

## **Форма 503. РАЗВЕРНУТЫЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ ПО ПРОЕКТУ**

**3.1. Номер Проекта** 18-47-540006 p\_a

**3.2. Название Проекта** РАЗРАБОТКА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ОЦЕНИВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ТЕХНОГЕННЫХ ШУМОВ ДЛЯ СОЦИАЛЬНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ГОРОДА

### **3.3. Коды классификатора**

07-341 Геоинформационные системы. Мультимедийные информационные системы.

07-378 Методы, средства, технологии и системы обработки, анализа и распознавания изображений и сигналов. Методы компьютерной обработки изображений на основе статфизического подхода.

### **3.4. Цель и задачи фундаментального исследования**

**Заявленные цели Проекта на период, на который предоставлен грант 2018 -2019 г.г.**

- Разработка комплекса алгоритмов и программ численного моделирования и обработки экспериментальных данных,
- Проведение численных расчетов, моделирующих условий образования и распространения пары упругих колебаний «сейсмика-акустика» и разработка рекомендаций по созданию методики проведения экспериментальных исследований.
- Создание макета многоканальной дистанционно-распределенной системы регистрации сейсмических и акустических шумовых колебаний и передачи их по телекоммуникационному каналу в центр сбора и обработки данных.
- Разработка методики проведения экспериментальных работ. Проведение экспериментов по регистрации транспортных акустических и сейсмических транспортных шумов. Обработка данных и анализ результатов. Оценивание экологических рисков шумового воздействия.
- Формирование базы записей транспортных шумов.
- Создание многофакторной численной модели шумовых воздействий.
- Разработка предложений по предупреждению и снижению экологических рисков.
- Составление итогового отчета.

### **3.5. Важнейшие результаты, полученные при реализации Проекта**

#### **ПРОВЕДЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Новизна и специфика теоретических и экспериментальных исследований по проекту заключается в разработке комплексного подхода к решению проблемы анализа производственных и транспортных шумов тяжелых видов техники в низком и инфранизком диапазонах частот, наиболее экологически опасных для человека. Инфразвуковые колебания по частоте могут совпадать со многими процессами, происходящими в живом организме. Например, сокращения сердца лежат в инфразвуковом диапазоне 1-2 Гц, дельта ритм мозга (состояние сна) 0,5-3,5 Гц, альфа-ритм мозга (состояние покоя) 8-13 Гц, бета-ритм мозга (умственная работа) 14-35 Гц. При совпадении колебаний инфразвука по частоте с колебаниями в организме человека последние усиливаются, что может привести к расстройству работы органа, его травме. По результатам опубликованных исследований показано, что инфрачастоты около 12 Гц при силе в 85-110 дБ, наводят приступы морской болезни и головокружение, а колебания частотой 15-18 Гц при той же интенсивности внушают чувства беспокойства, неуверенности и, наконец, панического страха. Исследования показали, что частота 19 герц – резонансная для глазных яблок, и именно она способна вызывать расстройство зрения. Вестибулярные нарушения головного мозга связаны с воздействием инфразвука на частоте близкой к 6 Гц.

Различают природные и техногенные источники инфразвука. К первым относятся ураганы, извержения вулканов, электрические разряды и резкие колебания давления в атмосфере. Вторые связаны с различными производственными шумами (например, шумы заводских компрессоров, вентиляторов и др. множества типов вращающихся механизмов).

Существенный вклад в инфразвуковое загрязнение среды дают транспортные шумы как аэродинамического, так и вибрационного происхождения. Максимальные уровни низкочастотных акустических колебаний от промышленных и транспортных источников достигают 100-120 дБ. Ниже в таблице 1 представлены дифференцированные значения типичных средних уровней шумов по видам транспорта, измеряемые в децибелах (дБ).

Децибел как основная мера звука в акустике определяется в виде  $L = 20 * \lg (p/p_0)$ , дБ, где:  $p$  – среднеквадратичное значение звукового давления, измеряемое в паскалях;  $p_0$  нулевой порог слышимости ( $2 \times 10^{-5}$  Па) человеческого уха. Область восприятия звука человеком в шкале децибел от 0 дБ (нулевой порог) до 130–140 дБ (болевого порог). В частности, в полосе частот 10-16 Гц железнодорожный транспорт уровнями шумов от 95 до 100 дБ, промышленные установки аэродинамического и ударного действия 8-12 Гц до 90-105 дБ. Реактивные самолеты на частоте около 20 Гц являются источником снаружи до 130 дБ. [<https://www.activestudy.info/osnovnye-istochniki-i-urovni-transportnogo-shuma>]. Указанные цифры характеризуют усредненный уровень шума. В зависимости от типа двигателя, скорости движения, режима работы, технического состояния средства и ряда других факторов интенсивность шума может существенно колебаться.

Табл. 1

Тип транспортного средства	Интенсивность шума (в дБА)
Легковой автомобиль	70—80
Автобус	80—85
Грузовой автомобиль	80—90
Мотоцикл	90—95
Моторная лодка	90—95
Поезд метро	90—95
Железнодорожный состав (7м от колеи)	95—100
Самолет на взлете	130 – 160

Автомобильные средства по интенсивности шума различаются довольно резко. К самым шумным относятся тяжелые грузовые автомобили и автопоезда с дизельным двигателем (90–95 дБА), к самым «тихим» – легковые автомобили высоких классов (65–70 дБА). Автобусы занимают среднее положение (80–85 дБА). Шум свыше 80 дБА вреден для человеческого организма. Современные условия жизни в крупных городах создают шум, приближающийся к этому значению. Болевой порог лежит в пределах 120–130 дБА.

Волны низкой частоты характеризуются огромной проникающей способностью благодаря их малому поглощению. Вследствие малого поглощения и рассеяния инфразвук может распространяться на очень большие расстояния. В транспортных процессах инфразвуку, как правило, сопутствуют высокочастотные звуки акустического диапазона, поэтому инфразвук мало ощутим, но от этого не становится менее опасным. Выделяют пороги инфразвукового воздействия. Порог опасности смерти оценивается инфразвуком с размахом колебаний 180–190 дБА, который приводит к смерти даже при кратковременном воздействии. Порог потенциальной опасности для жизни человека представляют инфразвуки интенсивностью 155–180 дБА. Они приводят к психофизиологическим отклонениям, которые трудно излечимы. Порог переносимости инфразвука – 140–155 дБА. При длительном действии такого инфразвука в организме развиваются психофизиологические отклонения от нормы, которые носят устойчивый характер. Порог безопасности считается при уровне инфразвука 90 дБА.

В качестве одной из задач проекта решается задача выделения из общего широкополосного спектра транспортных шумов характерных низкочастотных составляющих, являющихся наиболее экологически угрожающими для человека.

Для локализации наиболее выраженных частотных составляющих в шумах отдельных видов транспортов создан оригинальный программно-алгоритмический комплекс регистрации и

обработки сейсмических и акустических шумовых колебаний, порождаемых различными видами тяжелой техники: автомобильной, железнодорожной, авиационной, и получены их частотно-временные спектры, характеризующие основные амплитудно-частотные области сосредоточения шумов.

Из вышесказанного следует, что вопросы экологической изоляции инфразвука приобретают большую актуальность. С учетом этого авторами выполнено численное моделирование на супер-ЭВМ процессов поглощения акустических колебаний низких и инфранизких частот (5-100 Гц) с помощью лесополос с последующей выработкой рекомендаций по шумопонижению. В основу численного моделирования и экспериментальных исследований авторами положен оригинальный вибросейсмический метод зондирования пограничных сред «атмосфера-лесной массив-земля» с помощью мощных вибраторов, обеспечивающих экологическую чистоту и высокую повторяемость результатов исследований. С целью оценивания геоэкологических рисков для окружающей среды от взрывов утилизируемых запасов боеприпасов выполнен анализ сейсмоакустических данных, полученных от взрывов на полигоне Шилово вблизи Новосибирска.

Шумы автомагистралей во многом определяются прохождением тяжелой техники. В связи с этим первоначальные эксперименты связаны с регистрацией колебаний от некоторых видов такой техники с целью их локализации в общем транспортном потоке. В процессе выполнения работ по проекту проведены специально организованные полевые экспериментальные исследования по регистрации сейсмических колебаний в земле и акустических в атмосфере, источниками которых являются шумы, порождаемые гусеничной техникой и тяжелым автотранспортом типа КАМАЗ. Для анализа шумов разработаны программы вычисления пространственно-временных спектров, позволяющие оценить закономерности ослабления уровня транспортного шума низких частот по расстоянию, а также динамику изменений спектров шумов во времени и пространстве и выделить основные моды шумов, характерные для определенного вида движущейся техники. С этой целью были созданы мобильные программно-технические станции для записи сейсмических и акустических колебаний и их последующего оперативного анализа.

#### **СХЕМА И РЕЗУЛЬТАТЫ ПОЛЕВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РЕГИСТРАЦИИ ТЯЖЕЛОЙ КОЛЕСНО-ГУСЕНИЧНОЙ ТЕХНИКИ В 2018Г.**

Схема движения гусеничного транспорта и положение регистрирующих станций № 1, 2 представлены на рис.1. Звездочками обозначены участки пути, на которых проводились измерения характеристик транспортных шумов. Количественные значения основных мод шумов для разных участков представлены в Табл. 2, а графики таких значений по компонентам X,Y,Z представлены на рис. 2, 4, 5, 6. Из анализа представленных графиков следует, что в диапазоне расстояний 450-1100 м затухание сейсмического сигнала составляет 10-13 раз. Основная мода спектров шумовых колебаний по компонентам X, Y, Z, возбуждаемых гусеничной техникой, составляет около 17.88 Гц (рис.3). На удалении 460 м от техники (на минимальном расстоянии) отношение значения основной моды источника к уровню шумов составляет около 20, на максимальном удалении от источника (1083 м) величина этого соотношения падает до 3-5 раз. При этом наилучшее соотношение достигается по компоненте Y.

На рис.4 представлены пространственно-временные спектры по компонентам X и Y отражающие динамику изменений спектров на всем пути движения гусеничной техники. Особенность представленных спектров состоит в том, что начиная с максимального пикового значения, они носят периодически пульсирующий характер, что определяется явлением интерференции колебаний по пространству в неоднородной среде от движущегося источника. Частота пульсаций составляет около 0.03 Гц (рис.4в). Пульсирующий характер спектра может стать причиной дополнительного усиления геоэкологических рисков для человека на инфранизких частотах, совпадающих с физиологическими ритмами электрической активности головного мозга человека.

## ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ЗАПИСЬЮ И АНАЛИЗОМ ШУМОВ ТЯЖЕЛОГО ТРАНСПОРТА.

### Запись и анализ шумов от автомобиля КАМАЗ.

Схема проведения такого эксперимента приведена на рис.5. Как следует из рисунка наименьшее сближение «источник-приемник» составляет 12 м. В процессе проведения эксперимента были произведены два незапланированных последовательных взрывов на удалении около 300 м от регистратора колебаний. На рис.6 представлены результаты обработки в виде спектров полученных записей: рис.6 а – спектрально-временная функция (СВФ) транспортного шума по компоненте X, соответствующего, движению тяжелого грузовика КАМАЗа на всем пути его движения; б б – двухмерный спектр шума от КАМАЗа; б с – СВФ от двух взрывов и шума автомобиля. Как следует из анализа спектра на рис.6 а, максимум его достигается при нахождении КАМАЗа в зоне сейсмического датчика. Здесь наряду с основной модой в спектре шумов грузовика – 43.7 Гц - регистрируются колебания меньшего уровня, простирающиеся до 150 Гц. При выходе из зоны спектр на порядок падает. Это говорит о выраженной зональности действия геоэкологических рисков.

### ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО РЕГИСТРАЦИИ И АНАЛИЗУ ШУМОВ КОЛЕСНО-ГУСЕНИЧНОЙ ТЕХНИКИ, ВЫПОЛНЕННЫЕ В 2019 Г.

Схема траектории движения тяжелой техники и расположения 6-ти регистрирующих станций приведена на рис.7. Станциями одновременно записывались сейсмические и акустические колебания. Одна из станций располагалась в дальней зоне на удалении 6.1 км от траектории движения техники. Ближняя станция с1 располагалась на минимальном удалении от траектории 50 м, группа других (с2-с5) на удалении 450 м. Все записи осуществлялись с привязкой к единому GPS. Обработка записей производилась методами вычисления спектрально-временной функции (СВФ) и двухмерной спектральной функции. Исходные записи и результаты их обработки представлены на рис. 8-12.

Из анализа приведенных записей (рис.8, 11) следует, что основным каналом уверенной регистрации шумов является сейсмический. По нему сейсмические колебания регистрируются на всех станциях, расположенных на разных удалениях от движущейся техники. Сопоставление уровней сейсмических и акустических колебаний показывает, что затухание акустических колебаний по расстоянию происходит быстрее в сравнении с сейсмическими. В пределах дальности в 1 км акустическое затухание шумов гусеничной техники составляет ориентировочно 8-10 раз. Это следует из сопоставления уровней внешних шумов на станциях с1 и с4-с5 (рис.11). Это определяет помехоустойчивость регистрации акустических шумов.

Другая особенность приведенных записей состоит в том, что они иллюстрируют различие распределенности обоих типов шумов по времени и пространству: сейсмические шумы являются сосредоточенными, в то время как акустические рассредоточены. Это подтверждается характером записей на рис. 8, 10, 11. По всей вероятности, это определяется процессами переотражений акустических волн на неоднородной местности. Это говорит о том, что акустические риски могут растягиваться во времени. Результаты спектрального анализа шумов позволяют выделить особенности их частотного состава, характеризующего полосу частот преобладающего шума и характерные спектральные моды. Последние определяются режимами движения тяжелой техники- скоростью, числом оборотов двигателя и вспомогательных механизмов, неровностью подстилающей поверхности. Так, в частности, для КАМАЗа преобладающий спектр частот сейсмического шума простирается от 0.5 до 100 Гц, а наиболее выраженные спектральные моды лежат в районе 10, 43 Гц и в меньшей степени в районе 90 Гц (рис. 9, 10). Акустический шум характеризуется сосредоточенностью в районе низких частот ниже 10 Гц.

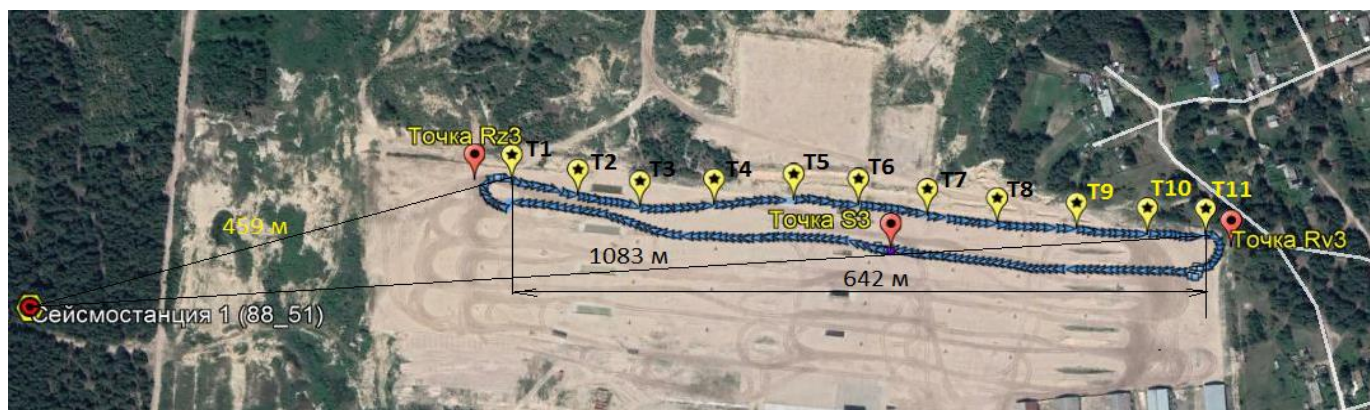


Рис.1. Схема движения транспорта и положение регистрирующей. Звездочками обозначены участки пути, где проводились измерения характеристик транспортных шумов.

