

**Дальневосточное отделение Российской Академии наук
Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева**

**Результаты акустических исследований,
выполненных на Пильтун-Астохской лицензионной
площади и в прилегающей акватории
с 1 по 6 августа 2001 г.**

и

**с 17 по 24 сентября 2001 г.
о. Сахалин, Российская Федерация**

**С. В. Борисов
А. В. Гриценко
А. Н. Рутенко
А. В. Ходзевич**

**Подготовлено для
компаний «Эксон Нефтегаз Лимитед»
и
«Сахалин Энерджи Инвестмент Компани»**

**Южно-Сахалинск, о. Сахалин,
Российская Федерация**

31 июля 2002 г.

Содержание

СПИСОК РИСУНКОВ В ТЕКСТЕ.....	II
СПИСОК ТАБЛИЦ В ТЕКСТЕ	IV
КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ	V
1 ВВЕДЕНИЕ	1
1.1 Задачи программы акустических исследований.....	4
1.2 Оборудование для регистрации и обработки акустических сигналов.....	4
1.3 Терминология и алгоритмы, использованные в отчете	6
1.4 Единицы измерения.....	7
2 ОПИСАНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ	8
3 АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ В ТОЧКЕ Т.6	11
3.1 Измерение акустического фона в районе Пильтунского маяка - лето 2001 г.	11
4. АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ПЛАТФОРМОЙ «МОЛИКПАК» И СУДНОМ «ИРБИС».....	22
4.1 Анализ шумов, создаваемых на континентальном шельфе о. Сахалин судном «Ирбис».....	22
4.2. Акустические характеристики оборудования, работающего на платформе «Моликпак»	31
5 АНАЛИЗ ТЕХНОГЕННОГО АКУСТИЧЕСКОГО ПОЛЯ, ФОРМИРУЕМОГО КОМПЛЕКСОМ «МОЛИКПАК».....	36
5.1 Характеристики акустического поля между платформой «Моликпак» и заливом Пильтун.....	36
6 ВЫВОДЫ.....	55
7 ПЛАНЫ НА БУДУЩЕЕ	56
8 БЛАГОДАРНОСТИ	58
9 ПЕРЕЧЕНЬ АВТОРОВ ОТЧЕТА.....	58
10 БИБЛИОГРАФИЯ	59
ПРИЛОЖЕНИЕ А - МЕТОДОЛОГИЯ НОРМИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА АКУСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ.....	60

СПИСОК РИСУНКОВ В ТЕКСТЕ

- Рис. 1.1. Карта исследуемого района с указанием местоположения акустических буев (Т.6, В.1 ... В. 5) и потенциальных источников промышленных шумов («Моликпак», Оха и Ирбис).
- Рис. 3.1. Сонограммы шумов в окружающей среде, зарегистрированные в окрестностях точки т.6 в ночное время 1 августа 2001 г.
- Рис. 3.2. Сравнительные спектры, характеризующие временное изменение в окружающей среде шумов в диапазоне частот 10-2500 Гц. Данные были зарегистрированы в окрестностях точки т.6 в ночное время 1 августа 2001 г.
- Рис. 3.3. Сонограммы акустических шумов, зарегистрированные в точке т.6 днем 2 августа 2001 г. В связи с превышением (перегрузкой) технических возможностей радиогидроакустического буя (РГАБ) акустические импульсы, генерированные в период 16:00 - 18:30, зарегистрированы со значительными нелинейными искажениями
- Рис. 3.4. Сонограммы акустических шумов, зарегистрированные в точке т.6 в ночь с 4 на 5 августа 2001 г.
- Рис. 3.5. Сонограммы акустических шумов, зарегистрированные в точке т.6 в ночь с 5 на 6 августа 2001 г.
- Рис. 4.1. Сонограммы $G(f,t)$ и спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.3 и В.4, во время движения судна «Ирбис» в точку В.2.
- Рис. 4.2. Сонограммы $G(f,t)$ и спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3 и В.2, во время движения судна «Ирбис» в точку В.1.
- Рис. 4.3. Сонограммы $G(f,t)$ и спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3, В.2 и В.1, во время движения судна «Ирбис» в точку В.5.

- Рис. 4.4. Сонограммы $G(f,t)$ и спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.2, В1 и В.5, во время движения судна «Ирбис» от берега к месту стоянки. Судно «Ирбис» встало на якорь в 21:10.
- Рис. 4.5. Сонограммы $G(f,t)$ и спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.2, В1 и В.5, во время движения судна «Ирбис» от берега к месту стоянки. Судно «Ирбис» встало на якорь в 21:10.
- Рис. 4.6. Сонограммы $G(f,t)$ и спектры $G(f)$ акустических фоновых шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3, В.2, В1 и В.5 ночью 18 сентября 2001 г.
- Рис. 4.7. Сонограммы $G(f,t)$ и спектры $G(f)$ фоновых акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3, В.2, В1 и В.5 ночью 18 сентября 2001 г.
- Рис. 4.8. относительные спектры $G(f)$ акустических шумов, зарегистрированных в балластном отсеке платформы «Моликпак» в 09:30, 18 сентября 2001 г.
- Рис. 4.9. Относительные спектры $G(f)$ акустических шумов, зарегистрированных на палубе над балластным отсеком платформы «Моликпак» в 10:00, 18 сентября 2001 г.
- Рис. 5.1. Сонограммы $G(f,t)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3, В.2, В.1 и В.5 днем 18 сентября 2001 г.
- Рис. 5.2. Относительные спектры $E(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3, В.2, В.1 и В.5 при одновременной регистрации сигнала на пл. «Моликпак».
- Рис. 5.3. Спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3, В.2, В.1 и В.5 18 сентября 2001 г.
- Рис. 5.4. Спектры $G(f)$ тональных акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3, В.2, В.1 и В.5 18 сентября 2001 г.

- Рис. 5.5. Сонограммы $G(f,t)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3, В.2, В.1 и В.5 ночью 19 сентября 2001 г.
- Рис. 5.6. Сонограммы $G(f,t)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.2, В.1 и В.5 21-22 сентября 2001 г.
- Рис. 5.7. Спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.2, В.1 и В.5 в 15:50, 17:05, 18:05 и 18:55 21 сентября, 2001 г.
- Рис. 5.8. Спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.2, В.1 и В.5 в 20:10, 21:30 и 21:40 21 сентября 2001 г.
- Рис. 5.9. Спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.2, В.1 и В.5 в 00:20, 02:00, 02:15 и 03:20 22 сентября 2001 г.
- Рис. 5.10. Сонограммы $G(f,t)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.2, В.1 и В.5 днем 22 сентября 2001 г.
- Рис. 5.11. Spectra $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.2, В.1 и В.5 в 18:56, 20:16, 21:34 и 21:46 22 сентября 2001 г.
- Рис. 5.12. Sonograms $G(f,t)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.2, В.1 и В.5 днем 23 сентября 2001 г.

СПИСОК ТАБЛИЦ В ТЕКСТЕ

Таблица 2.1. Время, дата и местоположение мониторинговых радиогидроакустических буюв.

Краткое содержание

Оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС), проведенные до начала разработки запасов нефти и газа у северо-восточного побережья острова Сахалин показали, что основным вопросом охраны морской окружающей среды является защита западной (охотско-корейской) популяции серых китов (*Eschrichtius robustus*), для которой данная акватория является традиционным местом кормления в летне-осенний период. Эти киты занесены в Красную книгу России как находящиеся под угрозой исчезновения [Красная книга Российской Федерации (Животные) 2001], а по данным Международного союза охраны природы и природных ресурсов (IUCN) они отнесены к видам, находящимся под угрозой полного исчезновения [Hilton-Taylor 2000]. Фотоидентификационные работы показали, что за несколько последних лет некоторые особи китов пришли в истощенное состояние.

Наблюдения за серыми китами, проведенные в 1999 и 2000 годах показали, что основные места кормления (нагула) серых китов находятся в прибрежной зоне шельфа у входа в залив Пильтун и простираются к северу вдоль северо-восточного берега острова Сахалин в пределах 20-метровой изобаты.

Экспертной комиссией Государственной экологической экспертизы (ГЭЭ) было высказано пожелание, чтобы в Программу мониторинга серых китов в районе месторождения Одопту были включены исследования суммарного техногенного воздействия на эту популяцию будущей разработки данного месторождения, причем особое внимание должно быть уделено влиянию низкочастотных акустических волн. Соответственно, в 2001 г. акустические измерения были проведены у входа в залив Пильтун (начало августа), на платформе «Моликпак» и вблизи нее, а также на трассе «Моликпак – Пильтун» (вторая половина сентября). Дополнительные исследования фоновых и антропогенных шумов, генерируемых в процессе проведения строительных и эксплуатационных работ, будут проводиться в 2002 г. и в последующие годы.

Акустические измерения показали, что платформа «Моликпак» и нефтедобывающий комплекс «Витязь» излучают тональные и узкополосные акустические сигналы, в том числе на частотах меньше 30 Гц, спектральный уровень, которых на 10-15 дБ выше, чем уровень широкополосного шума. Было установлено, что наиболее интенсивными источниками акустического шума с частотой менее 1 кГц являются суда обеспечения. На участке кормления серых китов, расположенном в море недалеко от входа в Пильтунский залив, практически постоянно фиксировались антропогенные акустические сигналы, излучаемые стационарными и движущимися источниками. Спектральные уровни этих тональных и узкополосных сигналов (с частотой менее 500 Гц) составляли ~80-90 дБ отн. 1 мкПа²/Гц.

1 Введение

Программа акустических исследований, проведенных в районе северо-восточного шельфа острова Сахалин в 2001 году, включала две основные задачи. Первая задача заключалась в оценке уровней и мониторинге звука, распространяющегося из Одопту во время проведения там сейсморазведывательных работ, а вторая – в изучении временных и пространственных вариаций амплитуды и частотных характеристик антропогенных акустических шумов регистрируемых у входа в залив Пильтун¹. Первая задача была рассмотрена в отдельном отчете [Борисов и др., 2002], а вторая задача является предметом обсуждения данного отчета. Акустические измерения были проведены у входа в залив Пильтун в начале августа, а на трассе «Моликпак – Пильтун» в середине сентября. Основными источниками антропогенных акустических шумов в данном районе являются оборудование, работающее на платформе «Моликпак» и плавучем нефтехранилище «Оха», вспомогательные суда, обслуживающие нефтедобывающий комплекс «Витязь», а также движущейся или стоящий на якоре танкер. Кроме того, в течение августа и сентября, сейсморазведочное судно *«Нордик Эксплорер»* проводило сейсморазведывательные работы на участке, расположенном к северу от 52° 57' сев. широты [Борисов и др., 2002]. Двигатели зодиаков, работающих вблизи от скоплений серых китов, также являются дополнительными источниками нестационарных акустических шумов в этом районе. Зодиаки, в течение нескольких лет, используются группой научных сотрудников, базирующихся на Пильтунском маяке.

Предшествующие исследования [Cummins et. al., 1968] показали, что серые киты могут издавать акустические сигналы на инфразвуковых частотах (15 Гц); однако большинство, генерируемых ими сигналов состоят из серий импульсов с концентрацией акустической энергии в полосе частот от 300 до 800 Гц [Richardson et al. 1995]. Для оценки возможного воздействия антропогенного шума на процесс кормления серых китов, необходимо определить средние

амплитуды (уровни) и спектры этих шумов, а также исследовать особенности и потери при распространении звука от платформы «Моликпак» к входу в залив Пильтун. Известно, что в этом районе серые киты кормятся на глубинах ~6-12 м [Sobolevsky 1999, 2000; Язвенко и др. 2002].

На рис. 1.1 показана карта района исследований с указанием точек (т.6, В.1, ... В.5), в которых с помощью стационарных радиогидроакустических буев были проведены измерения окружающих акустических шумов. На этой карте также показано местоположение платформы «Моликпак» и плавучего нефтехранилища «Оха», которые соединены подводным трубопроводом (потенциальные источники шума). На карте также показана акустическая трасса «Моликпак - Пильтун», вдоль которой были проведены специальные акустические измерения. Вход в залив Пильтун находится южнее Пильтунского маяка, который отмечен кружком оранжевого цвета².

¹ Вход в залив Пильтун является одним из участков летнего кормления (нагула) для корейско-охотской (западной) популяции серых китов.

² В настоящее время из-за перемещения песчаной косы вход в залив Пильтун находится значительно южнее, чем это показано на рис. 1.1, примерно на траверзе точки В.3.

1.1 Задачи программы акустических исследований

Задачей этой части программы акустических исследований являлась постановка в море вдоль трассы «Моликпак – Пильтун» радиогидроакустических буев (РГАБ) и проведение синхронных измерений с целью определения спектральных характеристик шума, производимого добывающим комплексом «Витязь» и особенностей его распространения в район кормления серых китов.

1. С помощью РГАБ, установленных в районе кормления серых китов, провести измерения акустического фона в разных погодных условиях и во время проведения типовых операций на платформе «Моликпак», которые могут сопровождаться генерированием акустических шумов.
2. Измерить индустриальные акустические сигналы на платформе «Моликпак», генерируемые работающими на ней механизмами.
3. Исследовать временные и пространственные вариации антропогенного шума; определить средние амплитуды (уровни) и спектральные характеристики шума, генерируемого основными стационарными и движущимися источниками.

