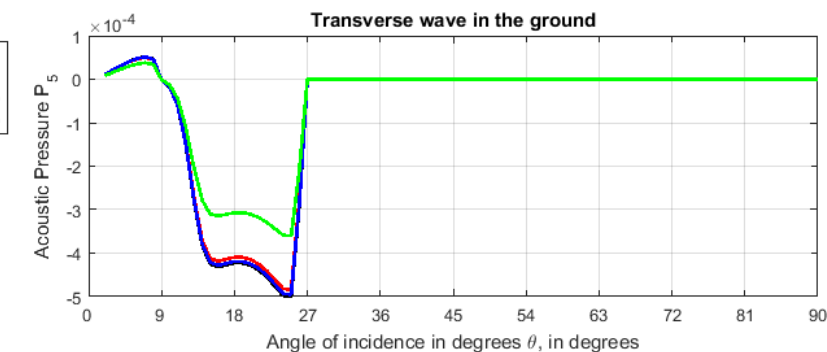
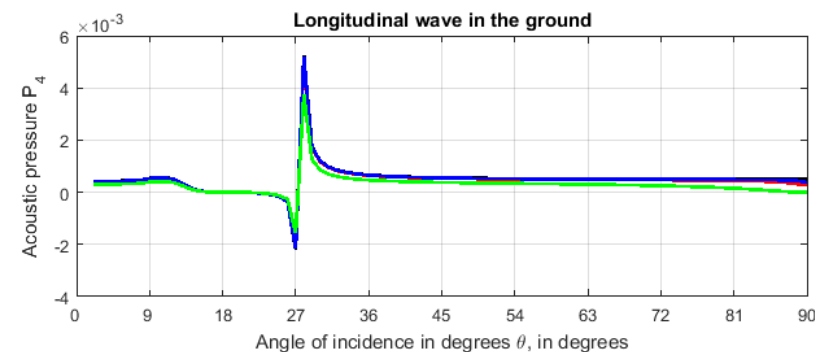
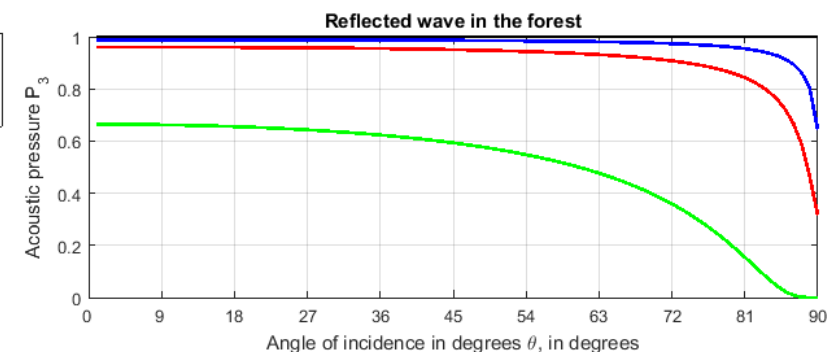
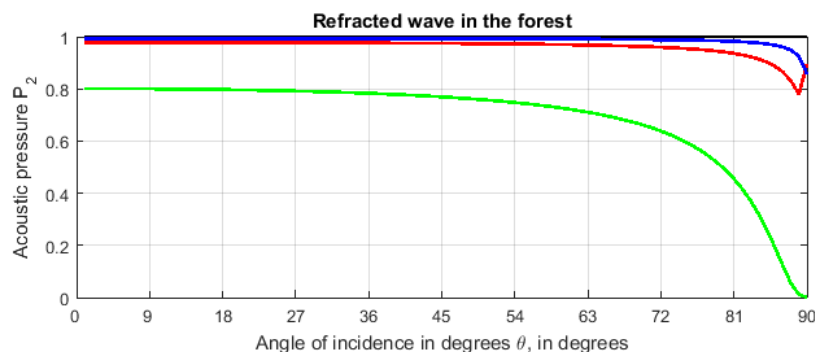
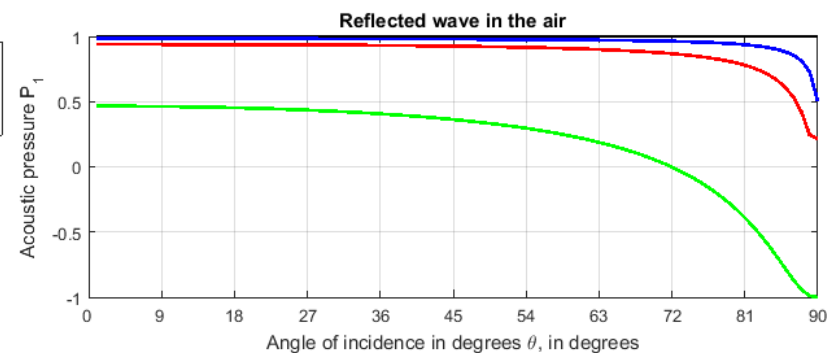
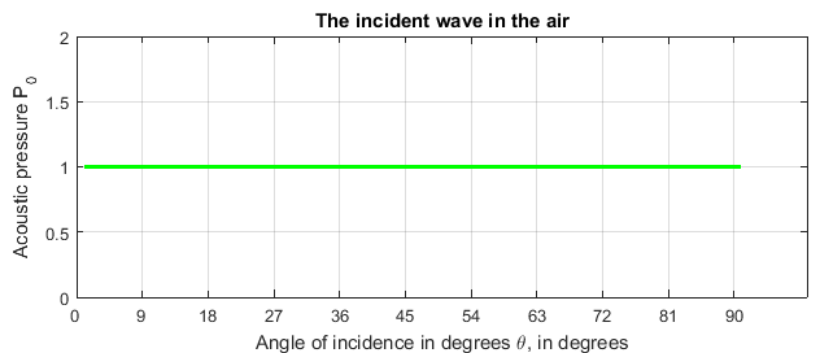