Табл.2. Результаты измерений уровней шумов

№ участка	Расстояние, м	Амплитуда			Интервал построения спектра (с-с)	Время GMT начала интервала
	Расстояние, м	X	Y	Z		
1	459	65.67	48.46	40.7	480-490	6:08:00
2	512	26.19	46.95	57.06	502-512	6:08:22
3	567	43.49	50.71	103.1	524-534	6:08:44
4	636	36.74	45.16	48.67	546-556	6:09:06
5	710	54.37	37.36	69.09	568-578	6:09:28
6	769	21.01	43.14	39.61	590-600	6:09:50
7	831	47.06	66.87	52.3	612-622	6:10:12
8	894	27.45	74.78	76.44	634-644	6:10:34
9	966	30.04	26.51	18.41	656-666	6:10:56
10	1032	14.55	12.43	10.48	678-688	6:11:18
11	1083	6.8	4.2	7.6	700-710	6:11:40

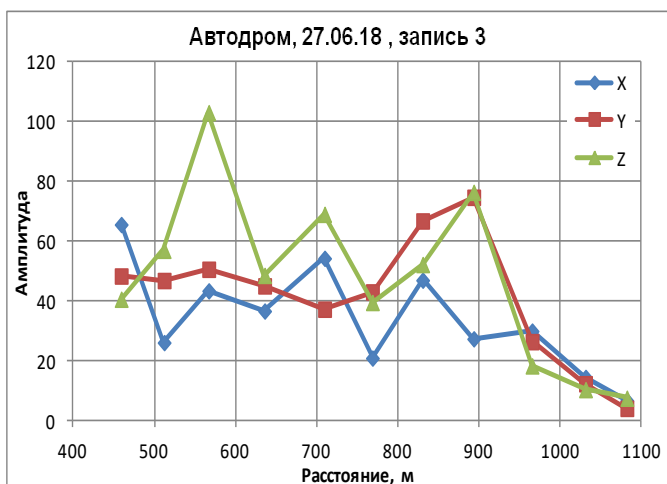


Рис. 2. Графики уровней шумов

Спектры временных интервалов по 10 секунд, соответствующие точкам.

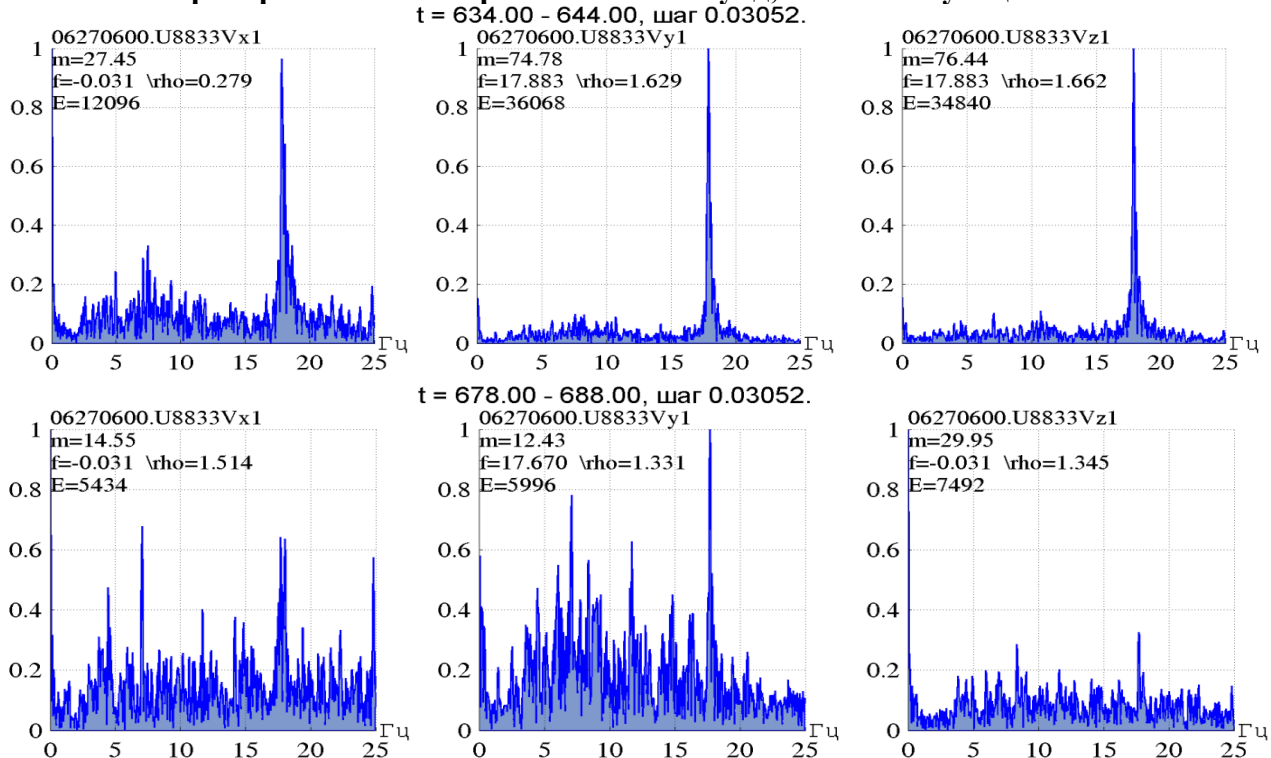


Рис.3. Спектральные уровни шумов гусеничной техники: верхние спектры в точке Rz3 – ближайшей к сейсмостанции, нижние спектры в точке Rv3- самой удаленной от сейсмостанции.

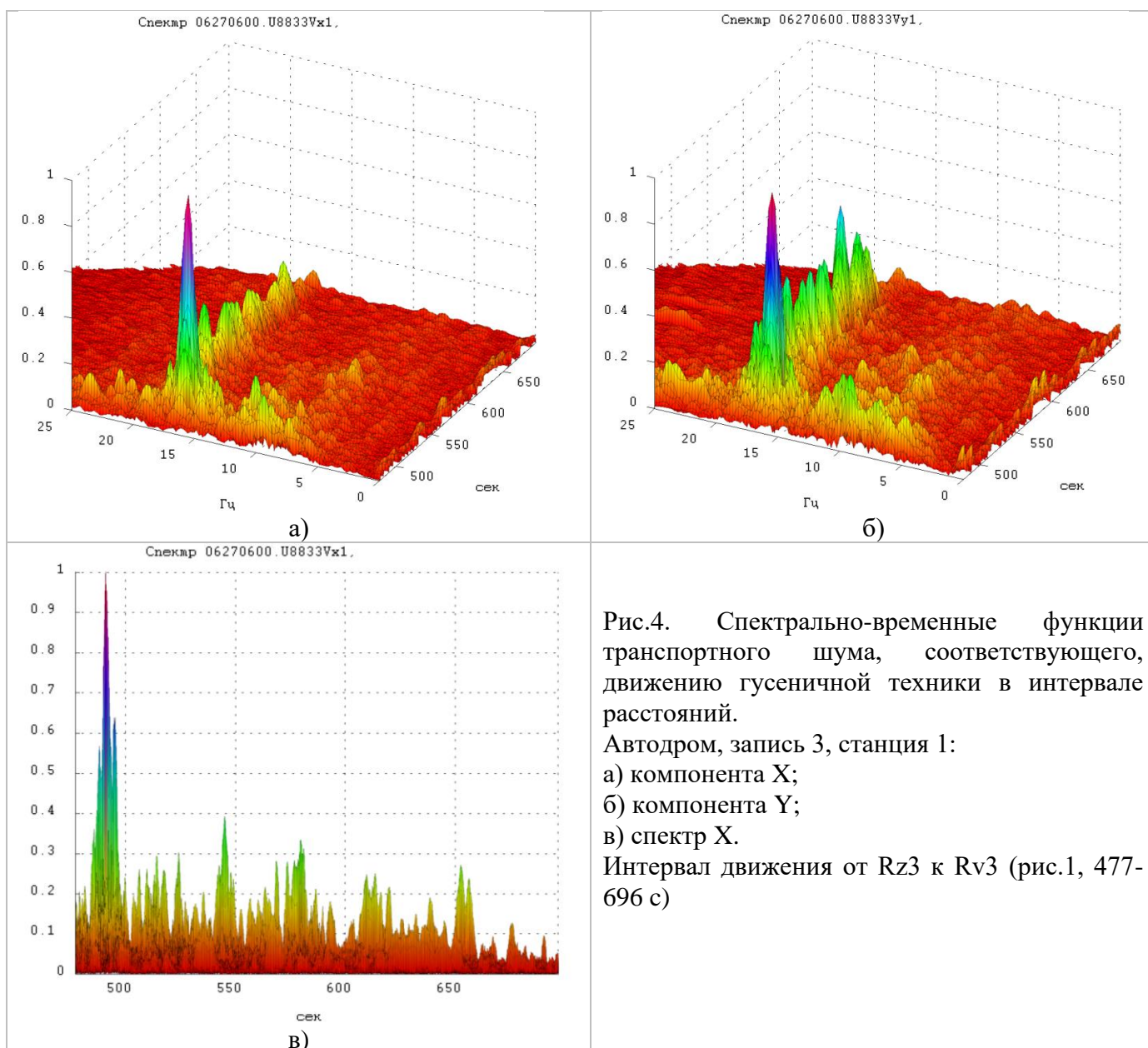


Рис.5. Схема движения тяжелого КАМАЗа и расположения сейсмической станции и мест проведения 2-х взрывов.

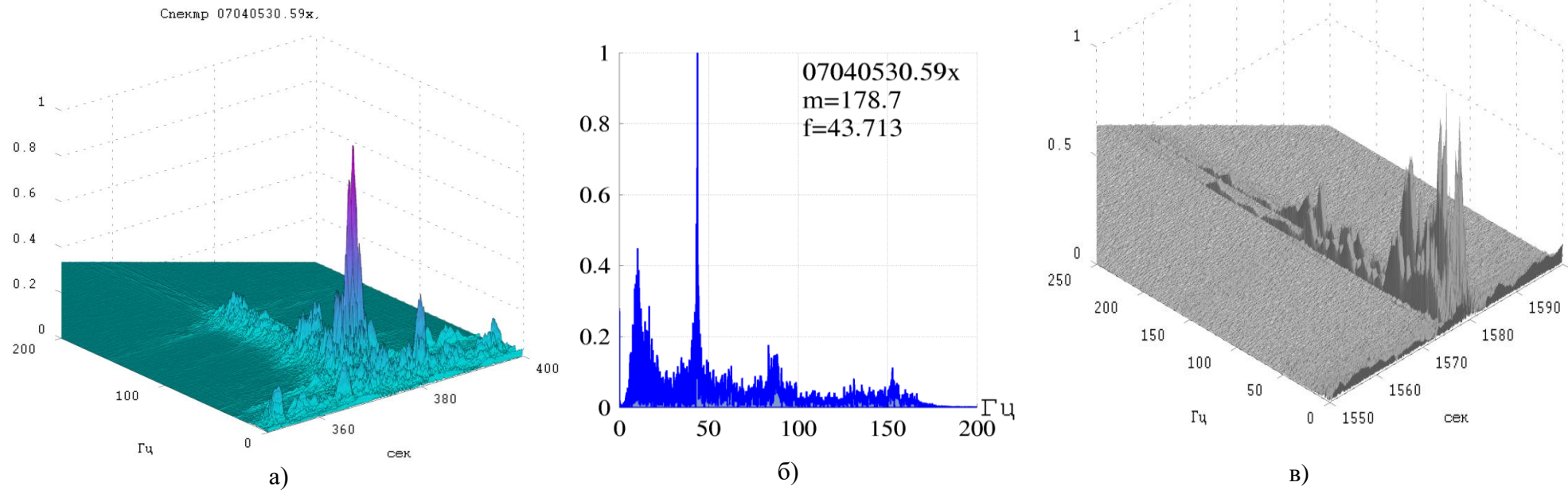


Рис. 6. Спектрально-временные функции (СВФ):

- а) транспортного шума по компоненте X; соответствующего, движению тяжелого грузовика КАМАЗа  
 б) двухмерный спектр шума от КАМАЗа;  
 в) СВФ от двух взрывов и шума автомобиля.

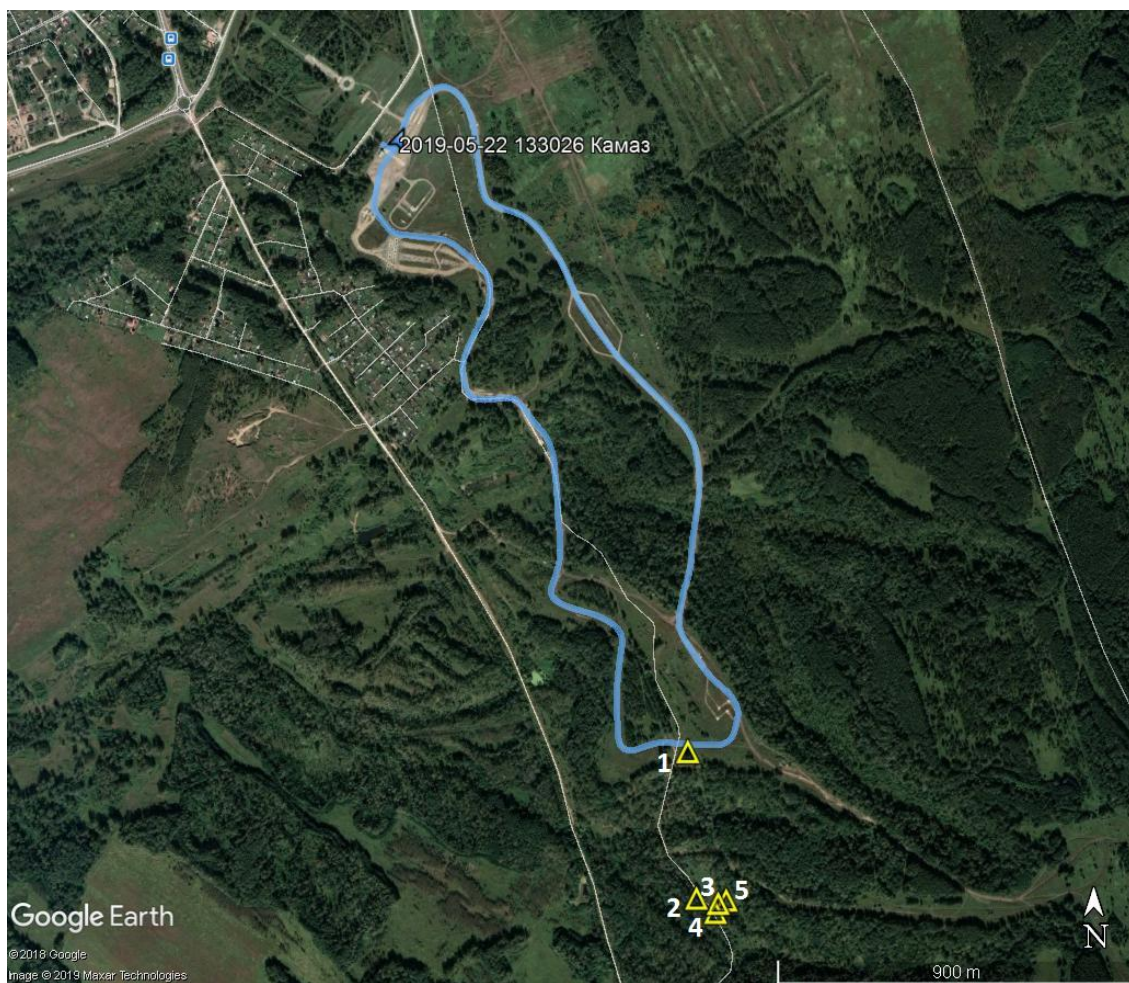


Рис. 7. Схема движения гусенично-колесного транспорта и расположения комплектов станций 1-5.

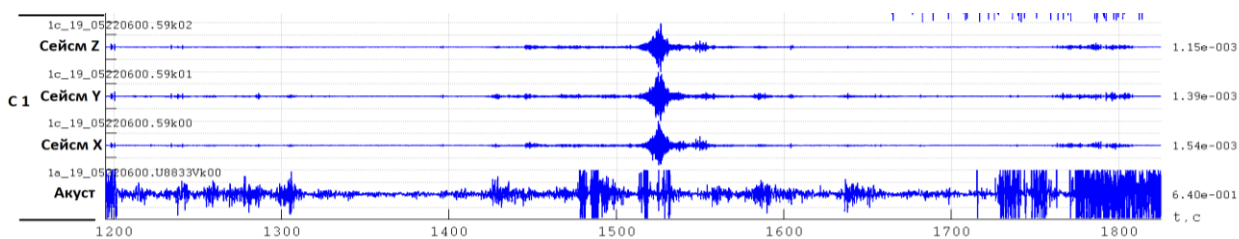


Рис.8. Запись сейсмических и акустического шумов от КАМАЗа Комплект 1 (ближняя зона)

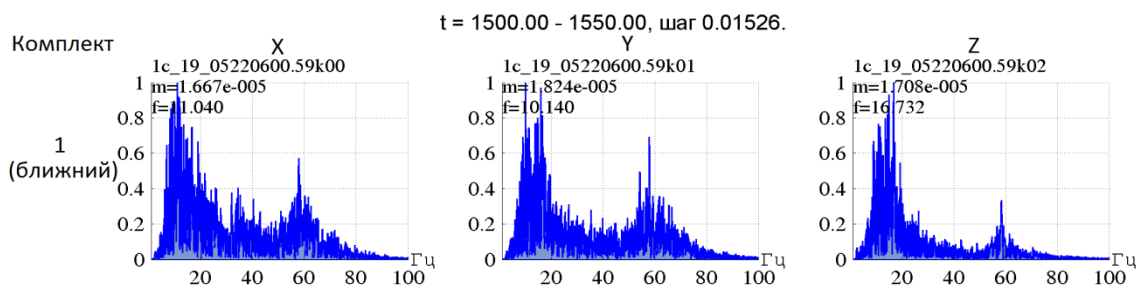
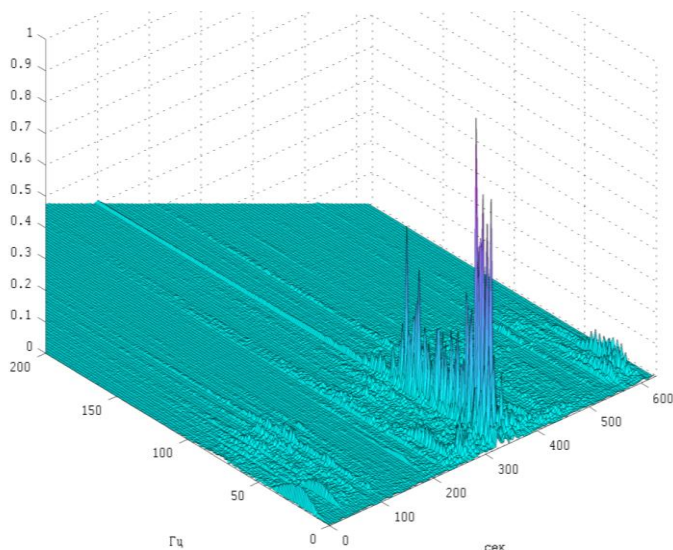


Рис.9. Спектры сейсмических шумов КАМАЗ.