1.2 Оборудование для регистрации и обработки акустических сигналов

Для измерения акустических сигналов в полосе частот от 10 Гц до 5 кГц и передачи их на береговой пост по радиоканалу применялись стационарные автономные радиогидроакустические буи. Акустические сигналы измерялись у дна с помощью гидрофонов, установленных в пирамидальном проволочном каркасе³. Применялись гидрофоны двух типов: стандартные дисковые гидрофоны типа ПР-1 (PR-1) и цилиндрические гидрофоны типа ПР-2 (PR-2). На приемном посту с помощью усилителя-корректора компенсируется уменьшение коэффициента уселения на низких частотах предварительного усилителя к которому подключен гидрофон. Применение в сквозном измерительном тракте взаимно компенсирующих частотных коррекций

³ Гидрофон преобразует акустическое давление в электрическое напряжение.

позволяет оптимально использовать динамический диапазон радиотелеметрического канала. Аналоговые данные, полученные на береговом посту, преобразуются в цифровые данные с помощью аналого-цифрового преобразователя (ADC) в цифровой код и накапливаются в цифровой форме на жестком диске компьютера⁴. Измерительно-регистрационная система обеспечивает фильтрацию, оцифровку, визуализацию и накопление данных, поступающих от восьми акустических буев. Более подробное описание характеристик и результатов калибровки использованного оборудования приведено в отчете [Борисов и др., 2002].

Измеряемый радиогидроакустическим буюм (РГАБ) уровень (RL) акустического шума зависит от глубины моря в районе измерений и расстояния до потенциальных источников этих шумов. Коэффициент усиления в измерительном тракте акустического бую устанавливается так, чтобы максимально использовать динамический диапазон радиотелеметрического канала. Чем ближе расположен РГАБ к платформе «Моликпак», тем выше уровень акустического шума и тем меньше коэффициент усиления (или чувствительность) в этом РГАБ. Поэтому, РГАБ, установленные вдали от платформы «Моликпак» (в мелководной части изучаемой акватории) (т.6, В.4 и В.3), имеют более высокие коэффициенты усиления, чем те, которые расположены на близких расстояниях.

Радиогидроакустические буи устанавливались с зодиака или со вспомогательного судна «Ирбис». Радиотелеметрические сигналы принимались на судне «Ирбис» и на Пильтунском маяке. Сигналы, поступающие от пяти акустических буев (Рис. 1.1, пункты от В.1 до В.5), принимались на Пильтунском маяке с помощью узконаправленной многоэлементной радиоантенны и высокочувствительных радиоприемников⁵. Это позволило осуществить синхронный прием и накопление акустических

⁴ Данные хранятся на жестких дисках портативных компьютеров в файлах размером 650 мегабайт, что облегчает их перезапись на компакт-диски (CD's).

⁵ Стандарт AX-700

данных измеряемых пятью РГАБ.

1.3 Терминология и алгоритмы, использованные в отчете

Фоновые и антропогенные шумы, измеренные радиогидроакустическими буями, записывались на диске в микропаскалях (мкПа)⁶. Для описания акустической мощности, как функции от частоты измеренного шума, применялись спектры (оценка спектральной плотности мощности) в децибелах. В данном отчете, при построении графиков спектров шумов, используется спектр плотности мощности звукового давления (мкПа²/Гц)⁷.

Спектральный уровень шума относится к уровню акустической мощности сигнала в полосе частот шириной 1 Гц. Этот термин применим только к звуковым волнам с непрерывными частотными спектрами⁸. Такие спектры часто усредняются с использованием от 10 до 300 односекундных интервалов⁹, что повышает статистическую стабильность (достоверность) количественных оценок уровня фонового шума¹⁰.

Сонограммы иллюстрируют изменения спектров во времени и, построены в условной цветовой шкале охватывающей диапазон от ~40 до ~105 дБ отн. 1 мкПа²/Гц.

Результаты акустических измерений, проведенных с помощью радиогидроакустических буюв, представляются в виде синхронных рядов пространственно дискретных данных. Эти ряды позволяет оценивать

⁶ Данные нормировались (с учетом чувствительности гидрофонов и сквозного коэффициента усиления измерительного тракта) для преобразования в стандартные единицы давления (измеряемого гидрофоном) в реальном масштабе времени.

⁷ Энергетические и силовые спектры даются в масштабе 1 Гц независимо от длины анализируемой записи.

⁸ Непрерывный частотный спектр представляет собой спектр сигналов, замеренных в любом диапазоне частот.

⁹ Усреднение для 10 – 300 односекундных реализаций спектра.

¹⁰ Осреднение спектров уменьшает ошибки связанные с инструментальными шумами и увеличивает отношение измеряемого шума к инструментальному шуму при низких уровнях акустического фонового шума.

временные, пространственные и спектральные¹¹ характеристики измеренных акустических полей. Шум (сигнал), создаваемый движущимся судном имеет непрерывный спектр с дискретными тональными компонентами. Оборудование, работающее на платформе «Моликпак» (газогенераторы, компрессоры, насосы и др.), является также источником непрерывного тонального и широкополосного акустического шума, включая и шумы в инфразвуковом диапазоне (<20 Гц).

Подробное описание методики, использованной при нормировке и анализе амплитудных и спектральных характеристик, приводится в Приложении А.

1.4 Единицы измерения

В данном отчете использованы различные единицы измерения, что обусловлено различием стандартных систем обозначений в разных областях знаний и в разных странах.

Ниже приводятся эквивалентные единицы измерения с использованием различных стандартных обозначений:

$$1 \text{ мкПа} = 1 \text{ }\mu\text{Pa}$$

$$1 \text{ мкВ} = 1 \text{ }\mu\text{V}$$

Необходимо также помнить, что:

$$1 \text{ атм} \cong 1 \text{ бар} = 0.1 \text{ МПа} = 10^{11} \text{ мкПа}$$

Для графиков спектральной плотности:

Общепринятой единицей измерения спектральной плотности мощности акустического сигнала является $\text{мкПа}^2/\text{Гц}$ или $\text{мкПа}/\sqrt{\text{Гц}}$.

¹¹ Спектральные характеристики акустического поля анализируются в частотном диапазоне регистрирующей системы.

2 Описание полученных акустических данных

В таблице 2.1 указаны глубина моря и координаты точек (см. рис.1.1: т.6, В.1, В.5), в которых устанавливались радиогидроакустические буи, а также время начала и конца записи акустических сигналов по каждому бую.

№	Дата/Время		Ch	РГАБ	Широта	Долгота	Глубина (м)
	Начала	Конца	#				
1	01.08.012 3:55	06.08.01 14:23	1	т.6	52°52'54.1"с.ш	143°23'19.5"в.д	20
2	17.09.011 4:20	21.09.01 08:00	1	В.4	52°52'24" с.ш.	143°21'09" в.д.	10
3	17.09.011 5:00	21.09.01 08:00	2	В.3	52°50'18" с.ш.	143°21'50" в.д.	11
4	17.09.011 5:34	24.09.01 08:42	3	В.2	52°49'10" с.ш.	143°25'01" в.д.	14
5	17.09.011 6:14	24.09.01 08:42	4	В.1	52°46'10" с.ш.	143°29'00" в.д.	20
6	17.09.011 7:20	24.09.01 08:42	5	В.5	52°43'30" с.ш.	143°33'06" в.д.	24

Таблица 2.1 – Время, дата и местоположение мониторинговых радиогидроакустических буюв.

В начале августа, акустические измерения выполнялись с использованием радиогидроакустического бую, расположенного в точке т.6. В течение этого временного периода, к северу от 52°57' с.ш были выполнены акустические эксперименты по калибровке буферной зоны с использованием сейсмического судна «Нордик Эксплорер». Судно «Нордик Эксплорер» осуществляло запись сейсмических данных, перемещаясь параллельно и перпендикулярно

береговой линии; каждый эксперимент по калибровке выполнялся, приблизительно, в течение 2-3 часов в дневное время [Борисов и др., 2002]. Во время проведения этих экспериментов (т.е. 4 августа), танкер «Приморье» вошел в район расположения платформы Моликпак», но из-за плохих погодных условий смог приблизиться к плавучему нефтехранилищу «Оха» только 6 августа после полудня.

17 сентября, пять радиогидроакустических буев были установлены с судна «Ирбис» в точках В.1 – В.5 (Рис. 1.1). Радиотелеметрические сигналы от этих буев уверенно принимались на Пильтунском маяке. Это позволило осуществить синхронную запись сигналов от всех пяти буев на одном портативном компьютере.

18 сентября, два научных сотрудника с регистрирующей аппаратурой перешли с судна «Ирбис» на платформу «Моликпак» и выполнили акустические измерения на платформе. Измерения были проведены внутри балластного отсека, который находится ниже уровня воды, в основании платформы «Моликпак». Были также выполнены измерения вибраций главной палубы платформы «Моликпак» с помощью гидрофонов, находящихся в воде.

В сентябре во время акустических измерений производились записи в вахтенном журнале о судах, работающих в районе платформы «Моликпак». Указывалось название судна, давалось описание его работы и координаты его местоположения. 22 сентября, в 14:00 танкер «Приморье» причалил к нефтехранилищу «Оха» и в 16:45 начал принимать нефть. Отгрузка нефти закончилась 23 сентября, в 03:00, а в 08:20 танкер «Приморье» отошел от плавучего нефтехранилища «Оха». Во время отгрузки нефти, постоянно работающий буксир «Смит Сахалин» обеспечивал стабильную ориентации связки из двух танкеров у одноякорного причала, который соединен подводным трубопроводом с платформой «Моликпак».

В течение всего периода исследований, измерения характеристик акустического поля проводились в нескольких точках. Эти измерения обеспечивают получение количественных оценок уровня фонового шума и антропогенного шумов, создаваемых судами и оборудованием, используемыми для обеспечения работ на нефтедобывающем комплексе «Витязь». Кроме того, измерения выполненные во время проведения трехмерной сейсморазведки на месторождении Одопту [Борисов и др., 2002], позволили оценить амплитудные уровни сейсмических сигналов, генерируемых сейсмо-разведывательным судном «*Нордик Эксплорер*» и шумов от вспомогательных кораблей «*Рубин*» и «*Атлас*». Синхронные измерения уровней шума в пяти точках расположенных на трассе простирающейся от платформы «Моликпак» до устья залива Пильтун позволили провести анализ спектральных, пространственных и временных характеристик акустического поля в этом районе.

3 Анализ акустических данных, полученных в точке т.6

В данном разделе приводятся результаты спектрального анализа акустических шумов, измеренных в районе нагула (кормления) серых китов, расположенном у устья залива Пилтун. Измерения проводились в разных гидрометеорологических условиях, и получены результаты, соответствующие фоновым условиям и акустической обстановке,, характеризуемой высоким уровнем техногенных (антропогенных) шумов.

3.1 Измерение акустического фона в районе Пилтунского маяка - лето 2001 г.

В период с 1 по 6 августа проводились акустические измерения с помощью радиогидроакустического буя (РГАБ), установленного в точке т.6 (рис. 1.1)¹². На рис. 3.1 и 3.2 представлены текущие спектры (сонограммы)¹³ $G(f,t)$ и оценки спектральной плотности мощности (спектр) $G(f)$, рассчитанные по результатам измерений акустического шума, проведенным в ночное время 1 августа 2001 г. На рис. 3.1 разных цветов показаны различные значения спектральной плотности мощности шума $G(f,t)$ в дБ отн. $1 \text{ мкПа}^2/\text{Гц}$. Сонограмма спектральной плотности мощности позволяет провести количественную оценку спектрально-временной структуры акустического поля в точке т.6, а также проанализировать и идентифицировать стационарные и перемещающиеся источники узкополосных и широкополосных шумов. Сонограммы $G(f,t)$ представлены в широком (0-1500 Гц) и относительно узком (0-500 Гц) частотных диапазонах, что облегчает визуальный анализ данных. Акустические измерения были проведены в диапазоне частот 10 - 5000 Гц. Известно, что уровни фоновых шумов на частотах более 3 кГц ниже чем в низкочастотном диапазоне. Вместе с тем, динамический диапазон РГАБ ограничен значением ~40 дБ. Поэтому сонограммы построены в диапазоне частот, в котором уровень акустического сигнала находился в пределах динамического диапазона РГАБ¹⁴.

¹² Установленный в т.6 РГАБ был потерян во время штормовой погоды и не прошел процесса взаимной калибровки и поэтому полученные данные используются только для относительной оценки амплитуд измеренного акустического поля.

¹³ Сонограмма представляет собой текущий спектр, который иллюстрирует изменения уровня акустического сигнала в зависимости от частоты и времени.

Представленная на рис. 3.1 сонограмма иллюстрирует частотно-временную структуру акустического поля в точке т.6. На рис. 3.1 видно, что в спектре доминируют низкочастотные тональные и узкополосные шумовые сигналы, генерируемые стационарными источниками. На сонограммах $G(f,t)$ и спектрах $G(f)$, представленных на рисунках 3.2 и 3.3, показаны амплитуда и частота антропогенного сигнала источником которого мог быть корабль, находящийся в море¹⁵, или оборудование работающее на маяке Пильтун, либо вблизи него. На рис. 3.2 видно, что амплитуды звуковых колебаний в фоновом спектре¹⁶ шумов на частотах выше 250 Гц примерно линейно уменьшаются с увеличением частоты пропорционально -0.01 дБ/Гц.