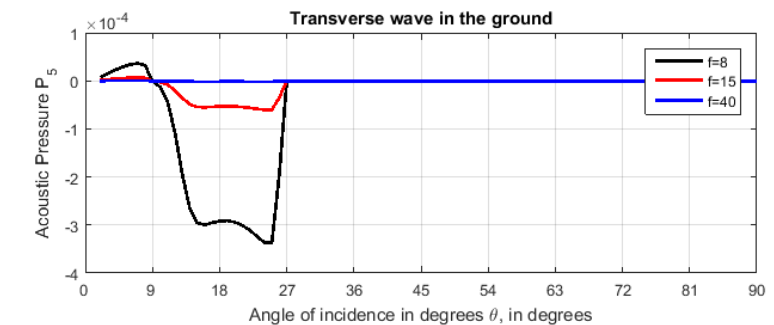
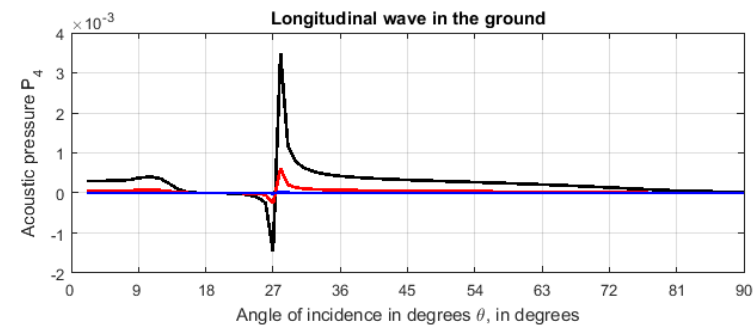
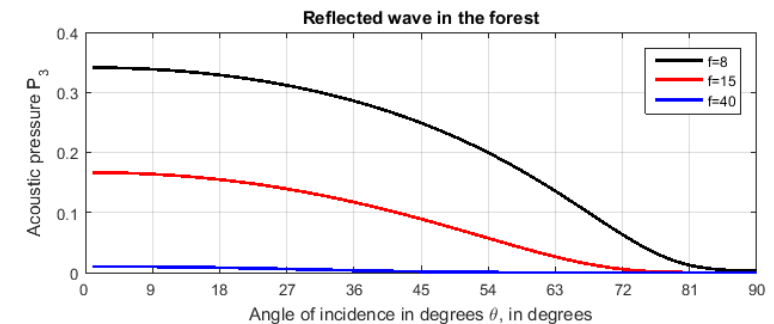
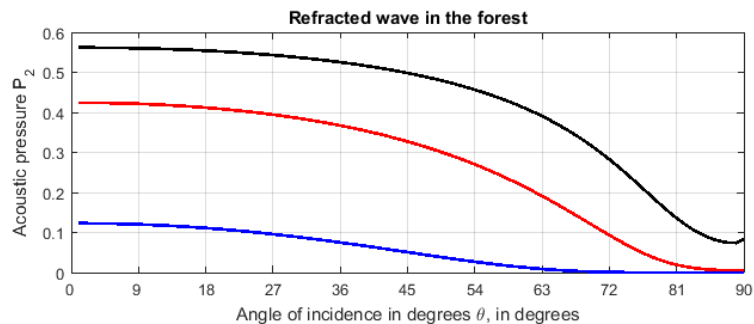
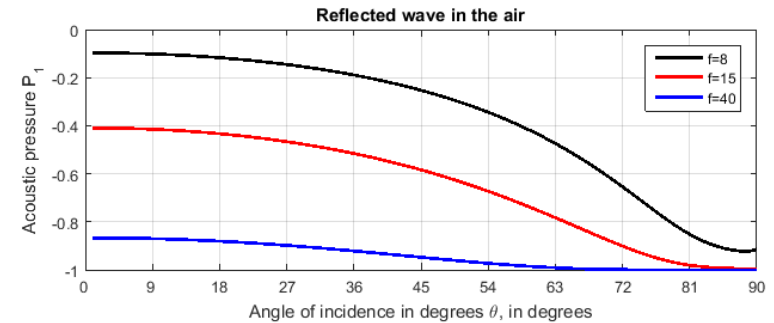
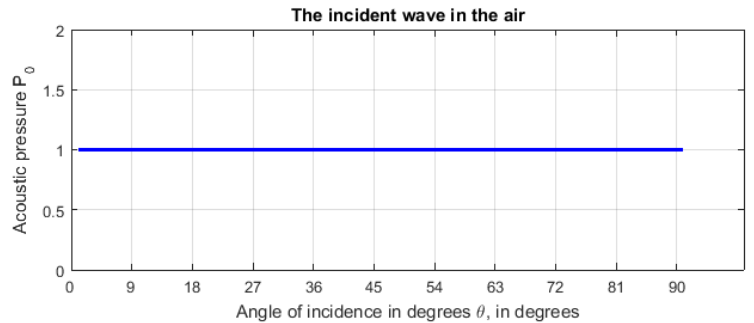
Waves generated by incident acoustic wave:

- Incident wave,
- Reflected wave,
- Refracted and reflected waves in the forest,
- Reflected wave in the forest,
- $p$  Longitudinal and transverse waves in the ground.
- $s$

Graphs of the acoustic pressure dependence for refracted and reflected waves on the incidence angle  $\theta$  at different heights  $H = 0, 5, 10, 50$  m, frequency  $f = 10$  Hz.



Graphs of the acoustic pressure dependence for refracted and reflected waves on the angle of incidence  $\theta$  at different frequencies  $f=8, 15, 40$



# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ✘ Предложена и экспериментально реализована методика изучения влияния сейсмоакустических эффектов от техногенных взрывов — короткозамедленных карьерных, полигонных и др. — на окружающую природную среду и социальную инфраструктуру. Предложенный подход основан на использовании сейсмических и акустических колебаний сейсмических вибраторов, отвечающих требованиям геоэкологической безопасности и обладающих высокими метрологическими силовыми и частотно-временными характеристиками, что гарантирует высокую повторяемость результатов исследований. Это позволяет оценивать геоэкологические риски от взрывов в зависимости от гео- и метеоусловий и мощности взрывов.
- ✘ Проведены экспериментальные исследования, иллюстрирующие явление пространственной фокусировки сейсмоакустических колебаний от вибраторов и взрывов. В частности показано, что сектор концентрации основной энергии акустических волн от вибратора ЦВ-40 при скорости ветра 2-4 м/сек занимает около 60 град. При этом перепад по уровню максимальных и минимальных уровней акустических волн достигает до 50 раз..
- ✘ Дальнейшее направление исследований связано с изучением распространения и воздействия низкочастотных техногенных (транспортных) шумов с учетом влияния совокупности природных факторов
- ✘ ***Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №10-07-00387-а , №11-07-10000-к, 12-01-00773, 16-07-01052 а, 18-47-540006р\_а***

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

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., Ковалевский В.В., А.Г., Хайретдинов М.С. и др..* 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. *Бреховских 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.

---

**Спасибо за внимание!**  
**Thank You for attention!**