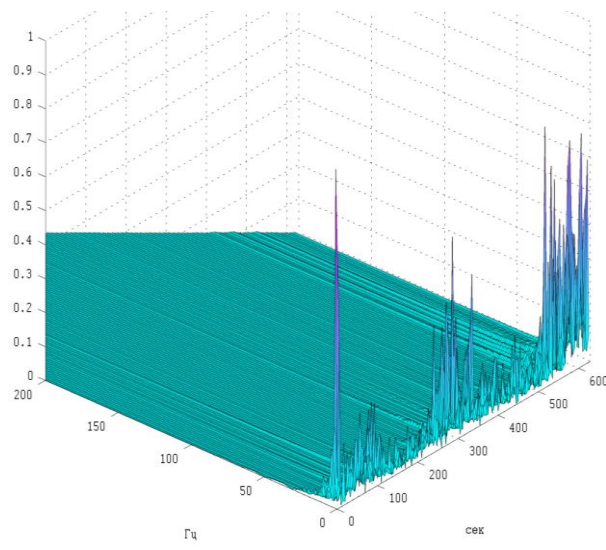


Комплект 1 (ближний), сейсмика Y



а)

Комплект 1 (ближний), акустика



б)

Рис. 10. Спектрально-временные функции шумов КАМАЗа: а) сейсмического (компонента Y), б) акустического.

### Запись шумов движения группы гусеничного транспорта в составе 4-ёх объектов на комплектах станций с1-с5. с1-ближняя станция

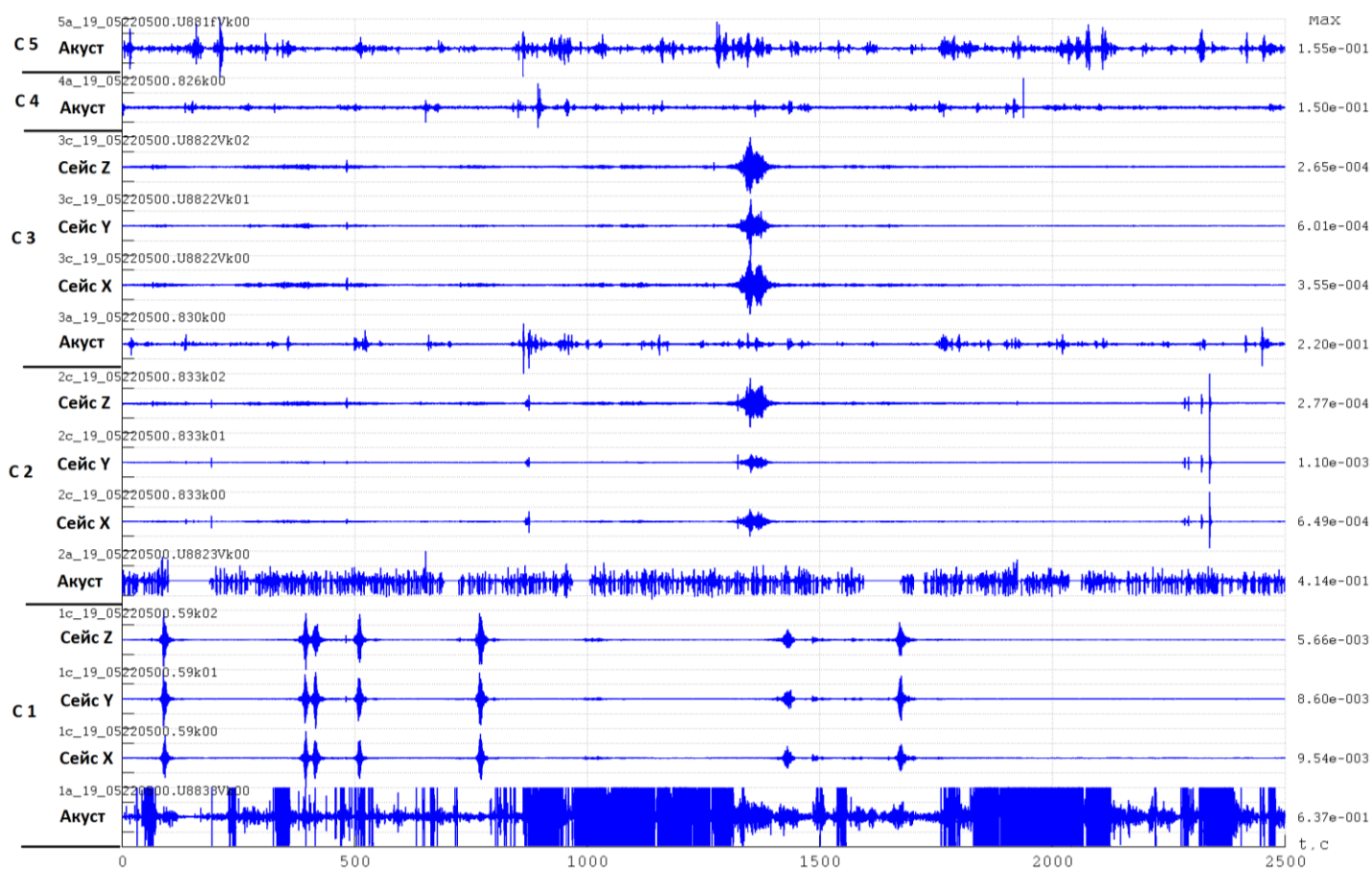


Рис. 11. Обозначения записей слева «сейс.X», «сейс.Y», «сейс.Z», «акуст.» означает записи на станциях сейсмических шумов по компонентам X,Y,Z и акустических.

Регистрация шумов гусеничного транспорта производилась с помощью сейсмостанций с1-с5 (рис.7) и одной удаленной станции, расположенной на расстоянии 6.1 км от траектории

движения транспорта. Результаты анализа полученных записей сейсмических и акустических шумов представлены на рис. 12. Результаты обработки в удаленной точке (6.1 км) в виде спектрально-временной функции представлены соответственно на рис.12а, в. Результаты обработки записей, полученных в ближней зоне на удалении 50 м, представлены на рис.12 б,г. Преобладающий сейсмический шум в данном случае сосредоточен в полосе 5-80 Гц с наличием выраженных спектральных мод в полосе 20-40 Гц. Спектр акустических шумов сосредоточен в полосе 0-20Гц.

Сравнение соответствующих спектров в ближней и дальней зоне говорит об отсутствии спектральных мод шумов от гусеничной техники в удаленной зоне. Зато присутствует сетевая частота 50 Гц и ее третья гармоника.

### 23.05.19, гусеничный транспорт с остановками у препятствий, сеймика, 13:06:46 - 13:27:25

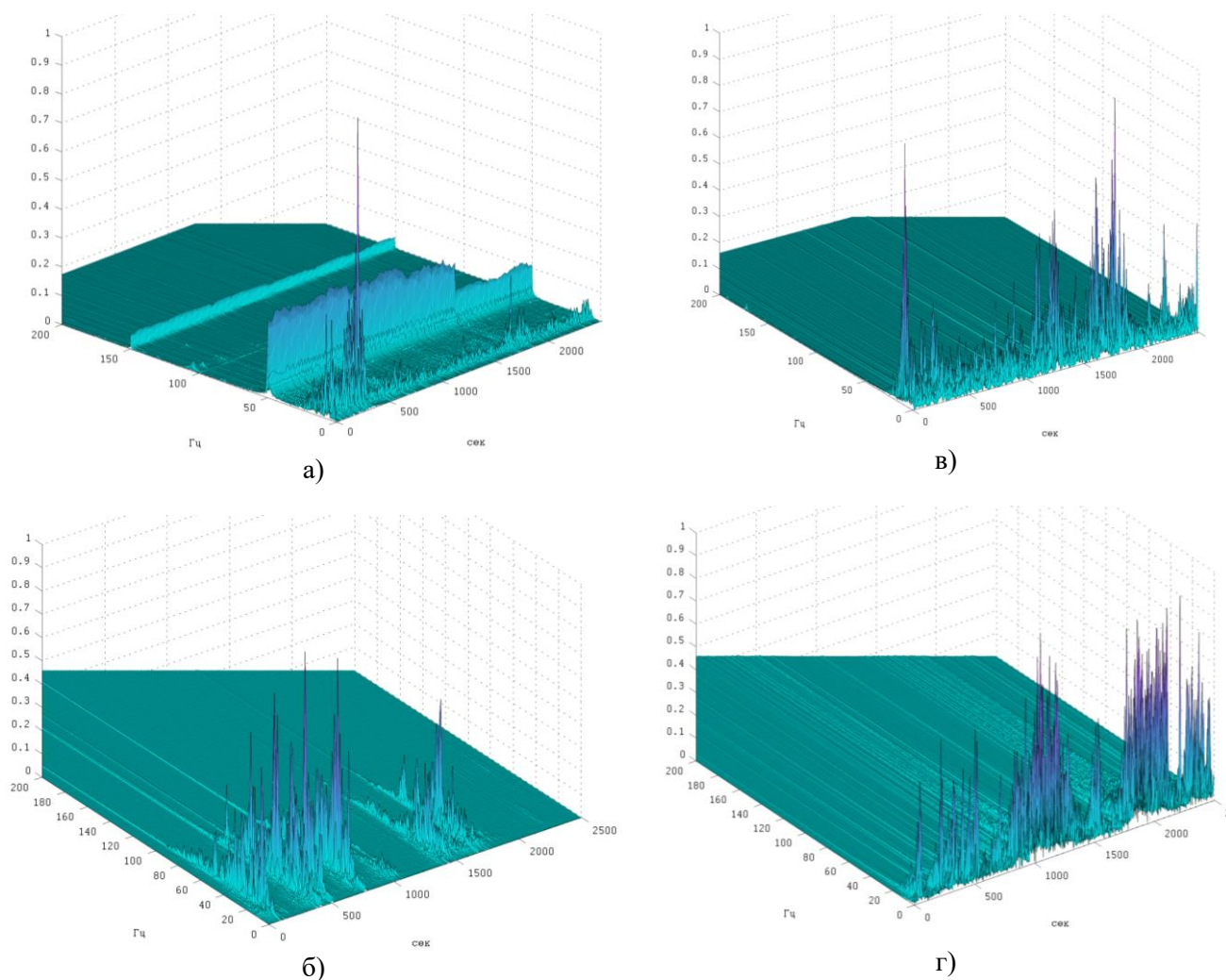


Рис.12. Спектрально-временные функции записи шума гусеничной техники:

- а) на удалении 6.1км, компонента X (сейсмический шум);
- б) в ближней зоне (удаление 50 м), компонента X (сейсмический шум);
- в) акустического шума в дальней зоне (6.1 км);
- г) акустического шума в ближней зоне (удаление 50 м).

### ШУМЫ ЖЕЛЕЗНО ДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА.

Были записаны шумы трех типов составов-электропоездов (электричек), пассажирских, грузовых. Запись выполнялась непрерывно в течение суток. Была накоплена представительная статистика записей сейсмических и акустических шумов. Интегральная картина всех событий в виде записей представлена на рис.13.

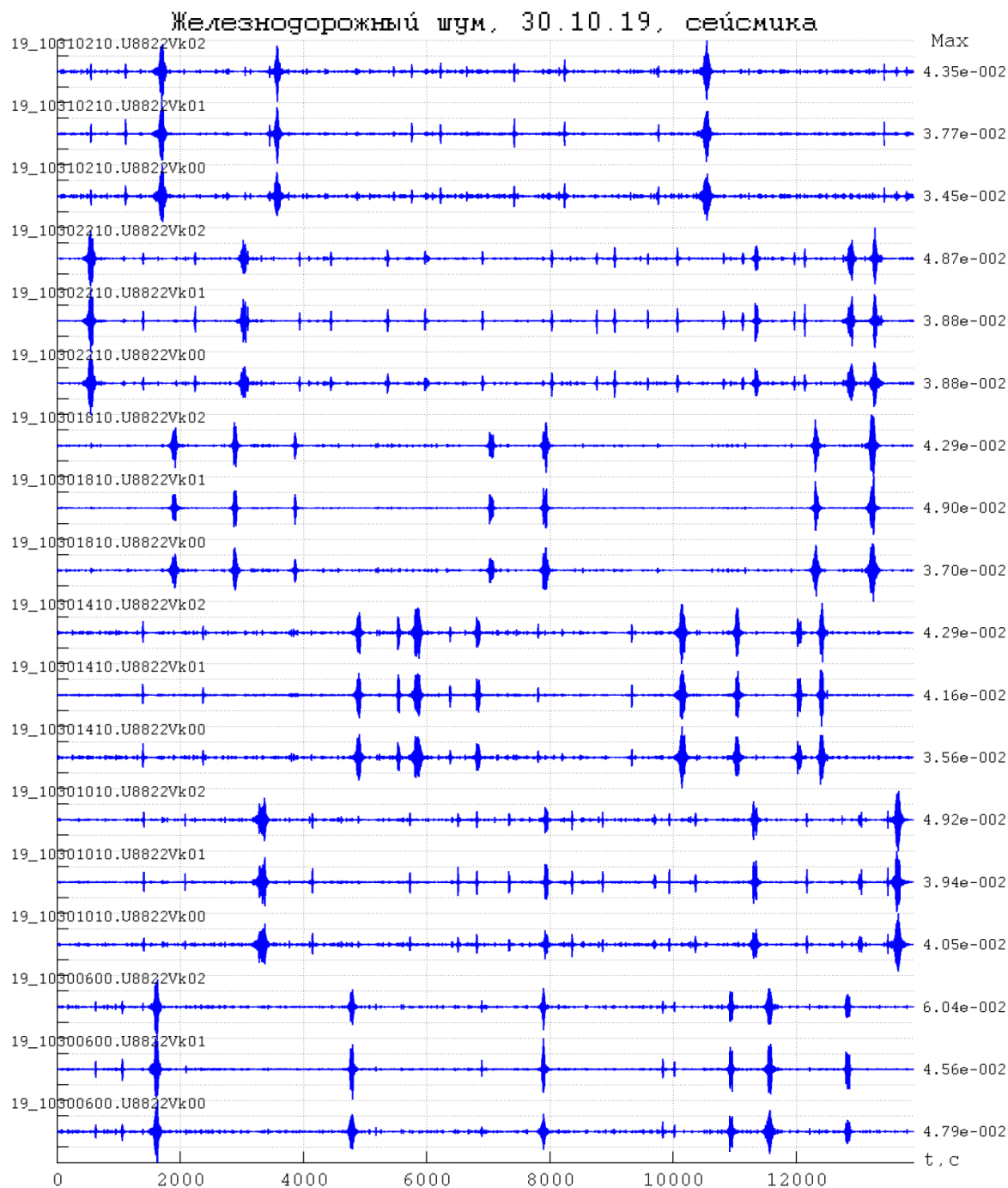


Рис.13. Совместные записи железнодорожных шумов электричек, пассажирских и товарных поездов.