¹⁴ Динамический диапазон определяется отношением максимальной к минимальной амплитуде сигнала, которые могут быть с допустимыми искажениями переданы по радиотелеметрическому каналу.

¹⁵ Трехлопастной гребной винт может генерировать акустический сигнал с частотой 38 Гц.

¹⁶ 2-минутней оценки $G(f)$ являются результатом осреднения 120 односекундных спектров.

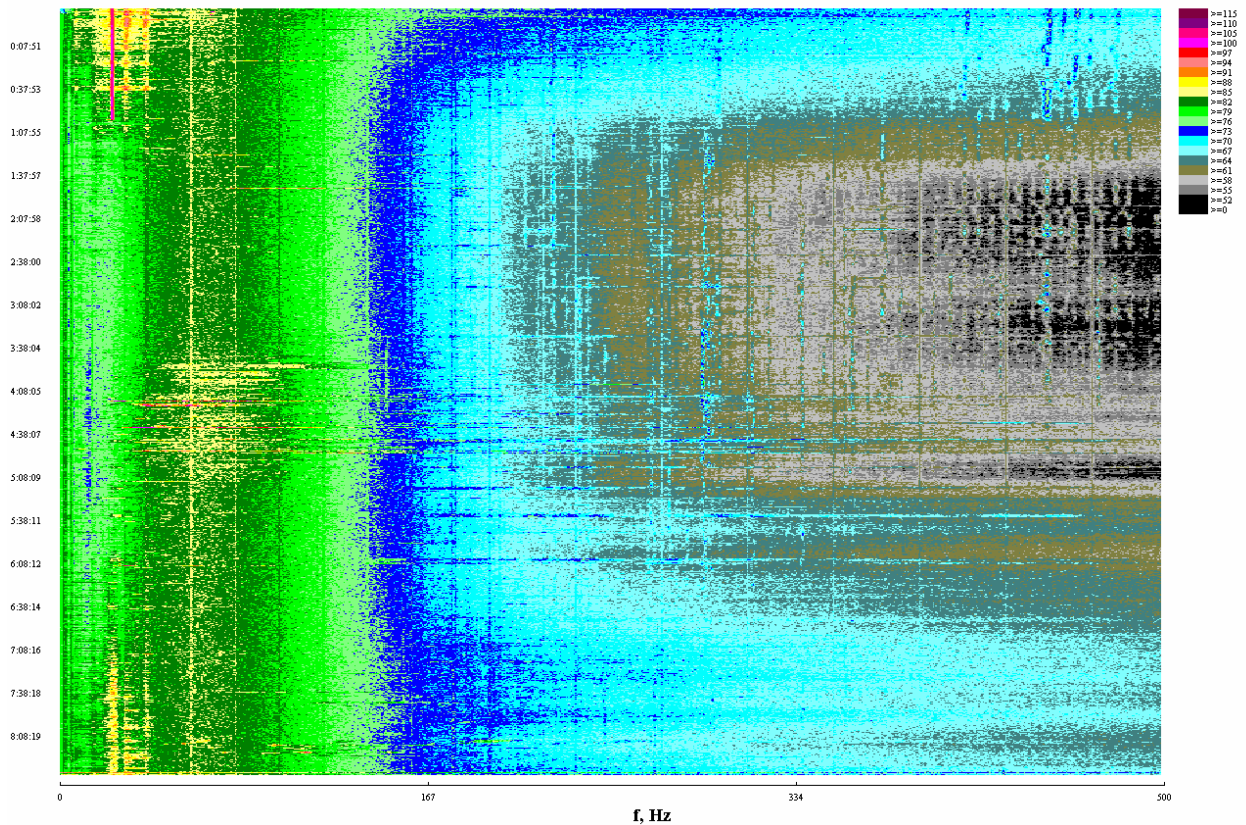
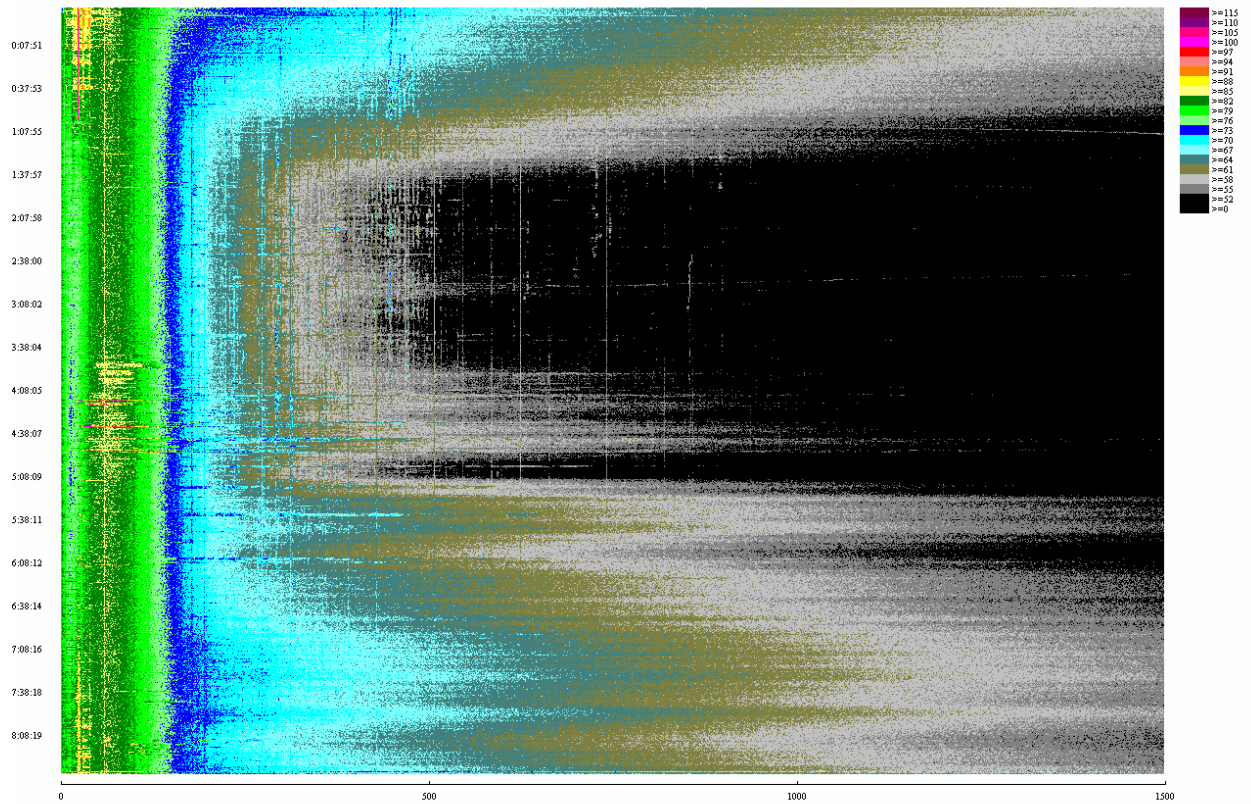


Рис. 3.1. Сонограммы шумов в окружающей среде, зарегистрированные в окрестностях точки т.6 в ночное время 1 августа 2001 г.

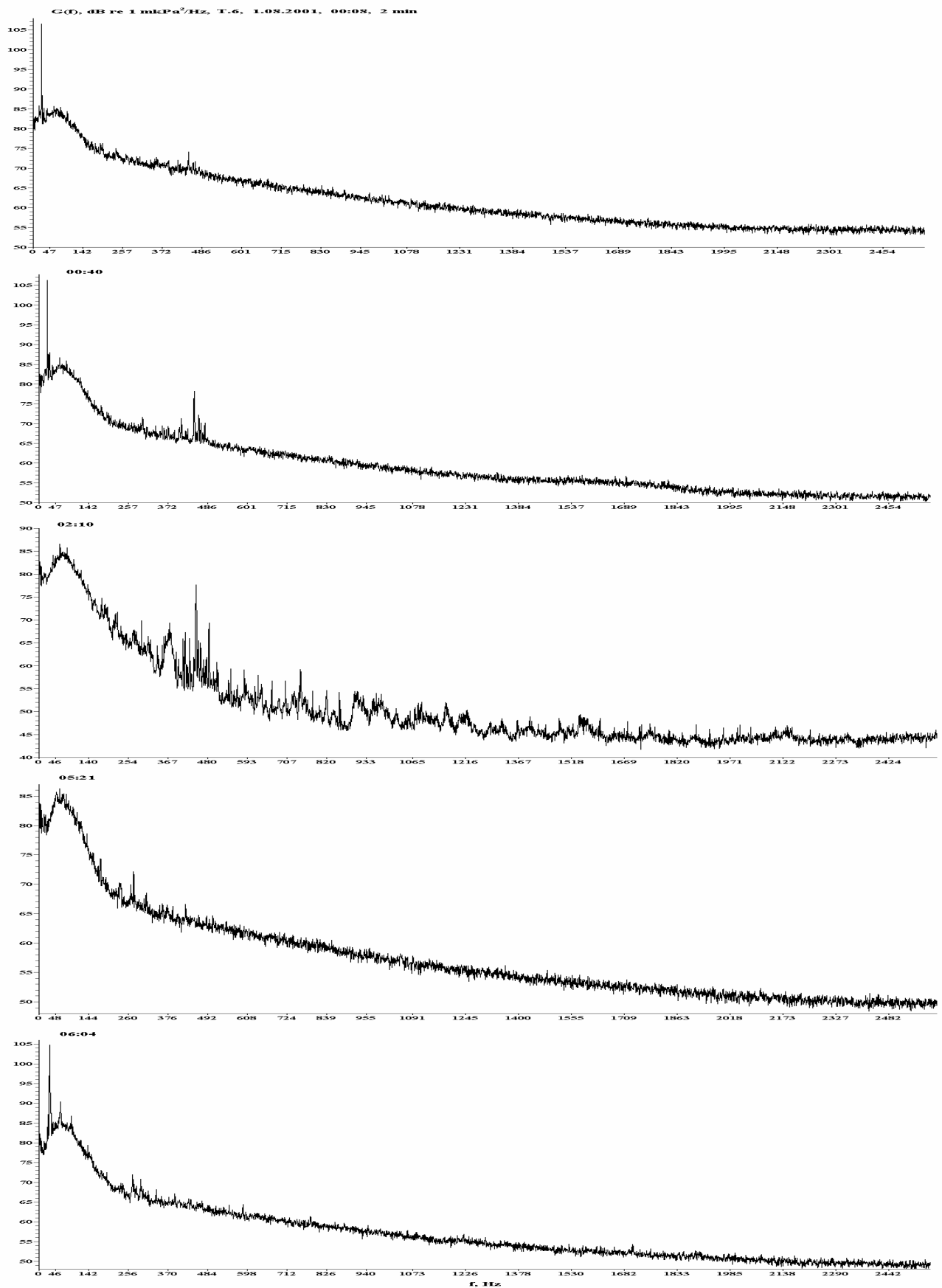


Рис. 3.2. Сравнительные спектры, характеризующие временное изменение в окружающей среде шумов в диапазоне частот 10-2500 Гц. Данные были зарегистрированы в окрестностях точки т.6 в ночное время 1 августа 2001 г.

В частотном диапазоне 50-200 Гц наблюдается снижение спектральной плотности примерно пропорционально -0.1 дБ/Гц. В диапазоне частот 0-50 Гц наблюдается увеличение значений $G(f)$. Для антропогенных шумов техногенного происхождения характерен пик спектральной плотности на частотах 20-30 Гц (рис. 3.2)¹⁷.

На рис. 3.3 представлены сонограммы фоновых значений акустического поля, зарегистрированных 2 августа 2001 г. (в дневное время) в точке т.6. В этот день на южном участке акватории, включенной в программу выполнения проекта по Одопту, был проведен эксперимент по акустической калибровке с целью установления буферной зоны при проведении сейсморазведочных работ на месторождении Одопту. Сейсморазведочное судно *“Нордик Эксплорер”* двигалось перпендикулярно по отношению к береговой линии по курсу, показанному красным цветом на рис. 1 [Борисов и др., 2002 г.]. Во время этих измерений в море наблюдались обрушающиеся (с «барашками», высотой примерно 1 м) поверхностные волны, генерируемые юго-восточным ветром. Судно *“Нордик эксплорер”* включило групповой пневмоисточник в 15:10 и начало постепенно наращивать мощность излучаемых им акустических импульсов. После 16:18 акустические импульсы от судна *“Нордик эксплорер”* перегрузили измерительный гидрофон¹⁸, т.е. произошла перегрузка в измерительном тракте радиогидроакустического буйа. В 18:21 суммарный объем группового пневмоисточника был уменьшен с 3090 до 100 куб. дюймов. Акустический импульс при объеме источника 100 куб. дюймов не приводили к перегрузкам в измерительном тракте. В конце эксперимента судно *“Нордик Эксплорер”* пошло на юг и около точки т.6 сменило курс на восточный, направляясь в более глубоководный участок акватории. Рис. 3.3 иллюстрирует частотно-пространственную интерференционную структуру акустического поля, генерируемого судном *“Нордик Эксплорер”* при выполнении этого маневра в период

¹⁷ Возможно, что эти шумы техногенного происхождения генерировались судном *“Рубин”* проходящим вблизи буйа.