На рис.14 в качестве примера представлены записи сейсмических и акустических шумов электрички. На рис. 15, 16. приводятся соответствующие спектрально-временные функции обоих видов записей. Видно, что при движении электропоезда возникает широкополосный шум в пределах примерно от 5 до 45Гц: Основными частотные моды для электричек располагаются около 10, 33 и 38 Гц, что хорошо видно на графиках спектрального анализа, представленных на рис.16а:

## АНАЛИЗ ШУМОВ ЭЛЕКТРОПОЕЗДОВ (ЭЛЕКТРИЧЕК)

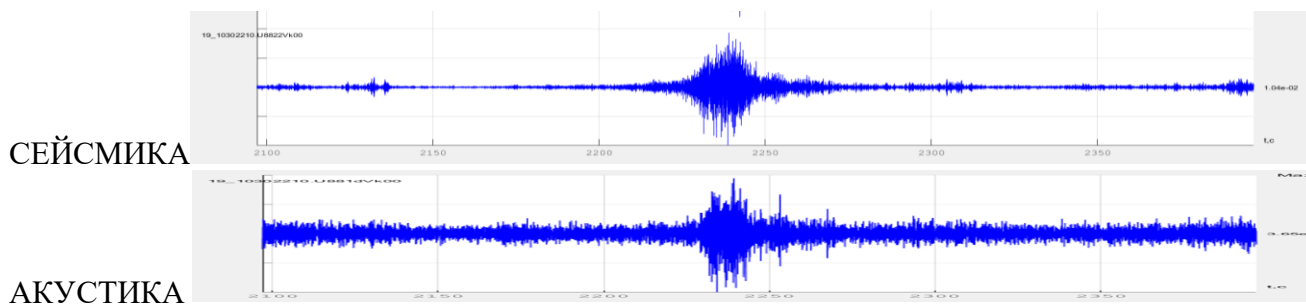


Рис.14. Исходные записи шумов электрички

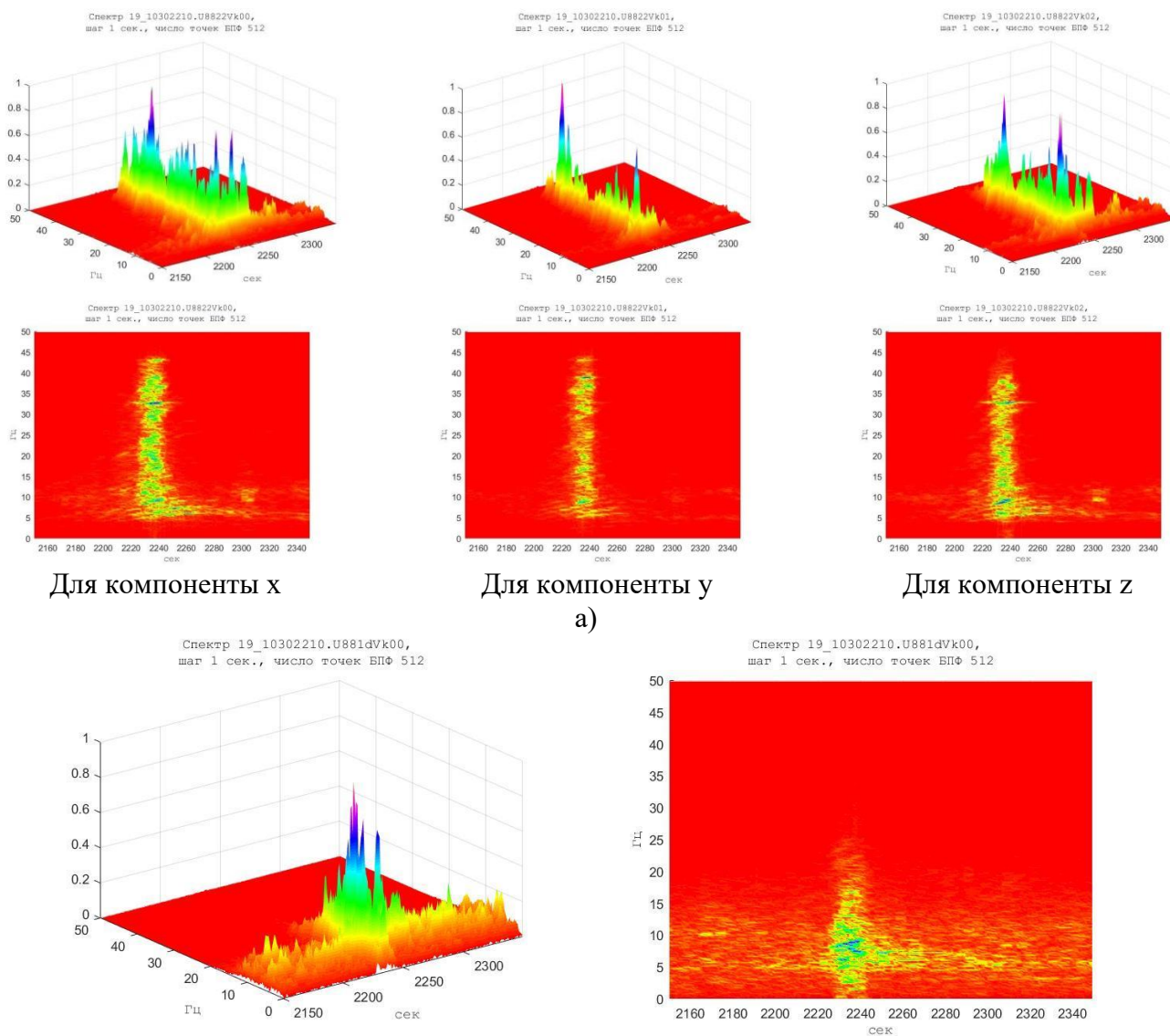


Рис. 15. Спектрально-временные функции (СВФ) и их проекции на плоскость «частота-время» для шумов электрички: а) сейсмических; б) акустических.

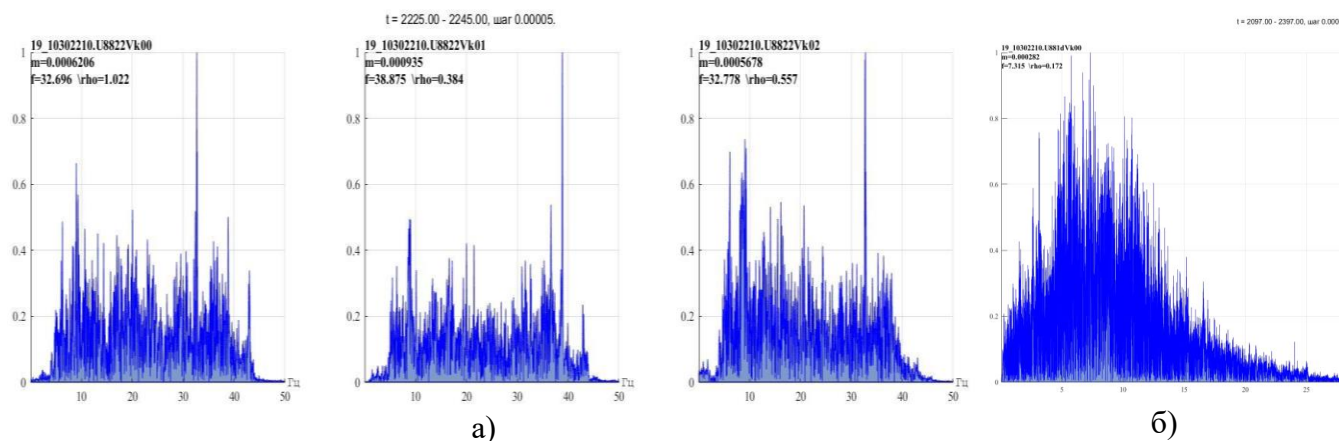


Рис.16. Спектры шумов электрички: а) сейсмические; б) акустические. Основные моды составляют около 9-10, 33Гц

Для акустических шумов наиболее выраженными являются частоты около 5-9 Гц.

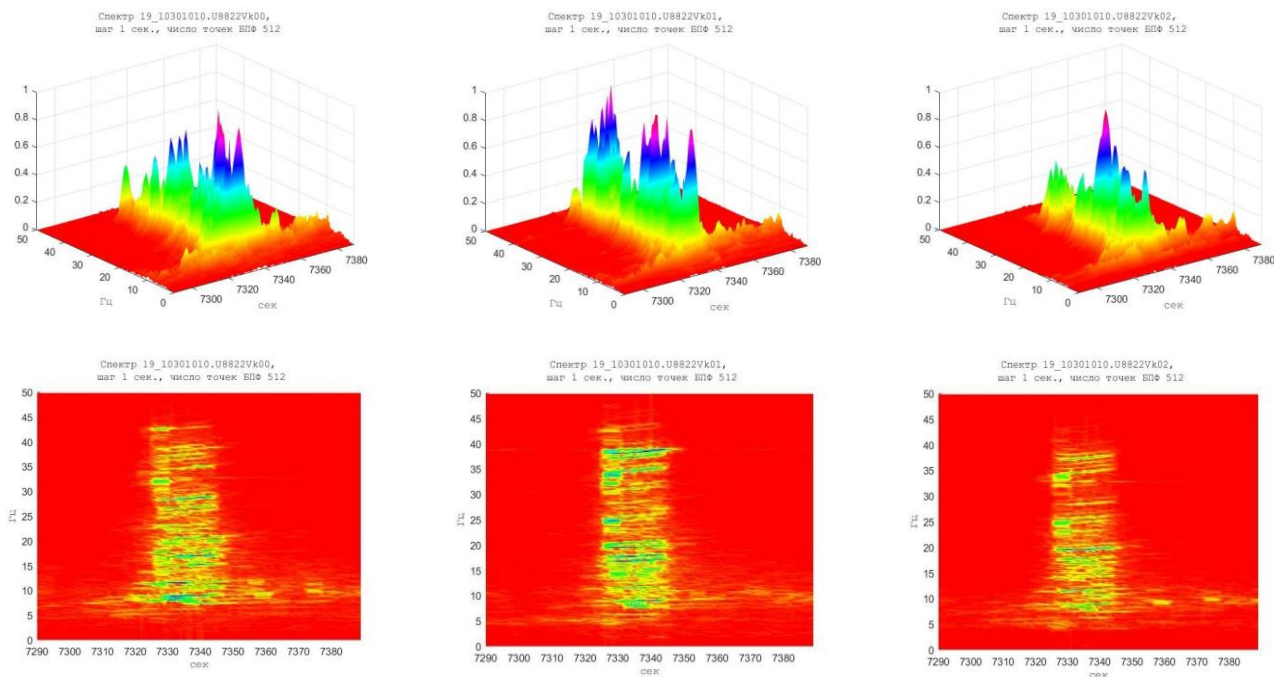
#### АНАЛИЗ ШУМОВ ПАССАЖИРСКИХ ПОЕЗДОВ.

На рисунках 17, 18 приведены графики спектрально–временного анализа для промежутка времени, соответствующего прохождению пассажирского поезда №1. Сводные полученные значения основных частот по всем поездам представлены в таблице 3.

Таблица 3.

№ п/п	Интервал построения спектра от начала файла	Длительность сигнала (с)	Основная частота (Гц)			
			Сеймика			Акустика
			x	y	z	
1	7325-7350 с	25	8,888	8,907	19,521	7,833
2	6373-6393с	20	30,584	13,608	32,783	8,812
2	10810-10840с	30	14,448	14,288	14,285	5,288
4	11330-11375с	45	7,512	6,919	6,919	6,877

Из данной таблицы видно, что для данных, полученных с сейсмических датчиков, наиболее выраженными частотами для пассажирских поездов являются частоты около 7-9, 14, 33 Гц. Для данных, полученных с акустических датчиков также видно, что наиболее выраженными частотами для пассажирских поездов являются частоты около 5-9 Гц.

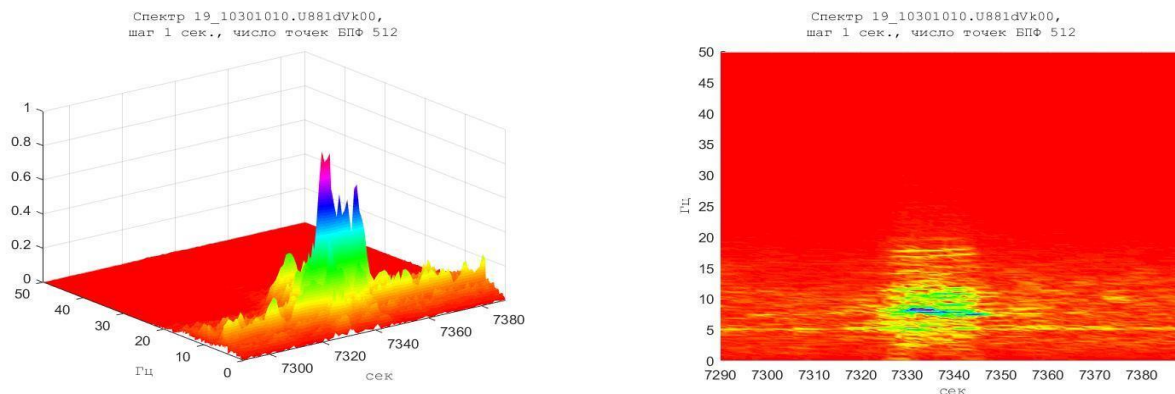


Для компоненты x

Для компоненты y

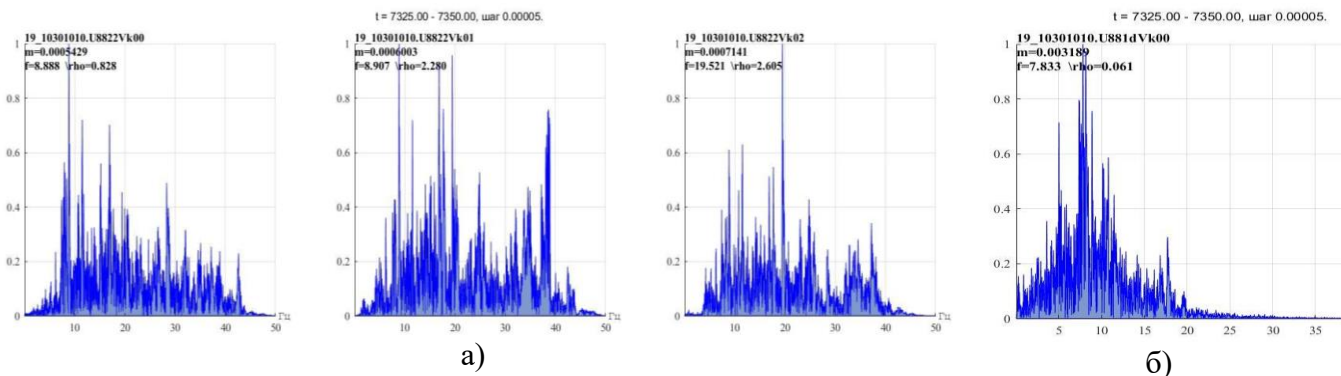
Для компоненты z

а)



б)

Рис. 17. Спектрально-временные функции (СВФ) и их проекции на плоскость «частота-время» для шумов пассажирских поездов а) сейсмических; б) акустических.



а)

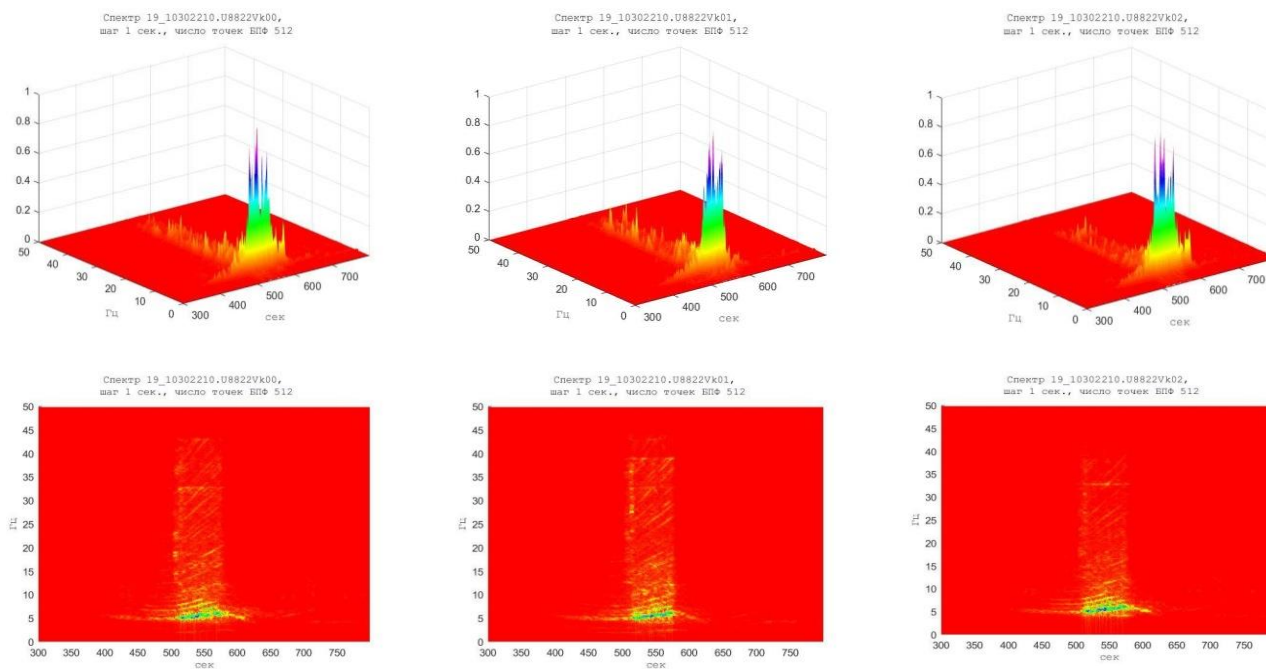
б)

Рис.18. Спектры шумов пассажирского поезда: а) сейсмические; б) акустические. Основные моды составляют около 8-9, 20 Гц

## АНАЛИЗ ШУМОВ ГРУЗОВЫХ ПОЕЗДОВ

На рис. 19 приведены графики спектрально-временного анализа сейсмического и акустического шумов, на рис. 20 – спектрального анализа для промежутка времени, соответствующего прохождению грузового поезда №1.

Анализ полученных графиков показывает, что преобладающие сейсмические и акустические шумы товарных поездов сосредоточены в полосе частот около 4-6 Гц.

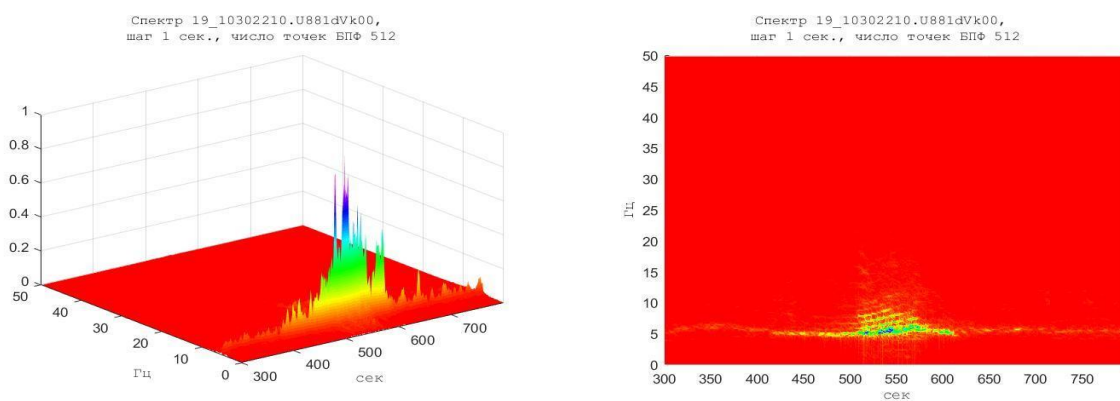


Для компоненты x

Для компоненты y

Для компоненты z

а)



б)

Рис. 19. Спектрально-временные функции (СВФ) и их проекции на плоскость «частота-время» для шумов грузовых поездов: а) сейсмических; б) акустических.

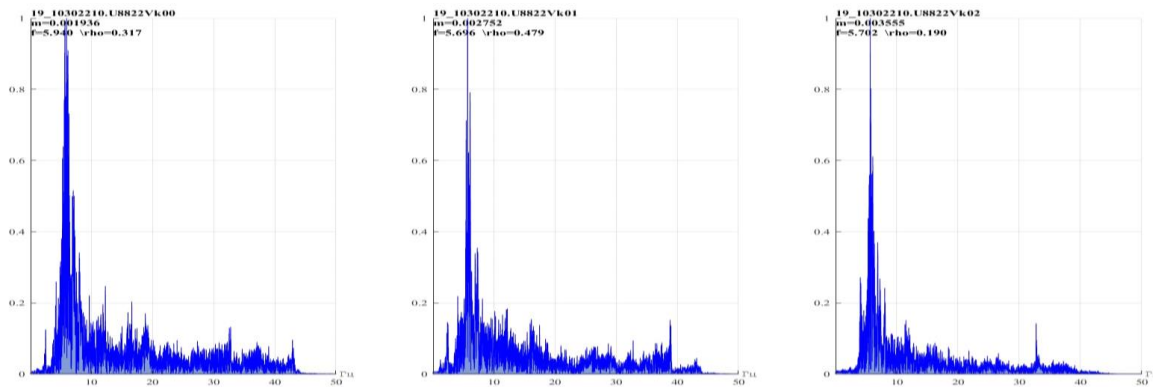


Рис.20. Спектры шумов товарного поезда 5.6-5,9 Гц

### АВИАЦИОННЫЙ ШУМ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ, ВЛИЯНИЕ НА ЧЕЛОВЕКА.

Авиационный шум оказывает существенное влияние на шумовой режим территории в окрестностях аэропортов, который зависит от направления взлётно-посадочных полос и трасс пролётов самолётов, интенсивности полётов в течение суток, сезонов года, от типов самолётов, базирующихся на данном аэродроме, и других факторов. При круглосуточной интенсивной эксплуатации аэропортов уровни звука на жилой территории достигают в дневное время 80 дБА и в ночное время – 78 дБА, максимальные уровни колеблются от 92 до 108 дБА. По уровням создаваемого шума и общей площади зашумлённости территории первое место среди всех источников шума занимает воздушный транспорт. Снижение его интенсивности в некоторых точках достигается за счёт экранирующего эффекта плотных зелёных насаждений. Влияние авиационного шума на человека связано с повышенным слуховым воздействием, с эффектами вибрации дома, домашних предметов, что приводит к повышенной раздражительности людей. Наибольшее беспокойство испытывают люди, страдающие заболеваниями нервной и сердечно-сосудистой систем, желудочно-кишечного тракта и др. Процент жалоб от этой части населения составляет (64-90%).

Акустическое поле самолета формируется как суперпозиция акустических полей отдельных источников излучения. Распространение шума самолета в атмосфере и вблизи поверхности земли сопровождается рядом эффектов, приводящих к изменению интенсивности и спектрального состава излучения в точке на местности. Основными источниками шума самолета на местности являются его движители (воздушные винты), реактивные струи, лопаточные машины (вентилятор, компрессор, турбина) газотурбинного двигателя (ГТД). Лопаточные машины ГТД генерируют излучение с дискретным и непрерывным по частоте спектрами, по шумности доминирует излучение с дискретным спектром на гармониках частоты следования лопаток рабочих колес (частоты 1000-4000 Гц) и на гармониках роторной частоты (сверхзвуковые вентиляторы, область частот 500-2000 Гц). Реактивная струя генерирует непрерывное по частоте излучение с максимальной спектральной плотностью мощности в области низких частот ( $f_{\text{макс}} = Sh \cdot U_0/d$ , где  $Sh=0.2-0.3$  – число Струхала,  $U_0$  – скорость истечения струи,  $d$  – диаметр сопла реактивной струи). Планер самолета является источником широкополосного шума с максимальной спектральной плотностью в области средних частот.

Характеристики шума самолета на местности устанавливаются в результате летных акустических испытаний самолета, либо на основе аналитического моделирования акустического поля самолета в полетных условиях. Во втором случае моделирование производится с помощью экстраполяции результатов стендовых акустических испытаний двигателя на полетные условия самолета, силовая установка которого состоит из данных двигателей.

В соответствии с существующей системой сертификации самолетов по шуму на местности акустические характеристики самолета определяются для режимов *взлета, начального набора высоты и захода на посадку*. Каждый из этих режимов полета характеризуется конфигурацией планера (положение шасси и механизации крыла), высотой и скоростью полета, режимом работы двигательной силовой установки.



Акустические характеристики самолета на местности зависят от параметров режима полета, от положения самолета относительно контрольной точки на местности, от параметров силовой установки самолета (количество и компоновка двигателей на самолете), от параметров, определяющих мощность, направленность и спектр акустического излучения основных источников шума воздушно-реактивного двигателя.

Важнейшими акустическими характеристиками самолета на местности являются:

- Эффективный уровень воспринимаемого шума самолета в точке на местности – EPNL, оцениваемый в единицах EPN дБ;
- Изменение уровня воспринимаемого шума (PNLT), оцениваемого в единицах TPNдБ, во времени в процессе пролета самолета относительно контрольной точки на местности – PNLТ =  $\psi(t)$ ;
- Максимальное значение уровня воспринимаемого шума самолета в контрольной точке на местности – PNLТМ, TPN дБ;
- Спектр уровней звукового давления в третьоктавных полосах частот –  $SPL = \psi_1(f_i)$ , измеряемых в дБ, где  $f_i$  – центральная частота  $i$ -й третьоктавной полосы частот.

Зависимость эффективного уровня шума самолета на местности от режима работы двигательной силовой установки и от характерного расстояния между самолетом и точкой на местности (так называемые NPD зависимости) –  $EPNL = \psi_3(n_B, H_{KT})$ , здесь  $n_B$  – параметр режима работы двигателя, в качестве которого для турбореактивного двигателя (ТРДД) используются приведенные обороты вентилятора,  $H_{KT}$  – высота полета самолета над контрольной точкой на местности.

### ЭФФЕКТИВНЫЙ УРОВЕНЬ ВОСПРИНИМАЕМОГО ШУМА

Эффективный уровень воспринимаемого шума (EPNL) представляет собой основной критерий сертификации самолетов по шуму на местности и является мерой субъективного воздействия авиационного шума на человека. EPNL определяется как мгновенный уровень воспринимаемого шума (PNL) в точке местности с учетом влияния на человека неравномерности спектрального состава шума и продолжительности его воздействия

Величина EPNL определяется расчетом на основе третьоктавных спектров звукового давления в точке местности, которые были измерены или рассчитаны с временным интервалом  $\Delta t$  в течение пролета самолета относительно контрольной точки. Структура алгоритма расчета EPNL была рассмотрена выше.

Статистическая оценка величины “EPNL” как интервальная оценка математического ожидания случайной величины является представительной величиной, которая может служить для определения степени соответствия акустических характеристик самолета действующим нормативным ограничениям на взлетно-посадочных режимах полета. На рис. 21 пример оценки соответствия уровней шума магистральных самолетов нормам стандарта ИКАО в контрольной точке на местности, расположенной сбоку от оси ВПП.

Характер распределения величины EPNL на линии, параллельной оси ВПП, позволяет определить положение контрольной точки на местности сбоку от ВПП, где уровень шума самолета на этапе разбега и начального набора высоты достигает максимального значения.

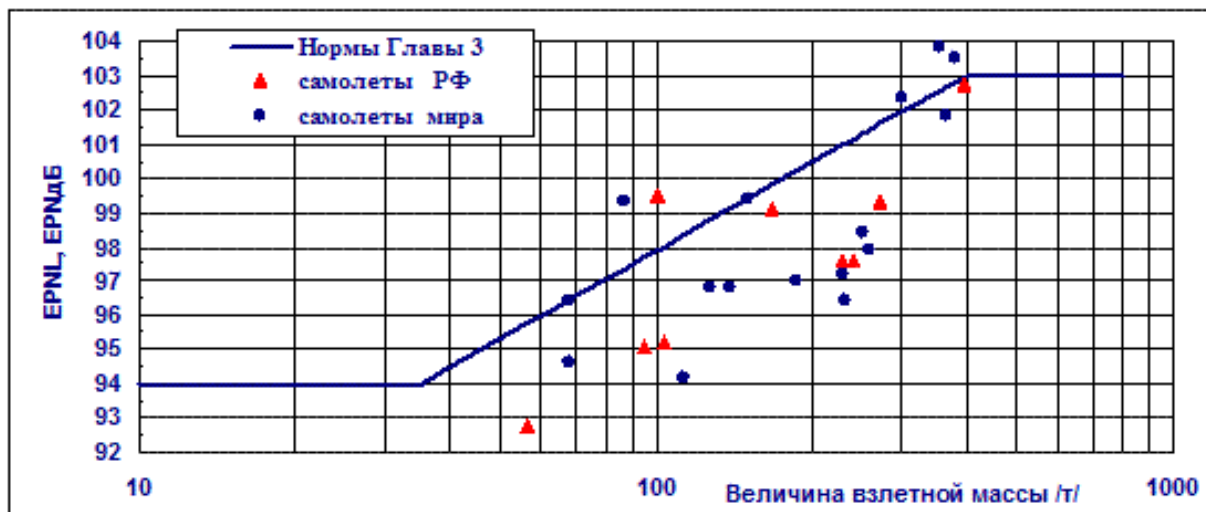


Рис.21

### ИЗМЕНЕНИЕ УРОВНЯ ВОСПРИНИМАЕМОГО ШУМА ВО ВРЕМЕНИ В ПРОЦЕССЕ ПРОЛЕТА САМОЛЕТА ОТНОСИТЕЛЬНО КОНТРОЛЬНОЙ ТОЧКИ НА МЕСТНОСТИ

Важной акустической характеристикой магистрального самолета является график изменения уровня воспринимаемого шума на местности при пролете самолета относительно контрольной точки. Данная характеристика дает представление о пространственном распределении шумности суммарного акустического излучения самолета, позволяет определить направления распространения излучения с наибольшей шумностью и сделать заключение о возможных источниках шума силовой установки, излучение которых является определяющим в формировании максимального уровня воспринимаемого шума (PNLTM) самолета на местности, и о предпочтительном месте размещения системы шумоглушения в силовой установке.

Характеристика представляет собой зависимости вида  $PNLT = \psi(t)$  или  $PNLT = \psi(\varphi)$ , где  $\varphi$  – угол между вектором скорости полета самолета и направлением распространения акустического излучения. На рис. 22 представлены эти зависимости для режима набора высоты самолетов типа Ил-62М.

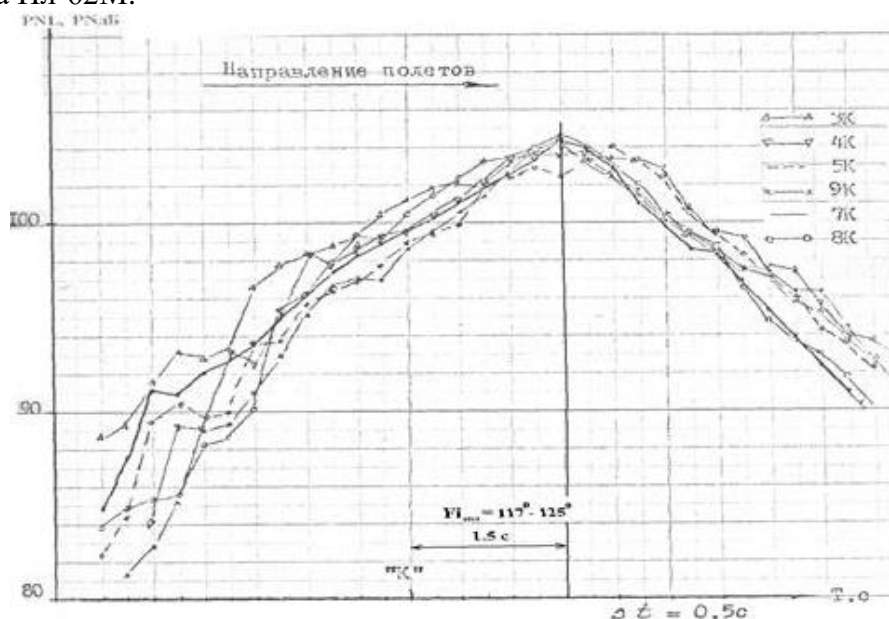


Рис. 22. Распределение во времени уровней воспринимаемого самолета Ил-62М при наборе высоты.

Можно видеть, что при взлете современных магистральных самолетов максимальный уровень шума более 100 дБ на местности отмечается после пролета самолета, то есть для шума на местности при взлете самолета определяющим является излучение двигателей в заднюю полусферу самолета. Максимальный уровень воспринимаемого шума на местности соответствует излучению силовой установки самолета в направлении 120°-130°.

Аналогичная картина имеет место и на режиме захода на посадку (рис. 23), когда самолет движется по глиссаде снижения с углом наклона  $\theta = -3^\circ$ . Здесь отмечаются два характерных максимума шумности на уровне 110 дБ в точке на местности, соответствующие излучению двигателей в переднюю и в заднюю полусферы самолета.

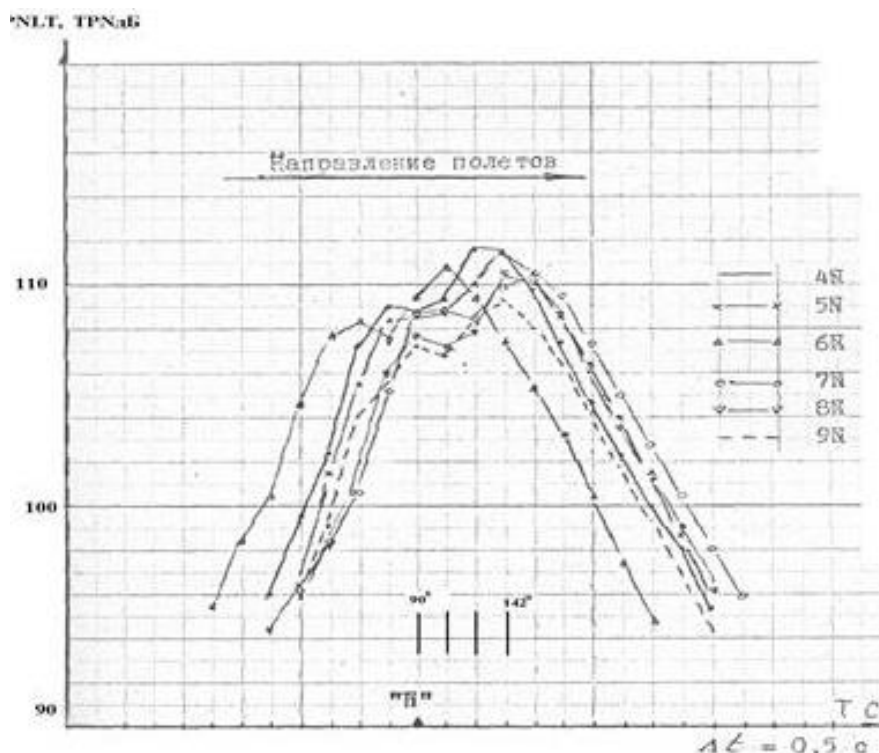


Рис. 23. Распределение по времени уровней воспринимаемого шума самолета Ил-62М при заходах на посадку.