¹⁸ Полученные данные не будут точно соответствовать спектральной характеристике, поскольку были превышены технические возможности системы приема (гидрофона). Этот буй имел очень высокий коэффициент усиления и поэтому был значительно более чувствительным, чем другие буи, использовавшиеся при проведении данного исследования. Этот буй был установлен в точке т.6 для измерений фоновых шумов. Акустическая калибровка, которая проводилась к югу от района Одопту, выполнялась с использованием пневмоисточников (ПИ) с суммарным объемом группы камер равным 3090 куб. дюймов, но при проведении сейсморазведочных работ он был снижен до 1640 куб. дюймов.

времени 19:00-20:30. В 20:00 судно “*Нордик Эксплорер*” находилось на наименьшем удалении от точки т.6.

На рис. 3.4 представлена сонограмма шумов измеренных в точке т.6. Эта информация соответствует периоду времени, в течение которого вблизи этой точки не наблюдалось движущихся судов. Тем не менее, даже если судно стоит на якорь, оно является источником интенсивных акустических шумов, генерируемых работой судовых силовых установок и механизмов, вибрации от которых передаются через подводную часть корпуса судна, которая является наиболее эффективным источником переизлучения звуковых колебаний в воду, в том числе на низких частотах. Ниже перечислены причины, которые могут вызывать вибрации:

- Вращение несбалансированных частей машин и механизмов;
- Вибрация фундаментов двигателей;
- Возвратно-поступательное движение таких механических элементов, как поршни двигателей;
- Явления кавитации и турбулентности при прохождении потока жидкости через насосное оборудование, трубопроводы, клапаны, системы охлаждения и сепарации (конденсоры);
- Механические сопротивления в подшипниках.

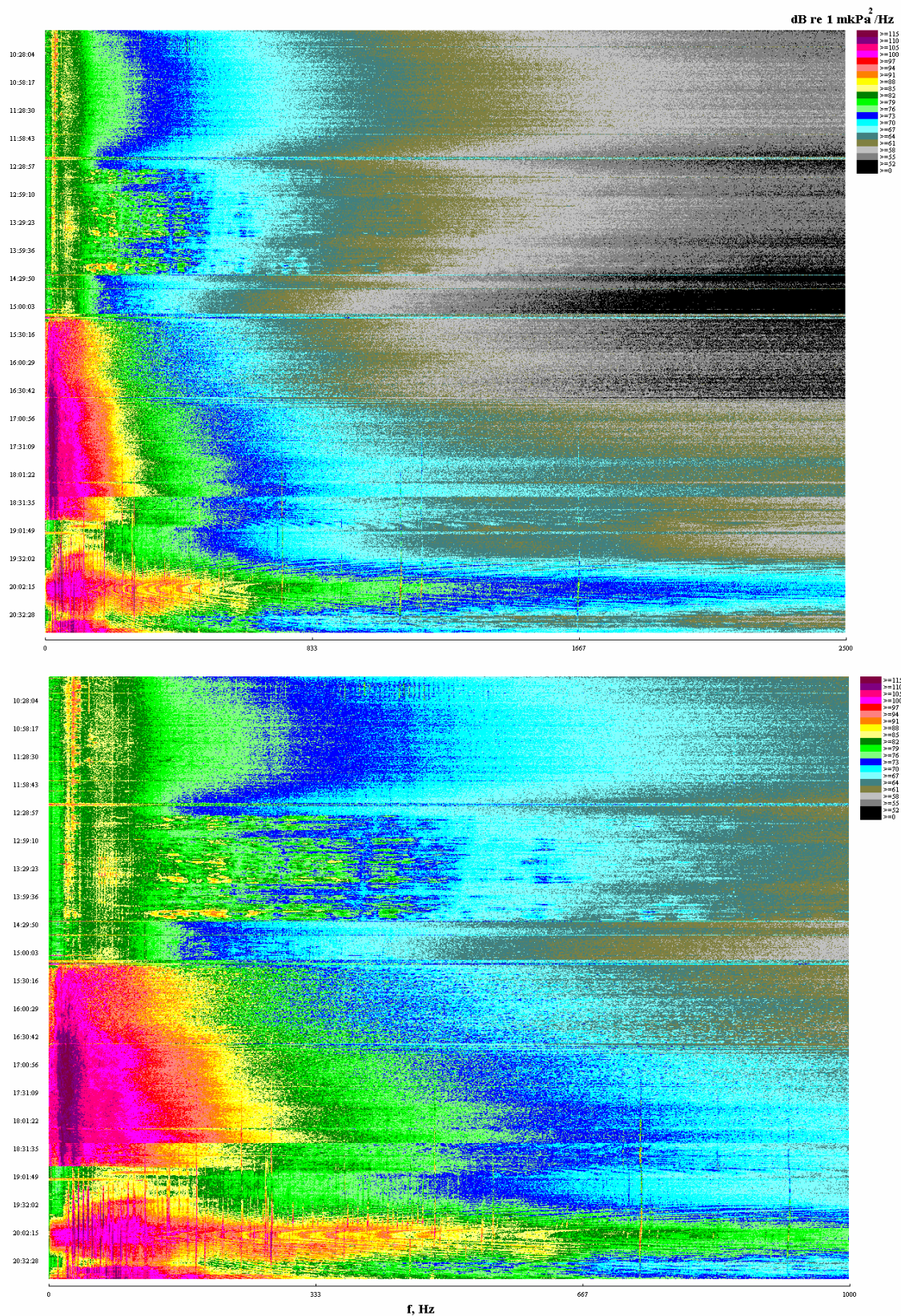


Рис. 3.3. Сонограммы акустических шумов, зарегистрированные в точке т.6 днем 2 августа 2001 г. В связи с превышением (перегрузкой) технических возможностей радиогидроакустического буя (РГАБ) акустические импульсы, генерированные в период 16:00 - 18:30, зарегистрированы со значительными нелинейными искажениями.

Первые три источника шума, описанные выше, генерируют дискретные компоненты частотного спектра, характерные для вращающихся в процессе работы частей механизмов. Эти дискретные компоненты частотного спектра, генерируются в тех случаях, когда наблюдается явление резонанса в колебаниях элементов судовых механизмов. Последние два источника, генерируют непрерывный частотный спектр акустических шумов. Таким образом, шумовой спектр элемента оборудования (агрегата) представляет собой результат наложения интенсивных дискретных компонент на непрерывный шумовой спектр.

В 23:00 (см. рис. 3.4) была ясная погода при южном ветре, скорость которого достигала 10 м/с. В это время к северу от платформы “Моликпак” находилось судно, а к востоку от платформы “Моликпак” находился танкер “Приморье”. Спектральный уровень широкополосного акустического шума не превышал 64 дБ и на его фоне хорошо выделялись пики от узкополосных сигналов на частотах 20-70 Гц. Уровень этих сигналов на 30-35 дБ превышал уровень широкополосного шума.

На рис. 3.5 представлены сонограммы спектров акустических шумов, зарегистрированных в точке т.6 в течение ночи с 5 на 6 августа 2001 г. Эти сонограммы могут быть сопоставлены с сонограммами представленными на рис.3.4, соответствующих измерениям проведенным примерно в тоже самое время, но на сутки ранее. 5 августа 2001 г. в 22:44 был шторм с дождем, и поэтому танкер “Приморье” стоял на якоре. 6 августа 2001 г. в 05:50 дул юго-восточный ветер со скоростью 5-7 м/с и стоял туман, при котором видимость была не более 400-500 м. На рис. 3.5 видно, что 6 августа в 00:00 в диапазоне частот 100-1500 Гц отмечалось резкое увеличение амплитуды шумов техногенного происхождения.

Временная картина частотной интерференции, представленная на рис. 3.5, показывает, что источник шумов характеризовался нестационарным положением и находился, по-видимому, в состоянии движения. Одной из возможных причин изменения его положения могло быть пространственные перемещения танкера “Приморье” относительно якоря вызываемые приливными течениями. После 00:30 произошла относительная стабилизация частотной интерференционной картины.

В заключение следует отметить, что в начале августа 2001 г. в точке т.6 в диапазоне частот от 12 Гц до 70 Гц регулярно регистрировались шумы тонального характера и узкополосные шумы (рис. 1.1), причем эти шумы изменялись как во времени, так и по частоте. Уровень этих узкополосных шумов более чем на 30 дБ превышал уровень широкополосных фоновых шумов, и был сопоставим с уровнем сигналов, генерируемых движущимися судами.

К сожалению, источник шумов не может быть идентифицирован, поскольку измерения акустического поля производились только в одной точке. Поэтому было принято решение производить измерения акустического поля с помощью нескольких пространственно разнесенных радиогидроакустических буев (РГАБ) устанавливаемых вдоль трассы, ориентированной на потенциальные источники антропогенных шумов, причем эти буи были взаимно откалиброваны, что позволяет определять абсолютные значения при анализе спектральных характеристик шумов.

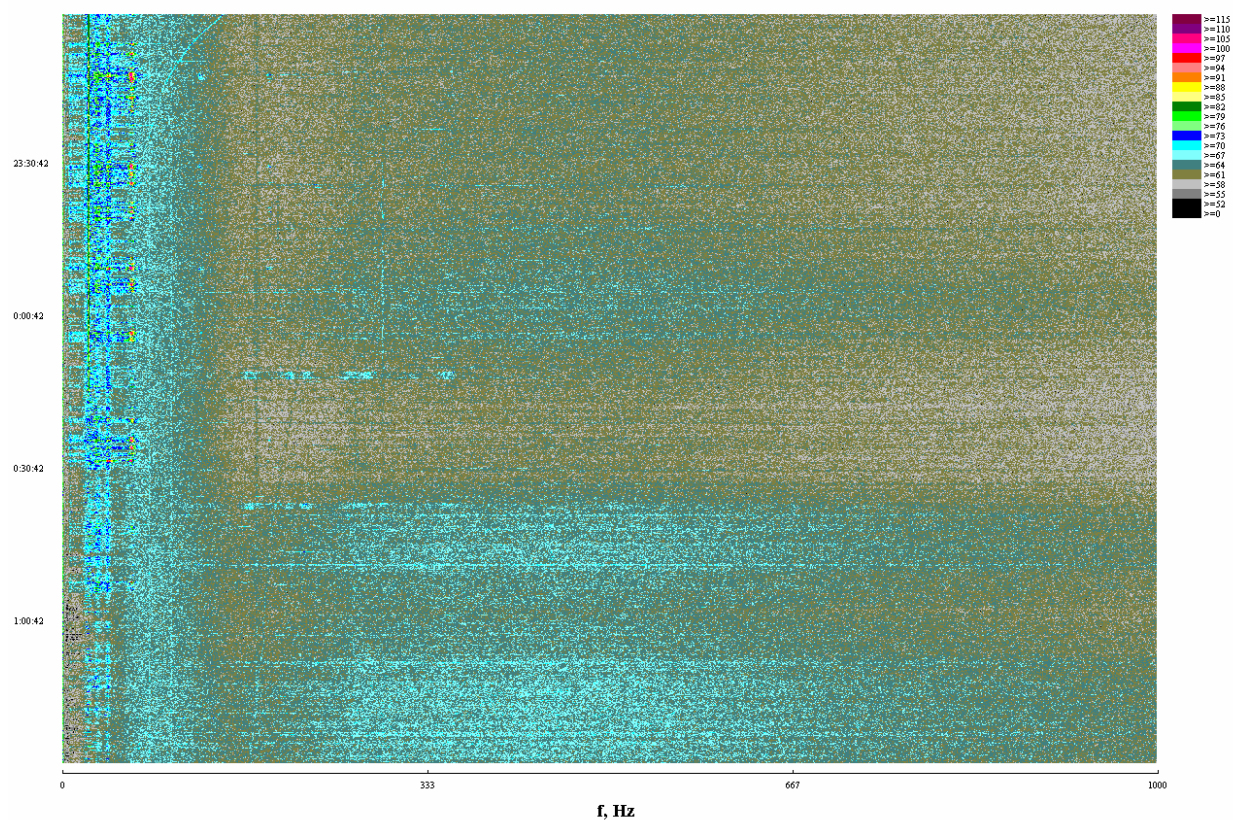
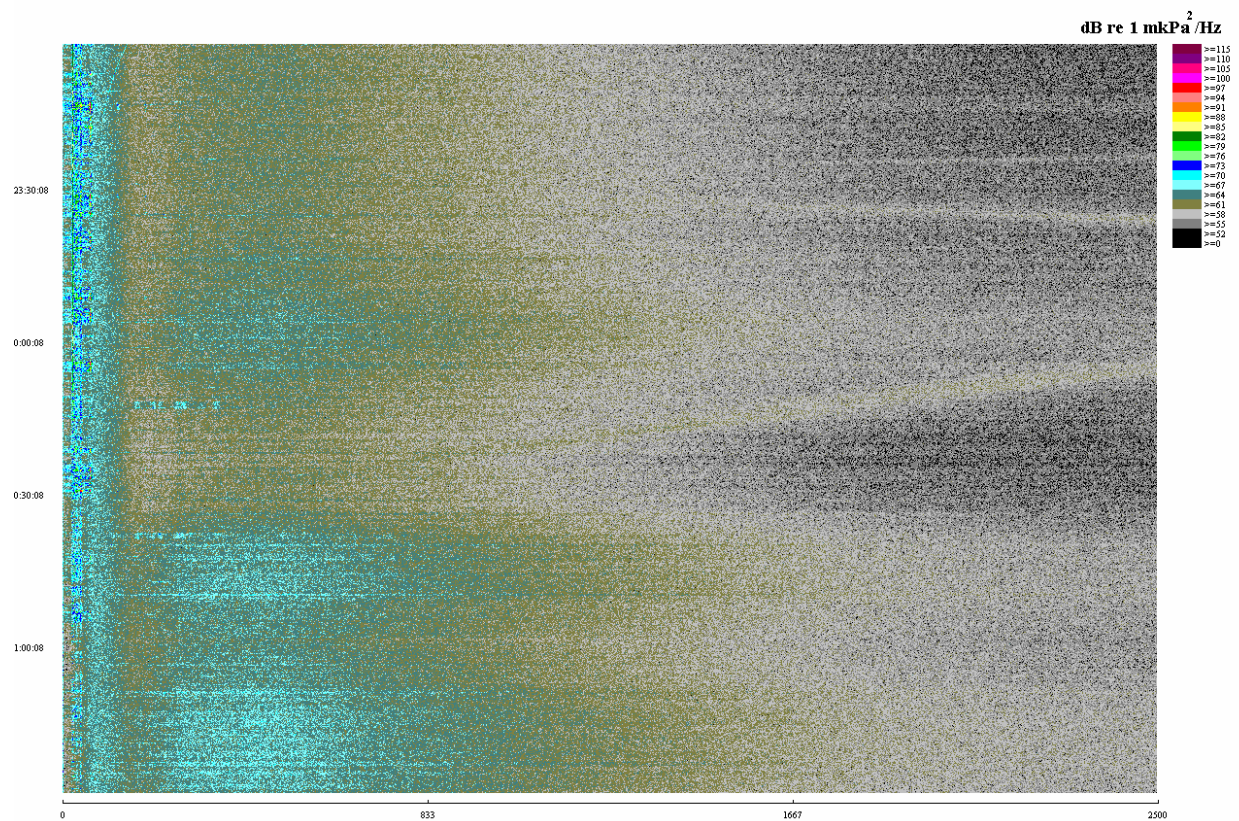