### СПЕКТР УРОВНЕЙ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ В ТРЕТЬОКТАВНЫХ ПОЛОСАХ ЧАСТОТ

Спектр уровней звукового давления в третьоктавных полосах частот магистрального самолета типа Ил-62М, измеренный под траекторией взлета самолета, приведен на рис. 24. Спектры соответствуют излучению с максимальным уровнем воспринимаемого шума (PNLTM) на местности. Как следует из графиков спектр излучаемых шумов носит низкочастотный характер (области частот 125-160 Гц).

Спектр шума достаточно равномерен в широком диапазоне частот и соответствует широкополосному акустическому излучению двигателя. Источником излучения такого типа в задней полусфере самолета являются реактивные струи двигателей силовой установки. Для самолетов с ТРДД спектр излучения PNLTM на режимах работы двигателя 0.8N-N имеет два характерных максимума — в области частот 63-100 Гц и 500-800 Гц (рис.24). В обеих областях частот спектр излучения является широкополосным, что соответствует источникам излучения типа реактивная струя.

При заходе самолета по глиссаде на посадку спектр излучения, соответствующий максимальной величине PNLTM на местности, имеет несколько характерных максимумов — в области низких частот (125-250 Гц) и в области высоких частот (1600 Гц и 3150-4000 Гц).

Высокочастотные максимумы третьоктавного спектра представляют собой комбинацию непрерывного по частоте излучения и отдельных тональных составляющих, которые соответствуют излучению вентилятора двигателя на первой и второй гармониках частоты

следования лопаток рабочего колеса (частоты 1600 Гц и 3150 Гц), и на частоте следования лопаток рабочего колеса турбины (4000 Гц).

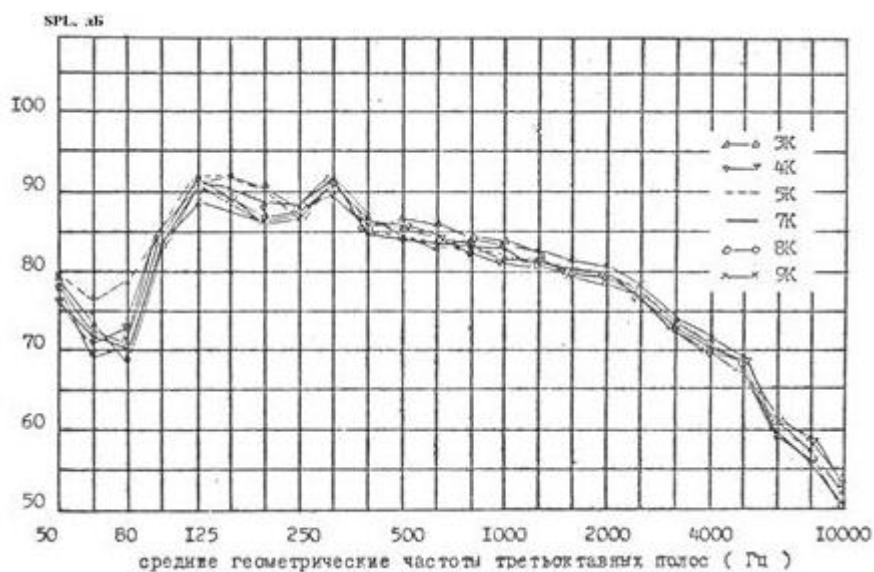


Рис.24.Спектры шума самолета Ил-62М, соответствующие моменту излучения максимального уровня при наборах высоты.

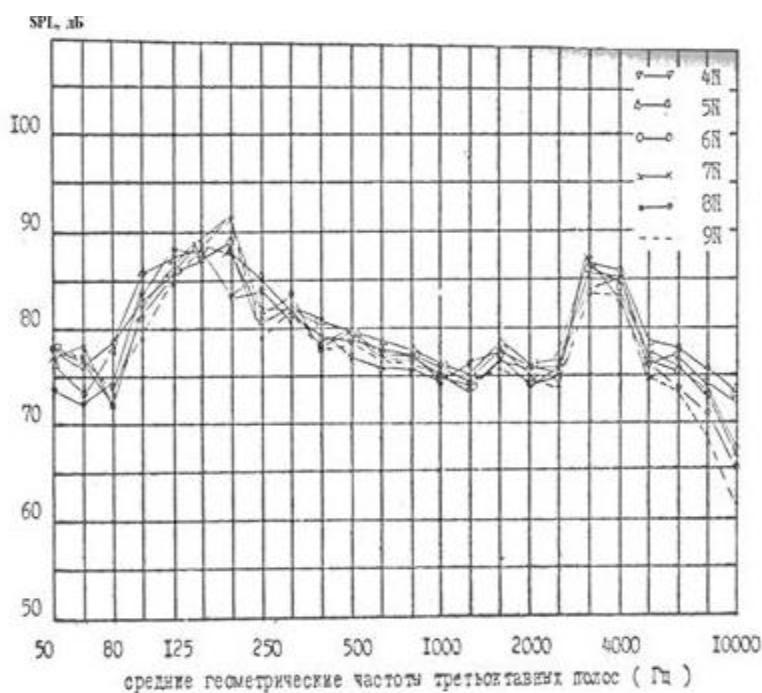


Рис. 25. Спектры шума самолета Ил-62М, соответствующие моменту излучения максимального уровня при заходе на посадку.

Таким образом спектр уровней звукового давления в третьоктавных полосах частот, соответствующий максимальному уровню воспринимаемого шума на местности, позволяет определить источники наиболее интенсивного акустического излучения силовой установки самолета для направления излучения наибольшей шумности. Для современных магистральных самолетов с системами шумоглушения в силовой установке на режимах взлета и набора высоты наиболее интенсивным источником акустического излучения является реактивная струя, имеющая непрерывный по частоте спектр излучения. На режиме захода на посадку спектр излучения силовой установки является комбинированным, а наиболее интенсивными источниками излучения являются реактивная струя (излучение с непрерывным по частоте спектром) и лопаточные машины двигателя (излучение отдельных тонов на частотах следования лопаток рабочих колес и их гармониках).

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТЕОЗАВИСИМОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ИНФРАЗВУКА

Проведены численные расчеты по оцениванию эффектов направленности акустического волнового поля инфранизкочастотных источников, возникающих на фоне ветра, характеризуемого азимутальным направлением и скоростью. В качестве модели рассматривается точечный источник инфразвука, расположенный на высоте  $h$  над поверхностью Земли. При этом поверхность Земли считается плоской, а атмосфера слоисто неоднородной. Скорость звука и ветра зависят лишь от вертикальной координаты, при этом скорость ветра имеет лишь горизонтальные составляющие. На инфранизких частотах справедливо лучевое приближение распространения звука, поскольку здесь эффекты рассеяния и затухания акустических волн малы. С учетом этого изменение интенсивности волн подчиняется предположению о геометрической расходимости лучей. В прямоугольной системе координат ось  $z$  направлена вверх от поверхности Земли, а направление оси  $x$  на высоте  $h$  совпадает с направлением ветра. Начальное направление луча характеризуется сферическими углами  $\theta$  (зенитный угол) и  $\varphi$  (азимут). Последний отсчитывается по отношению к направлению  $x$ . Эффект направленности акустического поля характеризуется *фактором фокусировки*, равным отношению интенсивности инфразвука в неоднородной движущейся среде к интенсивности его в безграничной неподвижной среде:

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

На рис. 26 приведены расчетные зависимости  $f$  от азимута  $\varphi$  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. По аналогии с направленным излучением колебаний количественно фактор фокусировки может быть охарактеризован шириной раскрытия  $\Delta\varphi$  в градусах на уровне 0.7 от максимального значения разницы между наибольшим  $f_{\max}$  и наименьшим  $f_{\min}$  значениями фактора фокусировки:  $\Delta\varphi \leftrightarrow 0.7 (f_{\max} - f_{\min})$ . В частности, скорости ветра  $w_0 = 6$  м/с соответствует  $\Delta\varphi = 150$  град.

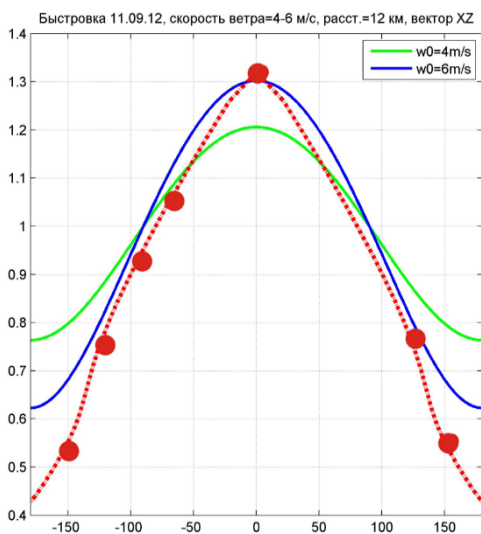


Рис. 26. Зависимость фактора фокусировки  $f$  от горизонтального расстояния от источника  $r$  и азимута  $\alpha$  точки наблюдения: Расчетные графики для радиуса круговой расстановки датчиков с радиусом 12 км и скоростей ветра 6 м/с (кривая синего цвета) и 4 м/с (кривая зеленого цвета). Высота источника над землей – 5 м. Красный точечный график – экспериментально полученный для той же расстановки, скорость ветра 4–6 м/с.

Для сравнения на рисунке 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. Методика измерений описана ниже. Как видно из сравнения расчетного и экспериментального графиков значения раскрытия  $\Delta\varphi$  в обоих случаях приблизительно совпадают и характеризуют.

По данным измерений акустического давления на удаленных датчиках с круговой расстановкой и значения его в контрольной точке, расположенной на удалении 0.457 км от

эпицентра взрывов, оценены значения ослабления акустического давления по расстоянию и направлению.

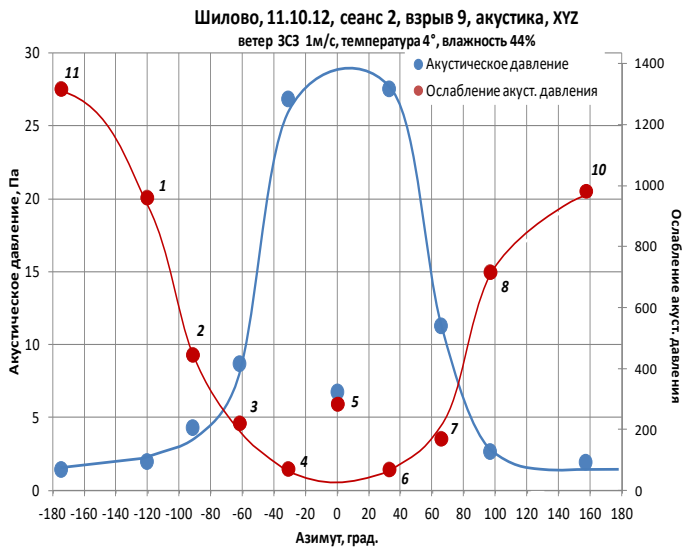


Рис. 27. График голубого цвета — зависимость акустического давления от азимута для полигонного взрыва мощностью 125 кг, силе ветра 1 м/с. и расстановки датчиков по кругу с радиусом 10 км. График красного цвета — ослабление уровня акустического давления по отношению к его уровню в контрольной точке (0,457 км от места взрыва). Значения коэффициентов ослабления приведены справа.

Соответствующий график в виде сплошной красной линии представлен на рис.27. Значения коэффициентов ослабления

представлены на оси ординат справа. Как следует из рисунка, минимальные значения коэффициента соответствует направлению ветра и лежит в пределах 70-72. Максимальное значение коэффициента ослабления для данных условий проведения эксперимента — составляет около 1300. Таким образом, на удалении от очага взрыва в 10 км акустическое давление воздушной волны падает более, чем на три порядка, при этом соотношение между максимальными и минимальным коэффициентами ослабления акустического давления, определяемое вкладом ветра, составляет около 20.

## ОЦЕНИВАНИЕ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИХ РИСКОВ ОТ ВЗРЫВОВ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Геоэкологические риски оцениваются *удельной плотностью энергии*:

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

Где  $\rho c$  — удельное акустическое сопротивление воздуха, равное 42 г/(см<sup>2</sup>·с);  $p(t)$  — акустическое давление, регистрируемое на выходе акустического датчика;  $T$  — длительность акустического колебания. Для человека безопасной является величина удельной плотности энергии до 3 Дж/м<sup>2</sup>

Допустимые акустические воздействия на объекты социальной инфраструктуры определяются табулированными значениями удельной плотности энергии в единицах Дж/м<sup>2</sup>. В частности, для человека критическое значение составляет 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, а также в контрольной точке вблизи взрыва (на удалении от эпицентра 0.5 км). В качестве примера на рис.28 приводятся соотношения значений удельной энергии (1) от взрывов с критическими для разных объектов.

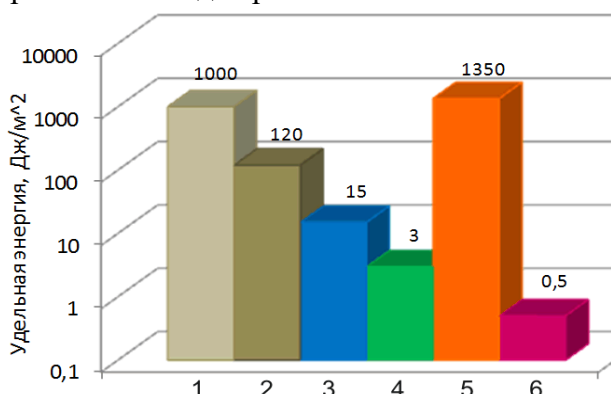


Рис.28. Критические значения удельной энергии для строений: 1 — жилое здание при однократном взрыве; 2 — жилое здание при многократных взрывах; 3 — оконное стекло толщиной 2-3 мм; 4 — для человека. Значения удельной энергии от взрыва: 5 — на удалении от взрыва 0.5 км; 6 — на удалении 10 км.

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 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.

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ РАСТИТЕЛЬНЫМ МАССИВОМ НА НИЗКИХ ЧАСТОТАХ.

Из вышесказанного следует, что вопросы экологической изоляции инфразвука приобретают большую актуальность. С учетом этого авторами выполнено численное моделирование на супер-ЭВМ процессов поглощения акустических колебаний низких и инфранизких частот (5-100 Гц) с помощью лесополос с последующей выработкой рекомендаций по шумопонижению.

В основу численного моделирования и экспериментальных исследований авторами положен оригинальный вибросейсмический метод зондирования пограничных сред «атмосфера-лесной массив-земля» с помощью мощных вибраторов, обеспечивающих экологическую чистоту и высокую повторяемость результатов исследований.

Разработаны и реализованы алгоритм и программа, а также проанализированы результаты расчетов уровней акустического давления и других характеристик в разных средах с применением уравнений газовой динамики Эйлера для растительного массива. Разработана и построена базовая модель взаимодействия массивов растительности при распространении гармонических акустических колебаний от инфранизкочастотного источника. Оценено степень влияния коэффициента поглощения на скорость затухания акустических колебаний в рамках используемой модели.

Для решения поставленной задачи рассматривается 3-слойная модель, состоящая из воздуха, лесного массива и упругого грунта (Рис. 29). Акустическая волна падает на лесной массив под заданным углом  $\theta$  ( $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ ) к вертикали. В данной модели верхний воздушный слой имеет скорость звука  $c$  и плотность  $\rho$ . Растительный массив создает эффект поглощения и характеризуется коэффициентом поглощения  $\alpha$ . Коэффициент  $\alpha$  зависит от коэффициента аэродинамического сопротивления  $s_d$  и удельной плотности  $S$  поверхности листьев и ветвей. Грунт – нижний слой – имеет плотность  $\rho_g$ , скорости продольных и поперечных волн  $V_p$  и  $V_s$ . Исследуется вопрос о том, насколько уменьшается амплитуда акустической волны в зависимости от свойств растительного массива, т.е. насколько массив поглощает акустические колебания. При этом принимается условие об удаленности источника от массива на расстоянии много большем длины акустической волны, поэтому волновой фронт ее принимается локально-плоским и анализ проводится в рамках 2D моделирования.

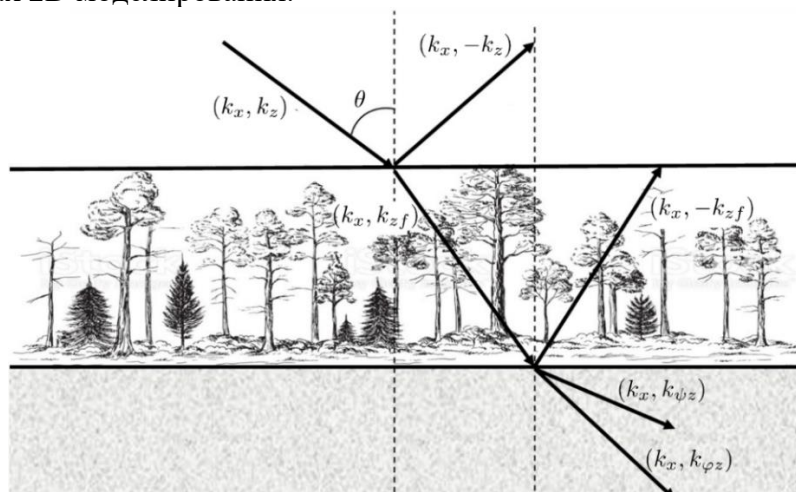


Рис. 29. Трехслойная модель «атмосфера-лесной массив-грунт» со схемой падающих и отраженных волн в слоях.

Для воздуха рассматриваются волновые уравнения с постоянной плотностью и скоростью звука. Их решение можно представить в виде гармонических волн. Тогда результирующее давление в воздухе будет представлено как сумма давлений падающей и отраженной волн:

$$P = P_0 e^{i\omega t - ik_x x - ik_z z} + P_1 e^{i\omega t - ik_x x - ik_z z}$$

Здесь  $k_x, k_z$  – проекции волновых векторов по осям  $x$  и  $z$ .

Разработаны и реализованы программы расчета уровней акустического давления колебаний волн с учетом выбранной математической модели. Проведены тестовые расчеты для отладки разработанных программ. Вычислены значения акустического давления для преломленной и отраженной волн в случае прохождения гармонической акустической волны сквозь лесной массив в грунт с учетом коэффициента поглощения. Отмечено, что наблюдается эффект поглощения энергии акустической волны. В качестве примера на рис.30 изображены графики акустического давления для преломленной и отраженной волн соответственно в зависимости от угла падения  $\theta$  в случае прохождения акустической волны через лес при различных высотах 0, 5, 10, 50 метров, частота  $f=10$  Гц.

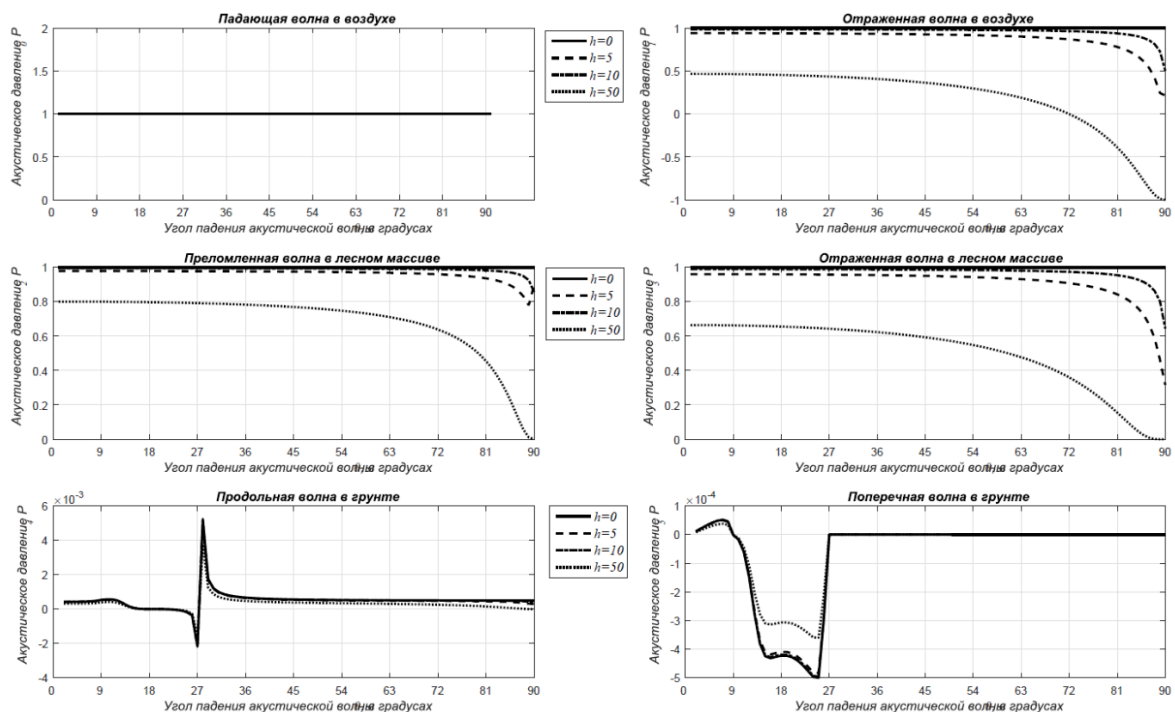


Рис.30. Графики зависимости акустического давления для преломленной и отраженной волн от угла падения  $\theta$  в случае прохождения акустической волны через лес при различных высотах  $H=0, 5, 10, 50$  метров, частота  $f=10$  Гц.

На рисунке виден отмеченный выше эффект поглощения. При высоте 50 м и  $\theta=90^\circ$  амплитуда акустического давления может уменьшаться более чем на порядок.

На рис.31 изображены графики акустического давления для преломленной и отраженной волн соответственно в зависимости от угла падения  $\theta$  при частотах  $f=8, 15, 80$  Гц. Как видно из рисунка, при увеличении частоты на порядок скорость затухания акустического давления выше почти в 10 раз.

Для изучения структуры волнового акустического поля применялось численное моделирование распространения акустической волны от точечного источника, находящегося вне лесного массива конечной протяженности вблизи границы с грунтом. Моделирование связано с решением системы уравнений газовой динамики в двухмерном случае при наличии неоднородной составляющей, характеризующей наличие лесного массива. Область моделирования представляет собой прямоугольник в двухмерной системе координат  $Oxz$ . (рис.32). Системы уравнений решались при соответствующих нулевых граничных и начальных условиях. Для исключения нежелательных отраженных волн от боковых и верхней границ



расчетной области применялась методология реализации PML (Perfectly Matched Layers) [9, 10]. Таким образом, на трех границах выделялись подобласти небольшого размера, где реализовывались формулы расчетов для PML. Для генерации сигнала и моделирования распространения акустических волн рассматривался точечный источник. Источник мог располагаться в любой точке внутри области моделирования, исключая зоны PML.

*Результаты численного моделирования.* Для проведения теоретических экспериментов по моделированию распространения акустических волн от точечного источника в неоднородных средах разработана вычислительная программа. Программа реализует предложенную конечно-разностную схему. При этом в многоядерных процессорах применяется технология распараллеливания с применением OpenMP (Open Multi-Processing). Для исследования взаимодействия акустической волны с лесным массивом было проведено численное моделирование на основе разработанной программы для неоднородной модели «воздух-лес».

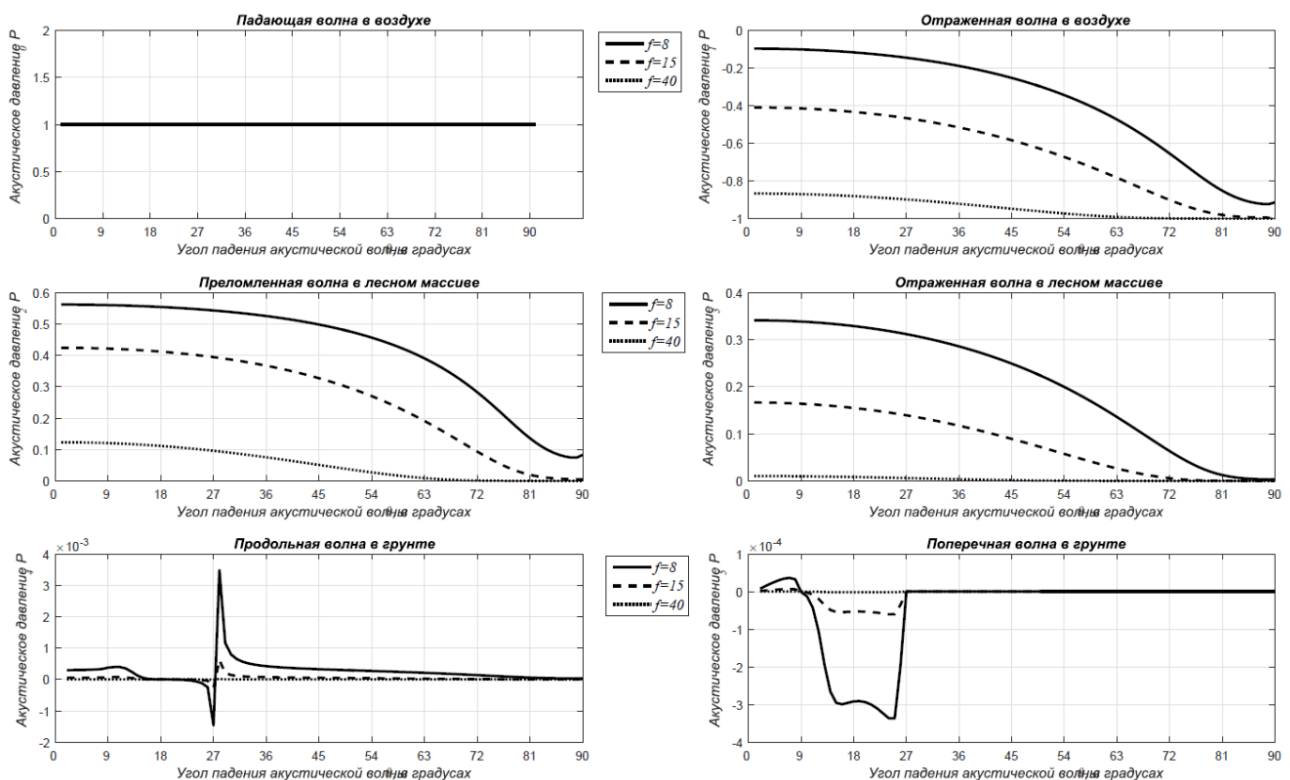


Рис.31. Графики зависимости акустического давления для преломленной и отраженной волн от угла падения  $\theta$  при частотах  $f=8, 15, 80$ .

Была выбрана двухмерная область моделирования с линейными размерами  $2.04 \text{ км} \times 2.04 \text{ км}$  (рис.32.) Неоднородная среда была представлена двумя объектами: 1 – вмещающая воздушная среда (атмосфера), 2 – лес. Значения параметров для атмосферы были выбраны  $c=340 \text{ м/с}$ ,  $\rho=1.2 \text{ г/м}^3$ . Сеточная модель для расчетов составила  $1200 \times 1200$  узлов. Точечный источник акустических волн среде с частотой 5Гц располагался в воздушной среде с координатами 0.25 км по оси  $Ox$  и 1.95 км по оси  $Oz$ . В качестве леса была создана подобласть во вмещающей среде протяженностью от 0.5 км до 1.5 км по оси  $Ox$  и высотой 0.05 км по оси  $Oz$ .

В результате работы созданной программы получен набор снимков волнового поля, снятые во времена расчета  $t = 0.5, 1.5, 4.0, 5.0$  (Рис. 33). На снимках показаны различные типы акустических волн: 1 – прямые, 2 – отраженные от нижней жесткой границы волны (Рис. 33 а, б), 3 – преломленные волны, обусловленные наличием лесного массива (Рис.33б). Результаты были получены с использованием пакета Matlab. На представленных снимках можно проследить эволюцию изменений в поле давления. В частности, хорошо видно формирование отраженной волны после выхода акустической волны на переднюю границу лесного массива (Рис.33б).

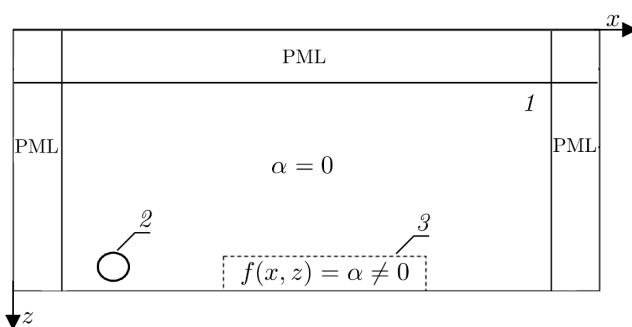


Рис. 32. Схематическое изображение двумерной области моделирования: 1 — атмосфера, 2 — источник, 3 — лес

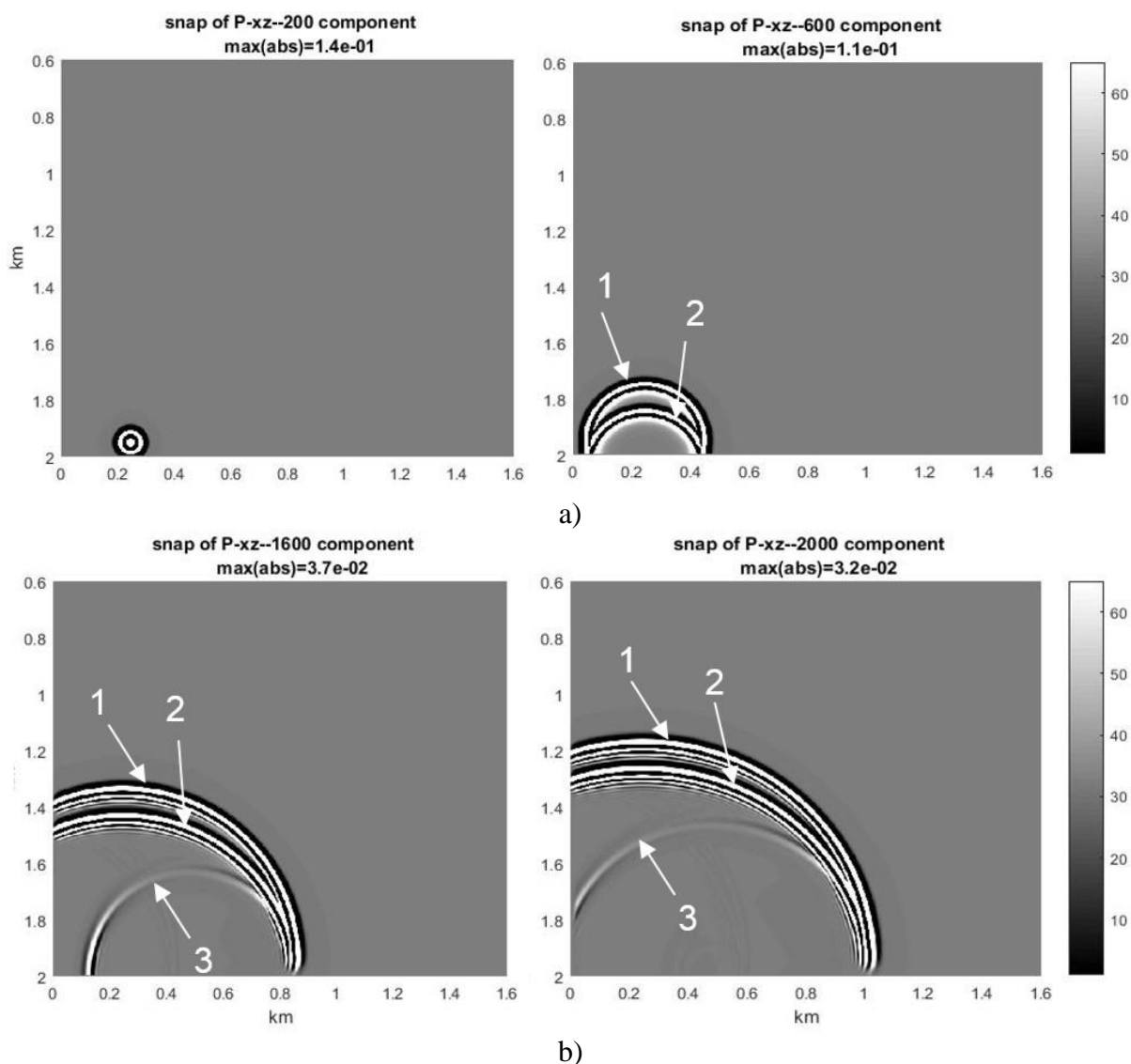


Рис. 33. Снимки волнового поля для акустического давления в различные моменты времени для случая, когда лесной массив присутствует.