Рис. 3.4. Сонограммы акустических шумов, зарегистрированные в точке т.6 в ночь с 4 на 5 августа 2001 г.

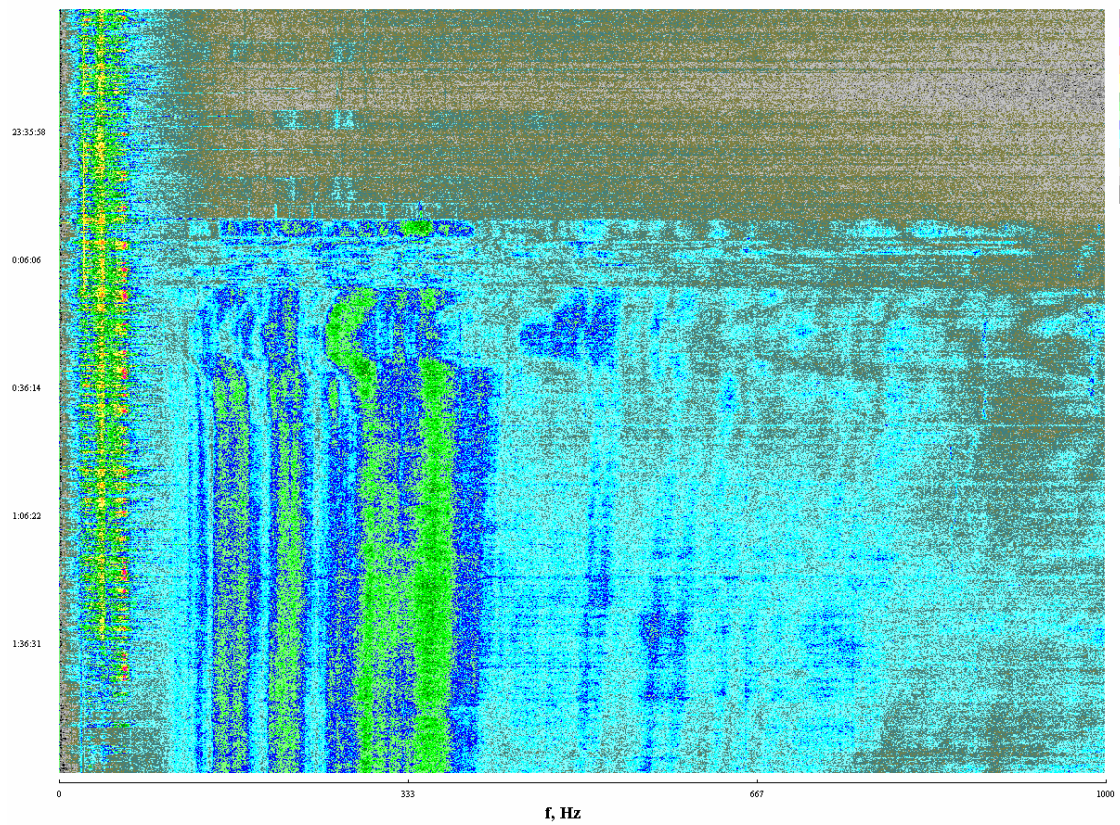
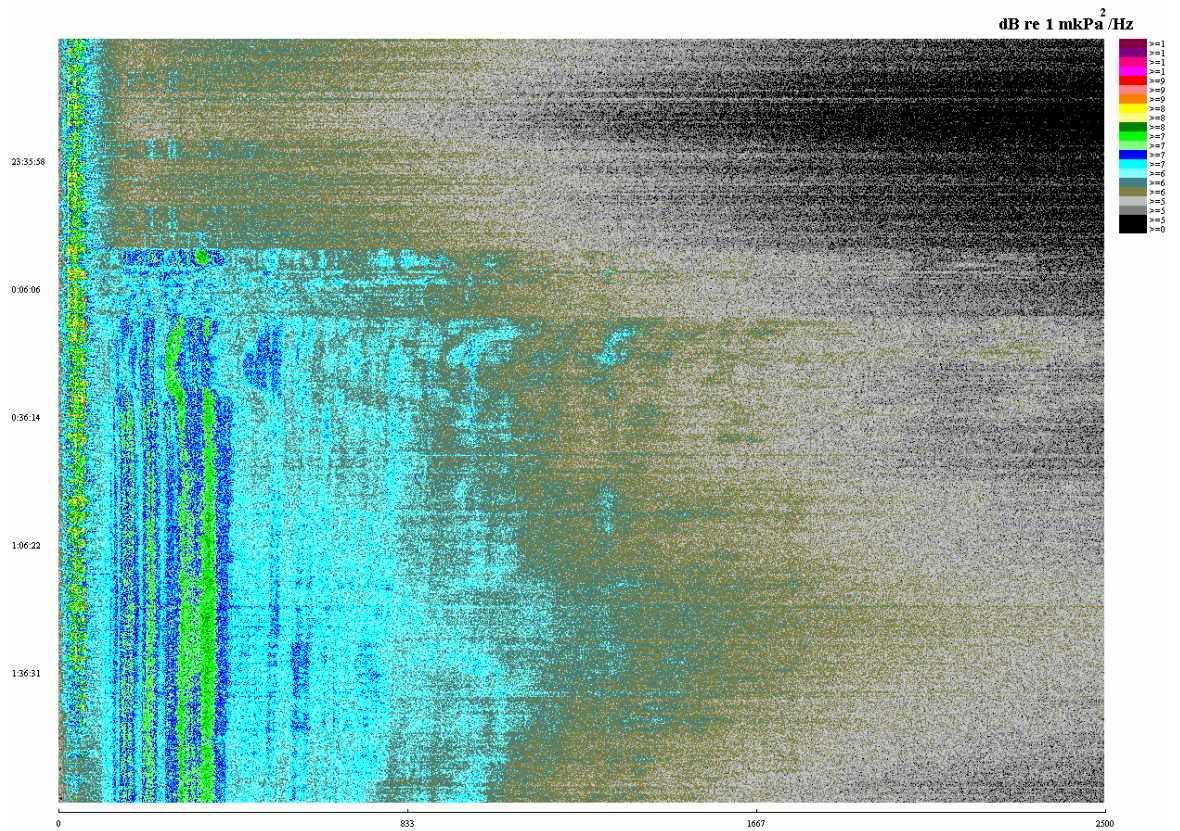


Рис. 3.5. Сонограммы акустических шумов, зарегистрированные в точке т.6 в ночь с 5 на 6 августа 2001 г.

4. Анализ акустических шумов, генерируемых платформой «Моликпак» и судном «Ирбис»

В данном разделе излагаются результаты спектрального анализа фоновых шумов, измеренных на акустической трассе простирающейся от платформы «Моликпак» до района кормления серых китов, расположенного у устья залива Пильтун. В разделе также приведены результаты измерений и анализа акустических шумов, генерируемых механизмами, работающими на платформе «Моликпак», судами технического обеспечения и аварийно спасательным судном «Ирбис».

4.1 Анализ шумов, создаваемых на континентальном шельфе о. Сахалин судном «Ирбис»

Утром 17 августа на судно «Ирбис» с Пильтунского маяка были доставлены пять радиогидроакустических буев (РГАБ) и приемно-регистрирующее оборудование. Первый РГАБ был установлен в точке В.4 (Рис. 1.1) в 14:20, а второй в точке В.3 в 15:00. В 15:14 судно «Ирбис» уже двигалось в точку В.2¹⁹. В 15:34 «Ирбис» встал на якорь в точке В.2, и в этой точке был установлен третий РГАБ. На рис. 4.1 показаны спектры акустических сигналов, синхронно зарегистрированных в точках В.4 и В.3, во время движения «Ирбиса» к точке В.2²⁰. На рис. 1.1 (незакрашенными звездочками) показано местоположение судна «Ирбис» в 15:14 и 15:31. Соответствующие этим моментам времени значения спектральной плотности $G(f)$ (в 15:14 и 15:31), представлены на рис. 4.1. График $G(f)$ для времени 15:38 (на рис. 4.1) характеризует акустические шумы, генерируемые судном «Ирбис» во время дрейфа с работающей машиной. Спектральные уровни шумов, генерируемых медленно движущимся, дрейфующим или стоящим на якоре судном с работающей машиной (рис. 4.1), подобны, но тональные компоненты менее выражены в спектре шумов судна, стоящего на якоре. В спектрах $G(f)$ преобладают шумы в диапазоне частот ниже 100 Гц. На РГАБ в точке В.4 был применен дисковый гидрофон (типа ПР-1), в то время как в точке В.3 использовался цилиндрический гидрофон (типа ПР-2); при калибровке обоих гидрофонов отклонений чувствительности в диапазоне 10-630 Гц обнаружено не было. Поэтому резкий подъем уровня низкочастотных шумов, зарегистрированный в точке В.3, обусловлен, вероятно, шумом обрушающихся на встречном течении у входа в залив Пильтун. Вследствие постепенного перемещения песчаной косы, карта на рис. 1.1 не точна, и в действительности в настоящее время точка В.3 расположена напротив входа в залив Пильтун. Высокий уровень низкочастотных шумов от поверхностного волнения может вызвать перегрузку предварительного усилителя РГАБ и

¹⁹ Судно «Ирбис» приводится в движение одним четырехлопастным винтом, вращающимся со скоростью приблизительно 400 об./мин.

²⁰ Все спектры и сонограммы, приведенные в Главе 4, были построены на основе данных, зарегистрированных с помощью гидрофонов, прошедших метрологическую поверку и затем взаимно откалиброванных. Поэтому на основании этих данных может проводиться оценка значений абсолютного давления.

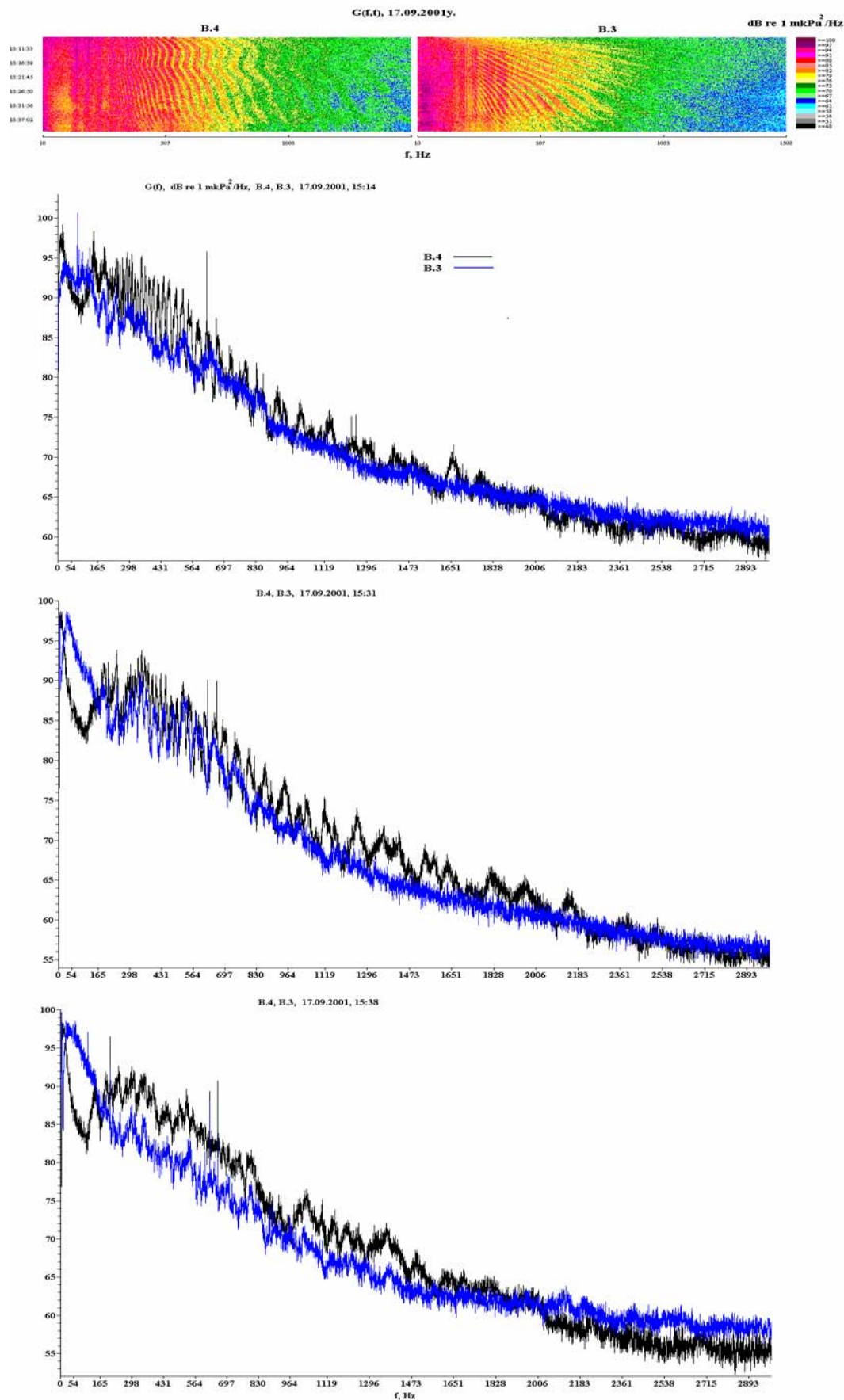


Рис. 4.1 - Сонограммы $G(f, t)$ и спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.3 и В.4, во время движения судна «Ирбис» в точку В.2.

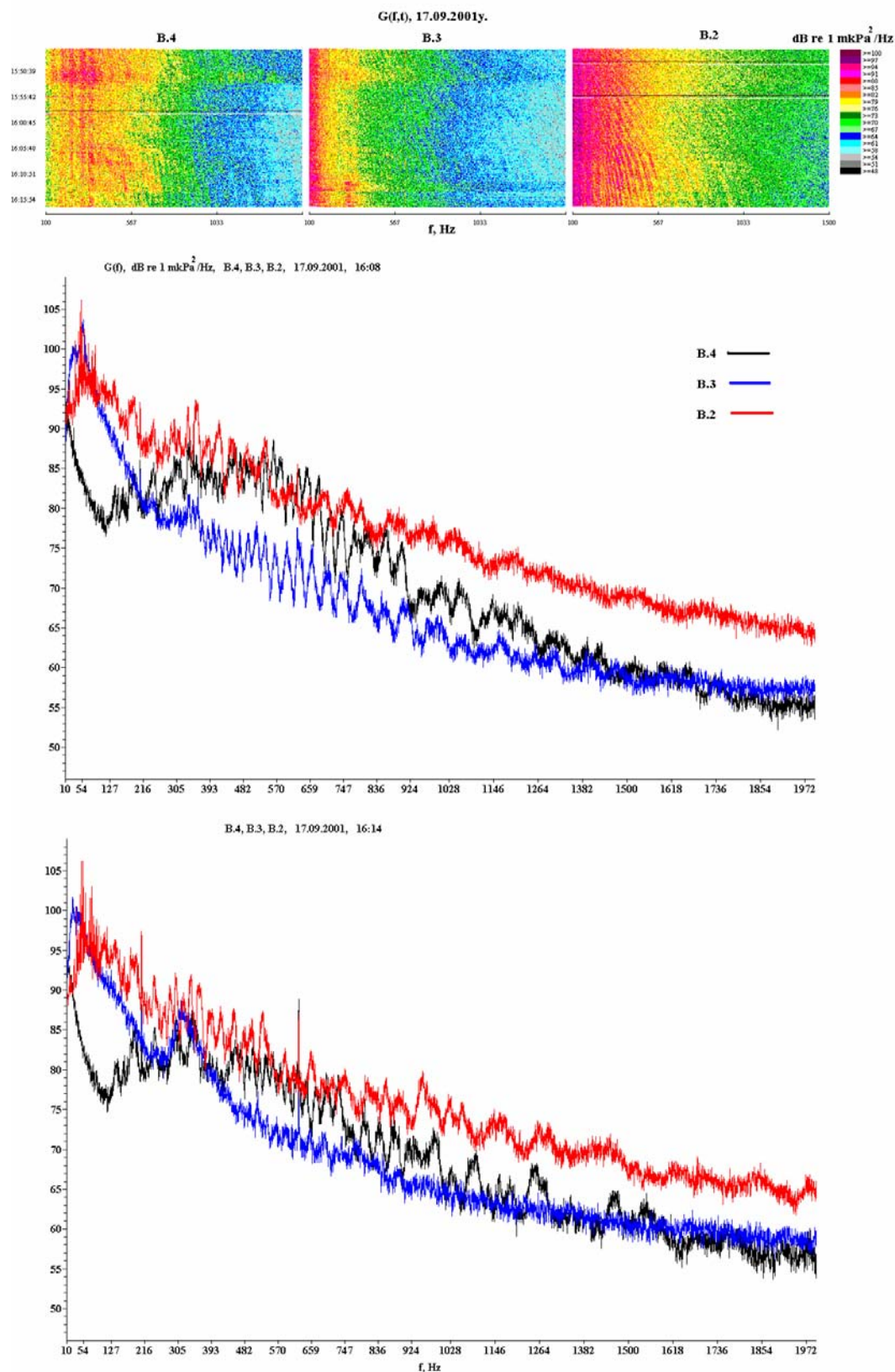


Рис. 4.2 - Сонограммы $G(f,t)$ и спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3 и В.2, во время движения судна «Ирбис» в точку В.1.

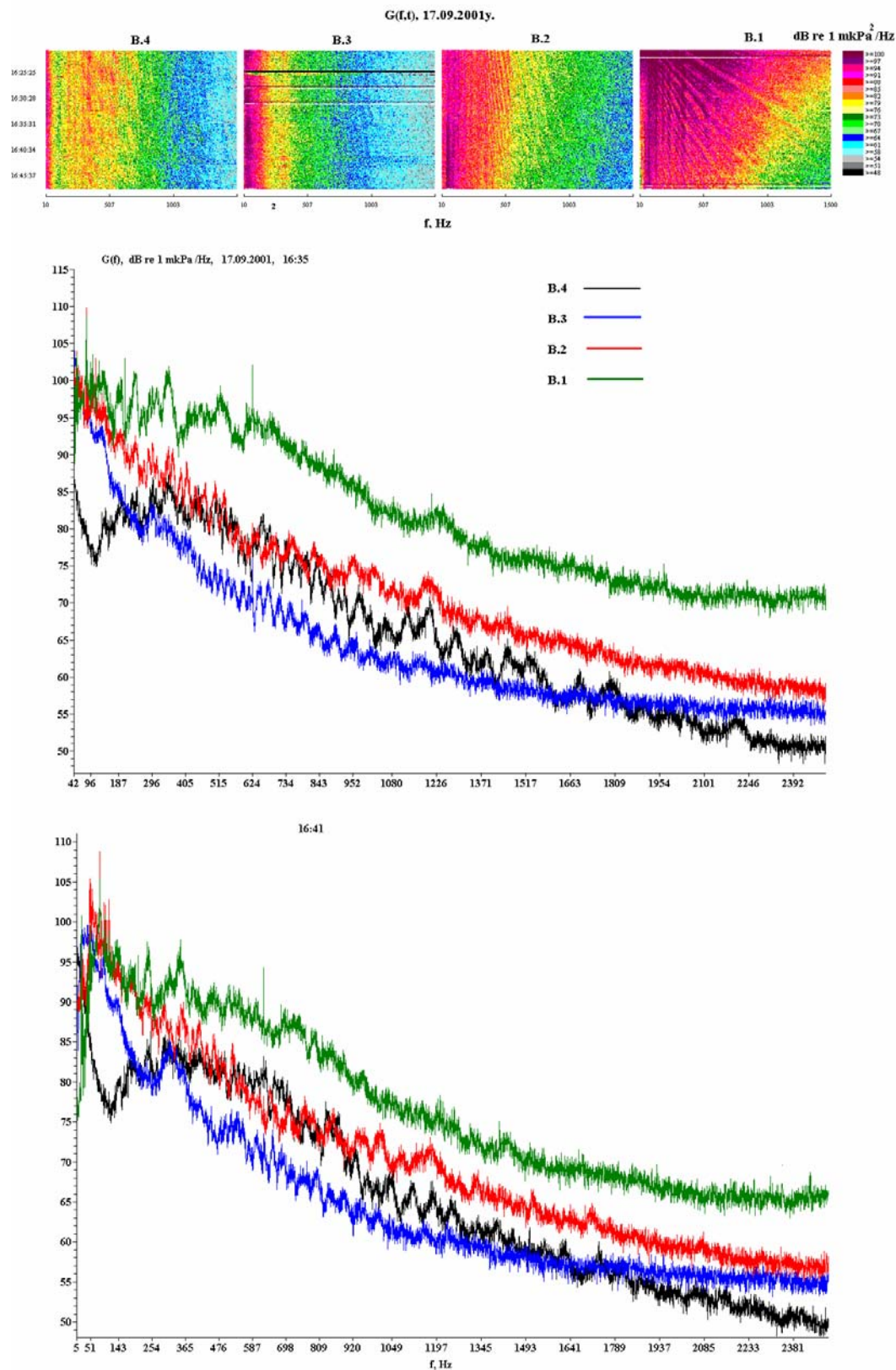


Рис. 4.3 - Сонограммы $G(f,t)$ и спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3, В.2 и В.1, во время движения судна «Ирбис» в точку В.5.

нелинейные искажения во всем диапазоне частот. Поэтому, в процессе количественных оценок спектров мы будем отдавать предпочтение данным, зарегистрированные в точке В.4.

На рис. 4.2 показаны сонограммы спектров иллюстрирующие пространственно-временную интерференцию акустического поля, создаваемого судном «Ирбис», при движении в точку В.1. Спектры $G(f)$ на рис. 4.2 соответствуют положению судна «Ирбис», показанному на рис. 1.1 (в 16:08). Спектры на рис. 4.3 получены на основе синхронных измерений в точках В.4, В.3, В.2, и В.1 в то время, когда «Ирбис» двигался в точку В.5. На этих спектрах представлена характерная акустическая сигнатура судна,двигающегося между платформой «Моликпак» и заливом Пильтун.

После установки РГАБ в точке В.5 было выяснено, что радиотелеметрические сигналы с этого буя могут устойчиво приниматься на Пильтунском маяке при помощи радиоприемников АХ-700 и направленной радиоприемной антенны. Поэтому было принято решение вернуть пятый радиоприемник на маяк. Для этого «Ирбис» подошел к устью залива Пильтун, а в 20:00 начал движение обратно к платформе «Моликпак». В 20:49 «Ирбис» находился на расстоянии 5 км от платформы, а в 21:10 встал на якорь вблизи нее в точке, показанной на рис. 1.1²¹. На рис. 4.4 и 4.5 показаны спектры акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.2, В.1, и В.5 за время с 19:40 до 22:25. Кроме «Ирбиса», в этот же период времени в районе платформы «Моликпак» проводило работы другое судно – «Нефтегаз-60» (спектр В.5 на рис. 4.4). В 21:33 от плавучего нефтехранилища «Оха» к платформе «Моликпак» двигался буксир «Смит Сахалин». На спектрах $G(f)$ (рис. 4.4) в 20:03 и 20:10 наблюдаются отчетливые тональные и узкополосные пики на частотах 690, 1060 и 1340 Гц; эти пики превышают средний фоновый шум более чем на 15 дБ в точке В.5.

На рис. 4.6 и 4.7 представлены результаты спектрального анализа акустических сигналов, синхронно зарегистрированных в точках В.1 - В.5 ночью 18 сентября 2001 г. Сонограммы $G(f,t)$ на рис. 4.6 иллюстрируют тот факт, что шумы, создаваемые судном, двигавшемся в районе платформы «Моликпак» с 02:35 до 03:10 были зарегистрированы во всех пяти точках (спектры $G(f)$ на рис. 4.6 для момента времени 02:36).

²¹ 52° 43' 00" с. ш.; 143° 30' 36" в. д.