### МНОГОФАКТОРНАЯ ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ ШУМОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Один из критериев шумовых воздействий определяется величиной геоэкологических рисков (1). Здесь определяющим параметром является энергетическая характеристика акустического воздействия, связанного с внешним акустическим давлением на данной частоте. Последнее является интегральным параметром, зависящим от ряда факторов. Многофакторная модель интегрального давления может быть описана уравнением энергетического баланса:

$$P_{\Sigma}(t, f, r) = P_V(f) + P_1(r) + P_2(e, \tau, \omega, \varphi) + P_3(1/r) \quad (2)$$

Здесь

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

$P_V(f)$  – частотно зависимое акустическое давление, развиваемое источником;

$P_1(r)$  – поглощение инфразвука по расстоянию, определяемое неоднородностью атмосферы и состоянием дневной поверхности Земли;

$P_2(e, \tau, \omega, \varphi)$  – давление в пункте регистрации как функция метеопараметров: относительной влажности, температуры, скорости и направления ветра, угла  $\varphi$  между направлением ветра и волновым фронтом от источника;

$P_3(1/r)$  – давление как результат сферической расходимости волнового фронта.

Получение оценок (2) в аналитическом виде наталкивается на сложности из-за отсутствия полноты априорных сведений о метеоусловиях вдоль протяженной трассы распространения акустических колебаний. Сюда же относятся факторы, связанные с особенностями поглощения энергии акустических колебаний, обусловленного наличием лесных массивов, снежного покрова, геологических неровностей (холмы, горы) дневной поверхности Земли и др., которые встречаются вдоль трассы распространения акустических колебаний. Один из путей преодоления априорной неопределенности связан с получением оценок (2) на основе экспериментов с применением сейсмоакустических источников транспортного шума и вибраторов в качестве излучателей инфранизкочастотных акустических колебаний. Экспериментальная часть работ основывается на такой методике.

### 3.6. Сопоставление результатов, полученных при реализации, с мировым уровнем

Решение проблемы оценивания негативного воздействия техногенных шумов на социальную инфраструктуру города связано со многими факторами – это, прежде всего, вибрации движущегося транспорта. Вибрации порождают в земле сейсмические колебания, создающие на околорезонансных частотах угрозу для целостности зданий и сооружений, вызывая их повышенный износ. Негативное воздействие акустических шумов может многократно усиливаться под воздействием метеофакторов таких как направление и скорость ветра, температура и влажность воздуха, состояние турбулентности атмосферы. Особенно роль негативного воздействия транспортных и производственных шумов проявляется на инфранизких частотах, совпадающих с электрической активностью головного мозга и ритмами внутренних органов человека. С другой стороны, существуют природные факторы, приводящие к ослаблению шумового воздействия при распространении акустических шумов сквозь лесные посадки, над пересеченной поверхностью местности, растительным покровом и др. Таким образом, проблема шумового воздействия на окружающую среду носит многофакторный характер.

Теоретические вопросы совместного распространении сейсмических и акустических колебаний от вибрационных источников с учетом влияния ветра на распространение инфразвука рассмотрены в работах:

*Mikhailenko B.G., Mikhailov A.A. Numerical Modeling of Seismic And Acoustic-Gravity Waves Propagation In An "Earth-Atmosphere" Model In The Presence Of Wind In The Air // Numerical Analysis and Applications. 2014. T. 7. № 2. С. 124-135., Mikhailenko B.G., Mikhailov A.A. Numerical Modeling of Seismic And Acoustic-Gravity Waves Propagation In An "Earth-Atmosphere" Model In The Presence Of Wind In The Air // Numerical Analysis and Applications. 2014. T. 7. № 2. С. 124-135., Aleksandr A. Mikhailov, Valery N. Martynov Numerical modeling of the infrasonic and seismic waves propagation in the "Earth-Atmosphere" model with a curvilinear interface // AIP Conference Proceedings 1907, 030036 (2017).* Теоретические результаты подкреплены результатами экспериментальных исследований с применением вибраторов и взрывов: *Хайретдинов М.С., Губарев В.В., В.В. Ковалевский, Авроров С.А., Воскобойникова Г.М., Седухина Г.Ф., Якименко А.А. Экологоохранное прогнозирование по комплексу сопряженных геофизических полей.*

*Автометрия, 2014., 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. Учет ландшафта местности как одного из факторов, влияющих на распространение акустических шумов, рассмотрено в работах Харченко С.В. Влияние рельефа городской территории на формирование акустической обстановки: эксперимент и моделирование // Вестник ВГУ, Серия: География. Геоэкология, 2016, № 3., Using natural means to reduce surface transport noise during propagation outdoors / T. Van Renterghem [et al.] // Applied Acoustics. – 2015. – №92. – P. 86-101., Сенющенкова И. М. Акустические особенности распространения шума в пониженных формах рельефа местности // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2010. – № 5. – С. 91-99. Влияние лесных массивов и насаждений рассмотрено в работах: Орлов С.А. Математическое моделирование процессов аэродинамики в лесных массивах и насаждениях // автореферат диссертации. ТГУ. 2012. 26 С.*

*Ситник В.В. Моделирование влияния массива растительности на распространение акустических возмущений // Математическое моделирование, 2007. т. 19, №8, С. 90-96. Pierre Chobeau Modeling of Sound Propagation in Forests Using the Transmission Line Matrix Method. Study of multiple scattering and ground effects related to forests // Université du Maine, Le Mans, France, – 2014. – 147 P., "The sound amplifying forest with emphasis on sounds from wind turbines" Elis Johansson // Department of Civil and Environmental Engineering. Division of Applied Acoustics. Chalmers University of Technology. Sweden. – 2010. – 97 P.*

Отличительные особенности подхода, предложенного и развиваемого авторами к решению проблем распространения сейсмических и акустических шумовых колебаний, оценивания геоэкологических рисков от транспортных и производственных вибрационных колебаний и техногенных взрывов, состоит в выборе и реализации вибрационного метода зондирования пограничных сред «земля-атмосфера». Такой метод позволяет реализовать физическое и теоретическое моделирование решения проблем шумоопасности с повышенной точностью и повторяемостью благодаря высокоточным исходным амплитудно-фазо-частотным характеристикам излучателей- вибраторов. При этом достигаются возможности более высокоточного оценивания шумоопасности и шумозащищенности для социальной инфраструктуры (зданий, производственных помещений) и человека на низких и инфранизких частотах, приближающихся к наиболее опасным резонансным частотам тех или иных объектов.

### **3.7. Методы и подходы, использованные при реализации Проекта (описать, уделив особое внимание степени оригинальности и новизны)**

Выполнение работ по проекту характеризуется проведением масштабных полевых экспериментов, обработкой полученных данных и выполнением численного моделирования на супер-ЭВМ.

Новизна и специфика теоретических и экспериментальных исследований по проекту заключается в разработке комплексного теоретико-экспериментального подхода к решению проблемы анализа производственных и транспортных шумов тяжелых видов техники с ориентацией на низкий и инфранизкий диапазоны частот, которые являются наиболее экологически опасными для человека. В этом диапазоне частот лежат инфразвуковые колебания, происходящие в живом организме. Например, сокращения сердца лежат в инфразвуковом диапазоне 1-2 Гц, дельта ритм мозга (состояние сна) 0,5-3,5 Гц, альфа-ритм мозга (состояние покоя) 8-13 Гц, бета-ритм мозга (умственная работа) 14-35 Гц. При совпадении колебаний инфразвука по частоте с колебаниями в организме человека последние усиливаются, что может привести к расстройству работы органа, его травме. В связи с этим в качестве одной из задач проекта явилось выделение из общего широкополосного спектра транспортных шумов характерных низкочастотных составляющих, являющихся наиболее экологически угрожающими для человека. Соответствующий анализ был выполнен с применением метода спектрально-временных функций

и программного комплекса «Астра». В результате обработки полевых записей сейсмических и акустических шумов, порождаемых различными видами тяжелой техники: автомобильной, железнодорожной, авиационной, получены частотно-временные спектры, характеризующие основные амплитудно-частотные области сосредоточения шумов и их динамику во времени и пространстве. Полученные результаты характеризуются новизной знаний о локализации наиболее опасных частотных областей шумов отдельных видов транспортов.

Для оценивания эффектов шумопонижения выполнено численное моделирование на супер-ЭВМ процессов поглощения акустических колебаний низких и инфранизких частот (5-100 Гц) с помощью лесополос с последующей выработкой рекомендаций по шумопонижению. В основу численного моделирования и экспериментальных исследований авторами положен оригинальный вибросейсмический метод зондирования пограничных сред «атмосфера–лесной массив–земля» с помощью мощных вибраторов, обеспечивающих экологическую чистоту и высокую повторяемость результатов исследований. С целью оценивания геоэкологических рисков для окружающей среды от взрывов утилизируемых запасов боеприпасов выполнен анализ сейсмоакустических данных, полученных от взрывов на полигоне Шилово вблизи Новосибирска.

### **3.9. Участие в научных мероприятиях по тематике Проекта за период, на который был предоставлен грант (каждое мероприятие с новой строки, указать название мероприятия и тип доклада)**

1. XV Международная выставка и научный конгресс «Интерэкспо ГЕО-Сибирь 2017». 25–27 апреля 2018 г. Новосибирск (секционный доклад)
2. Международная научно-практическая конференция «Информационные инновационные технологии» ("Information Innovative Technologies", I2T-2018. 23 по 27 апреля 2018г. в г. Прага, Чешская республика. (секционный доклад)
3. Четырнадцатая международная научно-техническая конференция "Актуальные проблемы электронного приборостроения" АПЭП-2018 2-6 октября 2018 г., г. Новосибирск. (Секционный доклад)
4. 10-th Jubilee Conference of the Euro-American Consortium for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences, Albena, Bulgaria, June 20-25, 2018 (секционный доклад)
5. 12-я Международная конференция Интеллектуализация обработки информации» (Intelligent Data Processing: Theory and Applications, IDP-2018). 8–13 октября 2018 года в г. Гаэта, Италия. (секционный доклад)
6. Марчуковские научные чтения. 8 - 12 октября 2018, Академгородок, Новосибирск, Россия (секционный доклад)
7. IX Всероссийская конференция с международным участием, посвященной памяти А. Ф. Сидорова. 03-08 сентября 2018 (секционный доклад)
8. XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference, SGEM 2019, 28 June - 7 July, 2019, Albena, Bulgaria - 2 (Хайретдинов М.С., Караваев Д.А., Якименко А.А.)
9. 15th International Asian School-Seminar «Optimization Problems of Complex Systems» (OPCS-2019), 26 - 30 Aug, 2019, Novosibirsk, Akademgorodok - 2 (Хайретдинов М.С., Якименко А.А.)
10. XVI Международная конференция "Инновационные, Информационные и Коммуникационные технологии", ИНФО-2019, 1-10 октября 2019, Россия, г.Сочи - 1 пленарный (Хайретдинов М.С.)
11. XV научный конгресс "Гео-Сибирь-2019", Межд. конф. "Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология", 17-18 апреля 2019, г. Новосибирск, Академгородок. - 8 (Хайретдинов М.С., Ковалевский В.В., Караваев Д. А., Якименко А.А., Ефимов С.А., Брагинская Л. П., Григорюк А.П., Фатьянов А.Г.)
12. Международная конференция "Суперкомпьютерные дни в России" // 23-24 сентября 2019, г. Москва - 2 (Караваев Д. А.)
13. 13th International Scientific Conference on Parallel Computational Technologies, PCT 2019; April 2-4 2019, Kaliningrad; Russian Federation - 1 (Караваев Д. А.)
14. 15th International Conference on Parallel Computing Technologies, PaCT 2019, August 19-23, 2019, Almaty, Kazakhstan - 1 (Караваев Д. А.)

### 3.10. Участие в экспедициях по тематике Проекта за период, на который был предоставлен грант

Новосибирская область

### 3.12. Адреса (полностью) ресурсов в Интернете, подготовленных Проекту

<https://icmmg.nsc.ru/node/509>

### 3.13. Библиографический список всех публикаций по Проекту, опубликованных за период, на который предоставлен грант

1. Khairtdinov M.S., Voskoboinikova G.M., Karavaev D.A. Numerical Simulation of Acoustic Waves Propagation in an “Atmosphere–Forestland–Ground” System // Journal of Applied and Industrial Mathematics 13(1), Publisher Name: Pleiades Publishing Ltd., January 2019, Volume 13, Issue 1, pp 175–183. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1990478919010186> ISSN: 1990-4789 ISSN: 1990-4789. Квартиль: Q3, (Scopus)
2. M. S. Khairtdinov, D.A. Karavaev, A. A. Yakimenko, A. Morozov. Approaches to Recognize Cavity Inclusions in Elastic Media in Problem of Monitoring Test Sites. // Proc. of 15th International Asian School-Seminar «Optimization Problems of Complex Systems» (OPCS-2019), 2019, 26 - 30 Aug, 2019, Novosibirsk, Akademgorodok. P. 78-81. ISBN: 978-172812986-0 DOI: <https://doi.org/10.1109/OPCS.2019.8880200> (WoS, Scopus)
3. Marat S. Khairtdinov, Valery V. Kovalevsky, Gulnara M. Shimanskaya, Galina F. Sedukhina and Alexander A. Yakimenko. ACTIVE MONITORING TECHNOLOGY IN STUDYING THE INTERACTION OF GEOPHYSICAL FIELDS. // Active Geophysical Monitoring. Elsevier (Second Edition), Chapter 3.3, 2019. P. 207-222. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102684-7.00010-8> (Scopus).
4. Marat S. Khairtdinov, Gyulnara M. Shimanskaya. THE NONLINEAR PROCESSES IN ACTIVE MONITORING. // Active Geophysical Monitoring (Second Edition). Elsevier, Chapter 3.4, 2019. P. 223-241. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102684-7.00011-X> (Scopus)
5. M. S. Khairtdinov, D.A. Karavaev, A. A. Yakimenko, A. Morozov. PRACTICAL ASPECTS THE RESTORING OF VELOCITY MODELS OF ELASTIC MEDIA IN THE PROBLEMS OF THE MONITORING OF THE ZONES THE UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSIONS. //Proc. of XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019, 28 June - 7 July, 2019, Albena, Bulgaria, V.19, Issue 2.1, P. 1019-1026. ISSN: 13142704 DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2019/2.1/S08.132> (Scopus)
6. Marat Khairtdinov., Dmitry Karavaev, Alexander Yakimenko, Anton Morozov. SEISMIC SIMULATION AND RECONSTRUCTION OF MODELS IN PROBLEMS OF STUDING AREAS OF UNDERGROUND NUCLEAR EXPLOSIONS. // Proc. of XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019, 28 June - 7 July, 2019, Albena, Bulgaria, V.19, Issue 2.1, P. 1051-1058. ISSN: 13142704 DOI: <https://doi.org/10.5593/sgem2019/2.1/S08.136> (Scopus)
7. Polina Mishchenko, Aleksander Nezvanov, Marat Khairtdinov/ Distributed Computing using GPU. // Proc. of 14 Intern. Forum on Strategic Technology (IFOST-2019), October 14-17, 2019, Tomsk, Russia, Tomsk Polytechnic University. – Tomsk: TPU Publishing House, 2019. P. 157-161. (Scopus)
8. Voskoboynikova G., Karavaev D., Kovalevsky V., Khairtdinov M. Mathematical simulation of acoustic waves propagation through forest layer onto ground // 2018 AIP Conference Proceedings Vol. 2025, 25 October 2018, 040017. DOI: 10.1063/1.5064901 (Scopus)
9. Воскобойникова Г. М., Карваев Д. А., Хайретдинов М. С. Численное моделирование распространения акустических волн в системе атмосфера-лесной массив-грунт. // СИБИРСКИЙ ЖУРНАЛ ИНДУСТРИАЛЬНОЙ МАТЕМАТИКИ, 2019, том 22, № 1 (77) С. 24-33. (ВАК, РИНЦ)
10. М.С. Хайретдинов, В.В. Ковалевский, Г.М. Воскобойникова, Г.Ф. Седухина. Вибрационная технология активного мониторинга в изучении взаимодействия геофизических полей. // Проблемы информатики, 2018. №4 (41). С.47-59. (РИНЦ)

### 3.12. Адреса (полностью) ресурсов в Интернете, подготовленных по Проекту

<https://icmmg.nsc.ru/node/509>

**3.14. Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты Проекта (выбор из списка)**

Информационно-телекоммуникационные системы

**3.15. Критическая технология РФ, которой, по мнению исполнителей, соответствуют результаты Проекта (выбор из списка)**

Технологии предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера

**3.16. Основное направление технологической модернизации экономики России, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты Проекта (выбор из списка)**

Стратегические информационные технологии, включая вопросы создания суперкомпьютеров и разработки программного обеспечения

**3.17. Направление из Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации**

Исследования в области понимания процессов, происходящих в обществе и природе, развития природоподобных технологий, человеко-машинных систем, управления климатом и экосистемами, а также исследования, связанные с этическими аспектами технологического развития, изменениями социальных, политических и экономических отношений.