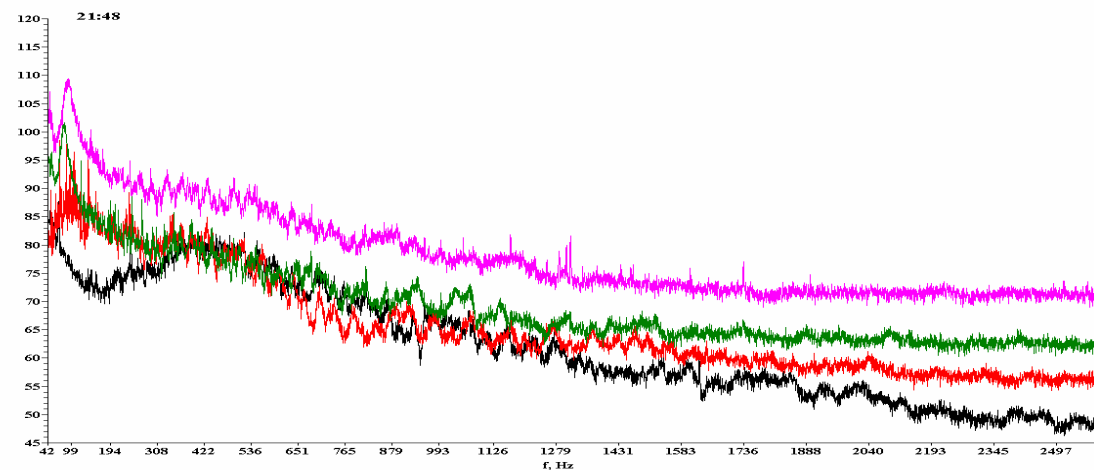
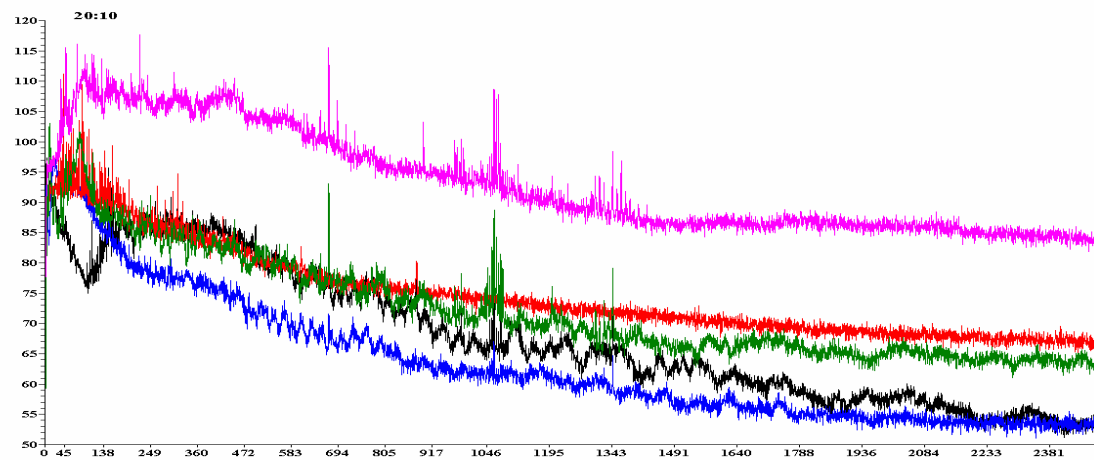
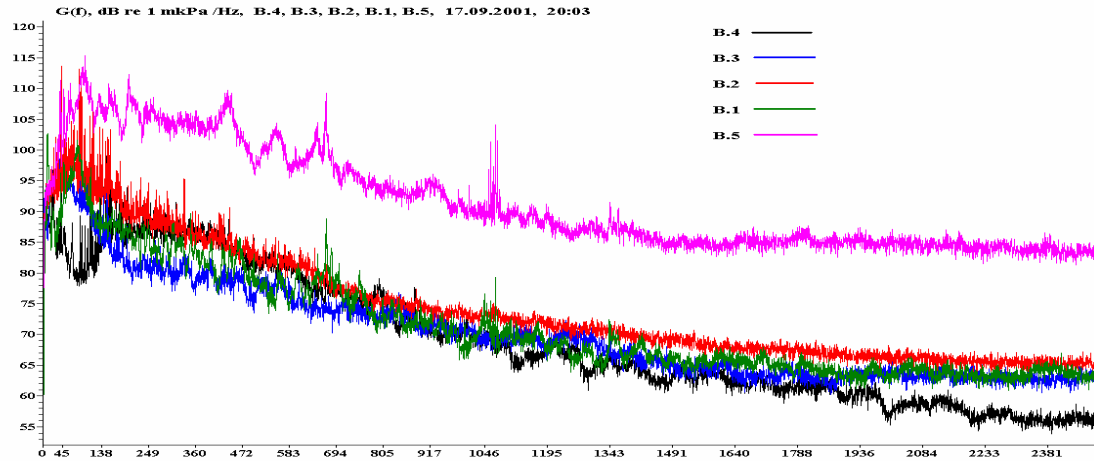
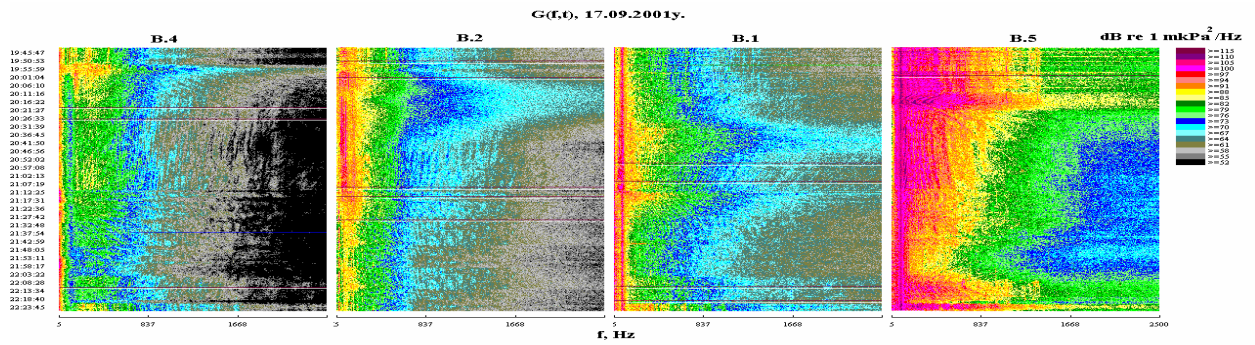


Рис. 4.4 - Сонограммы $G(f,t)$ и спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.2, В1 и В.5, во время движения судна «Ирбис» от берега к месту стоянки. Судно «Ирбис» встало на якорь в 21:10.

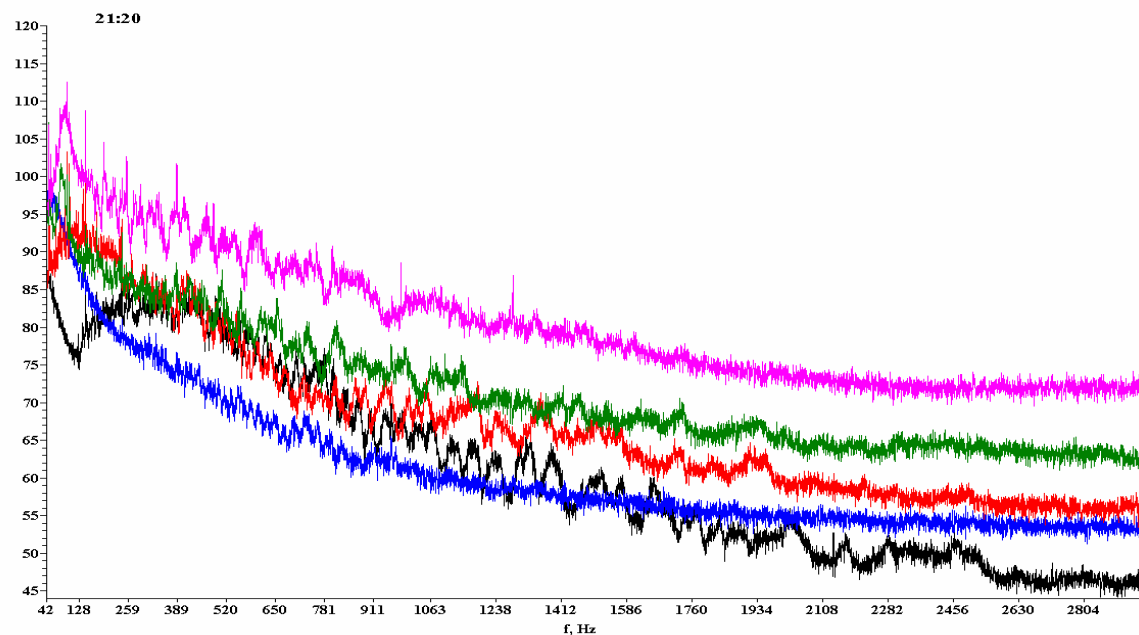
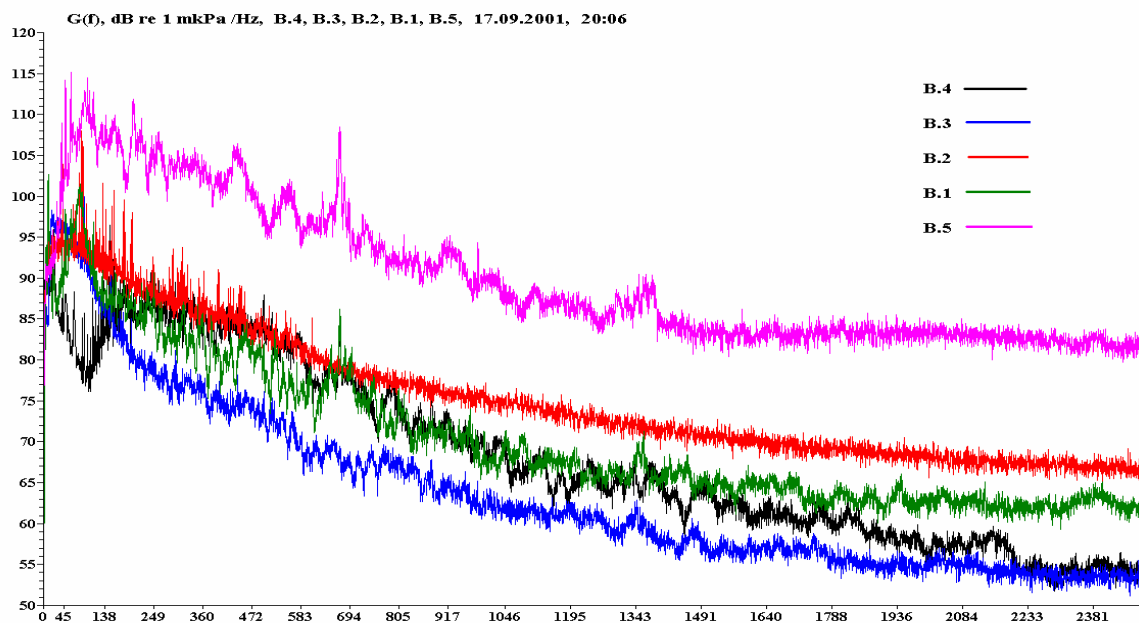
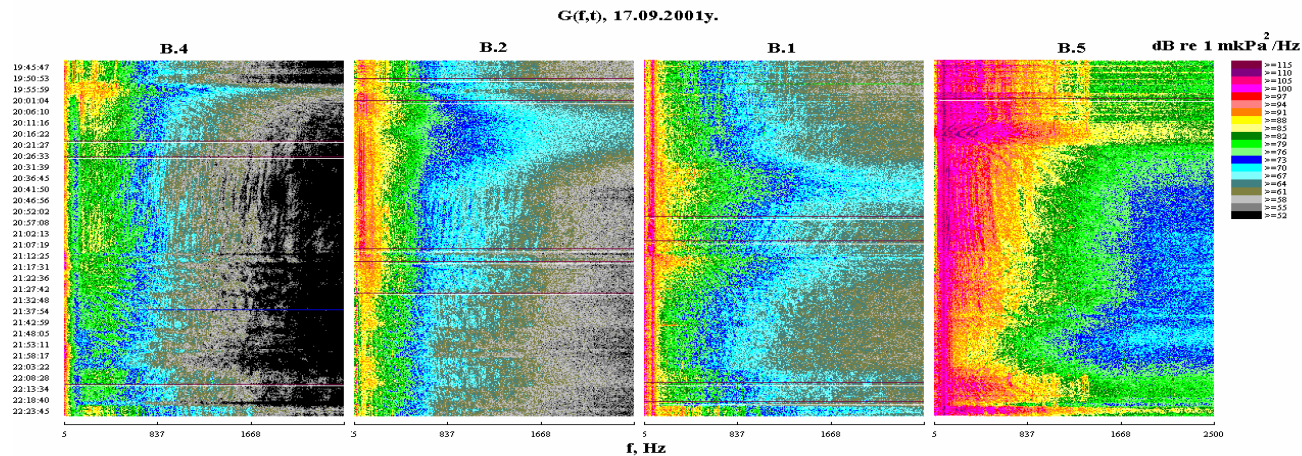


Рис. 4.5 - Сонограммы $G(f, t)$ и спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.2, В1 и В.5, во время движения судна «Ирбис» от берега к месту стоянки. Судно «Ирбис» встало на якорь в 21:10.

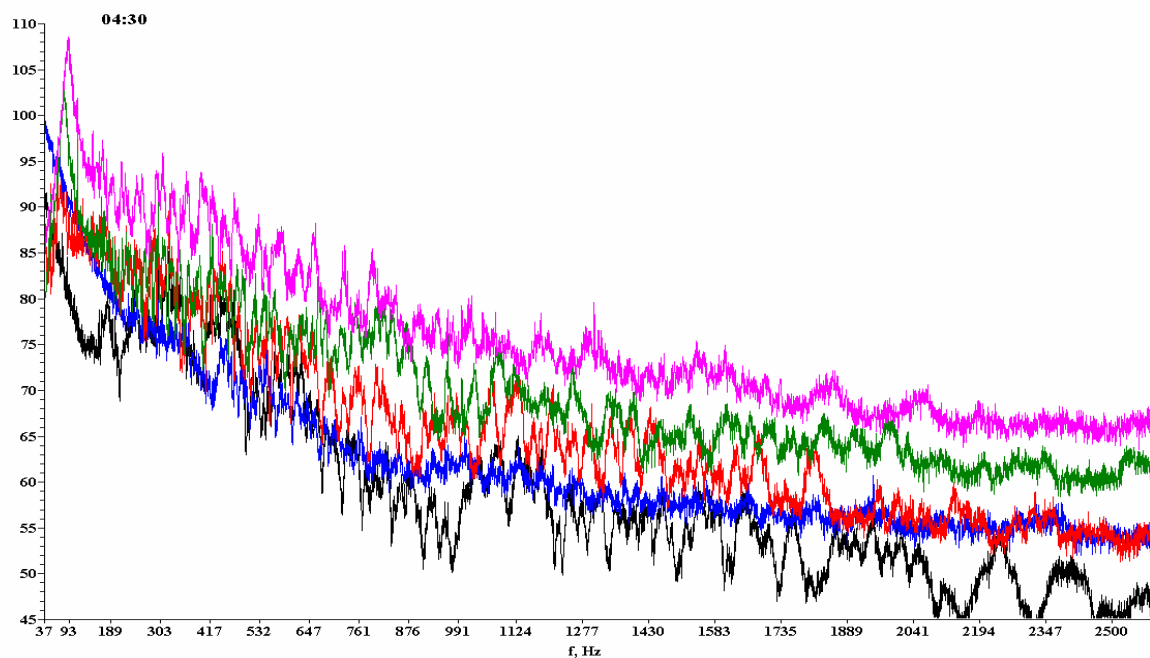
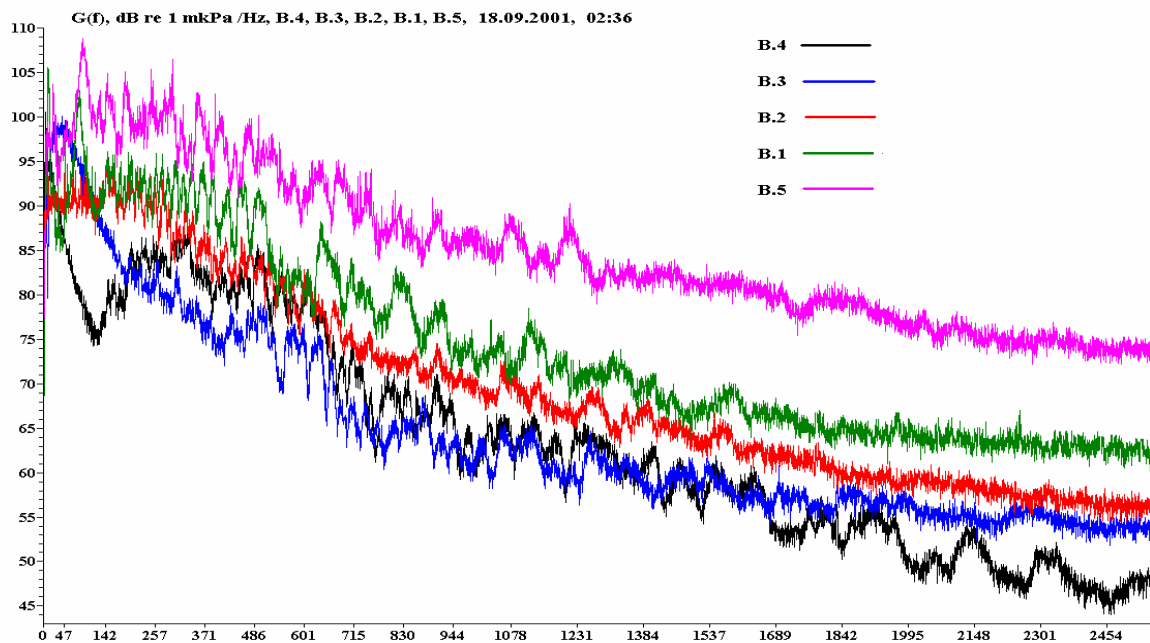
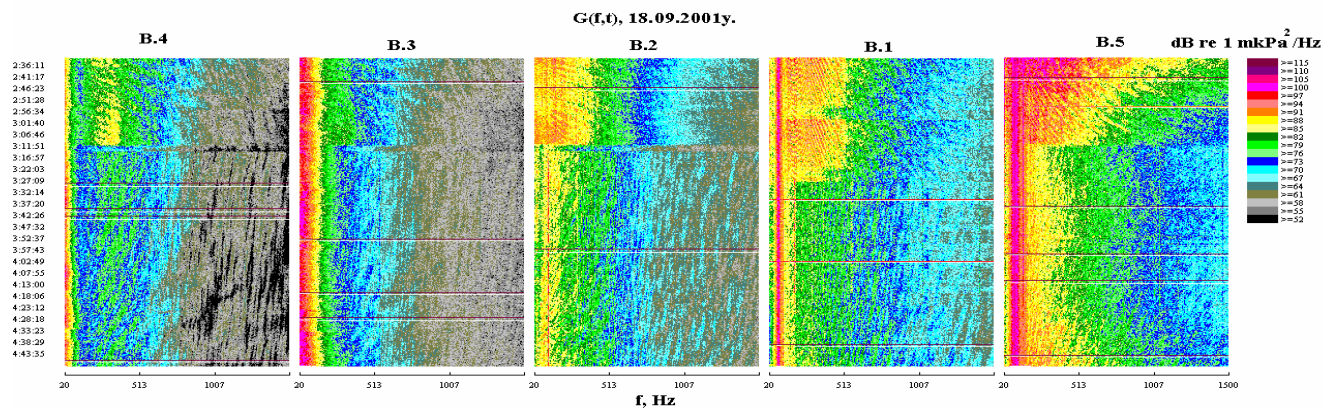


Рис. 4.6 - Сонограммы $G(f,t)$ и спектры $G(f)$ акустических фоновых шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3, В.2, В1 и В.5 ночью 18 сентября 2001 г.

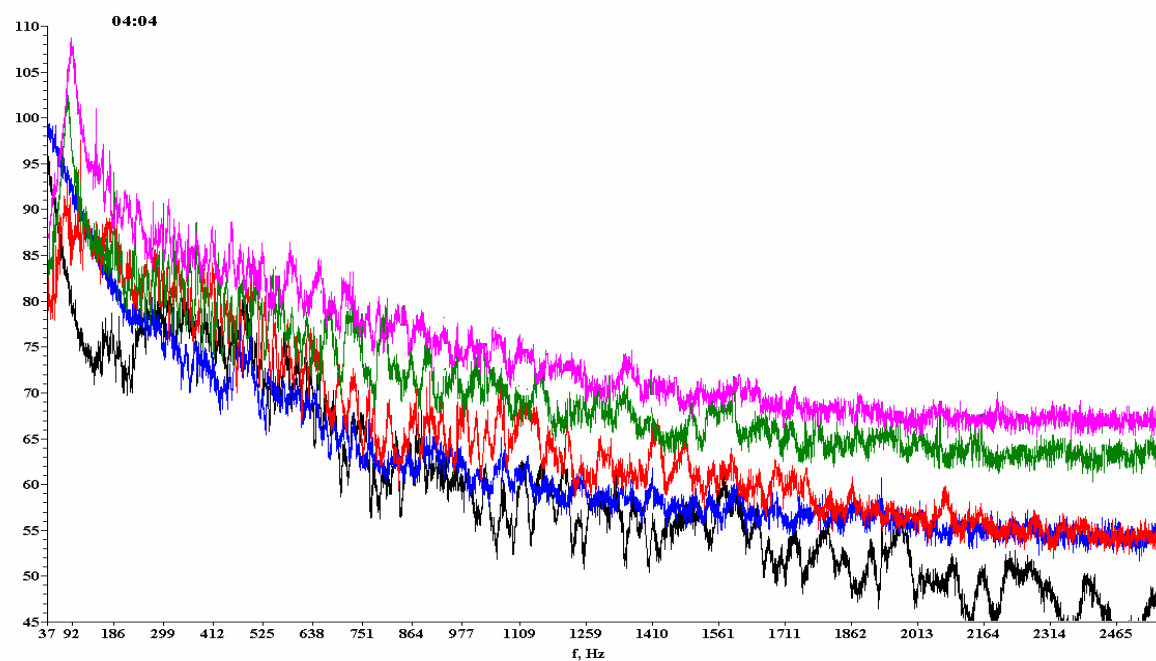
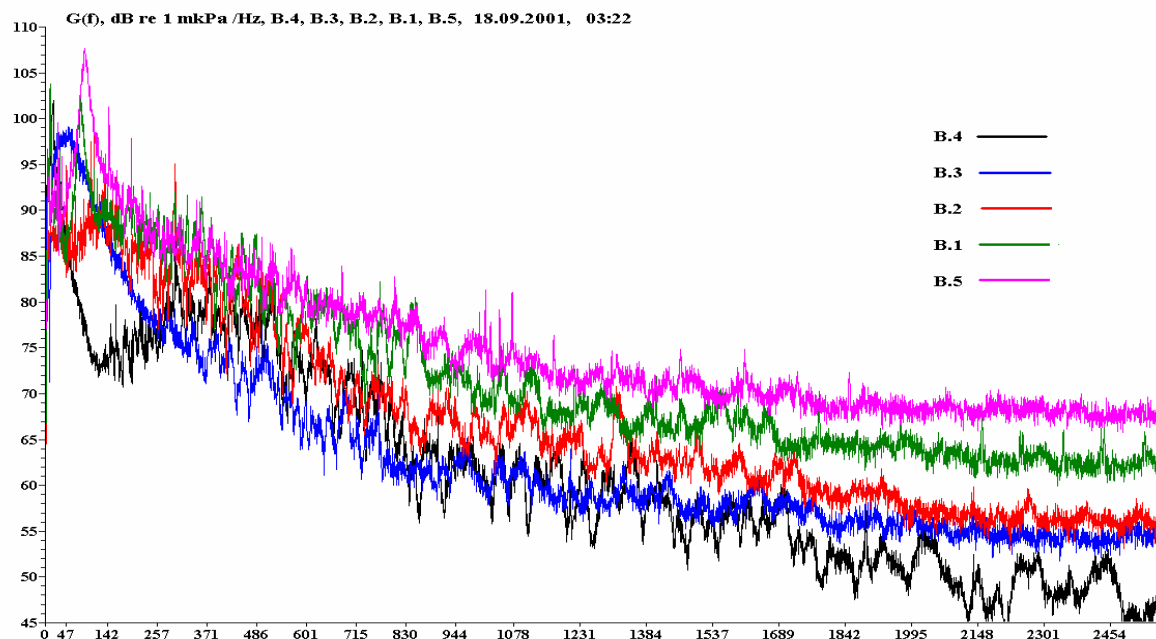
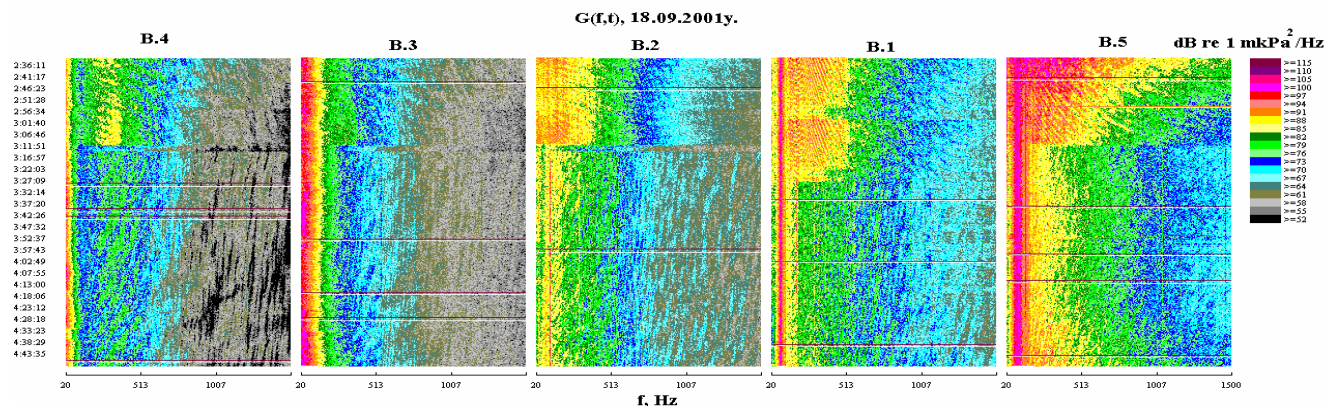


Рис. 4.7 - Сонограммы $G(f,t)$ и спектры $G(f)$ фоновых акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3, В.2, В.1 и В.5 ночью 18 сентября 2001 г.

Спектральные уровни шумов в диапазоне частот 150-1300 Гц были примерно на 20 дБ выше в точке В.5, чем в точке В.4. Спектры $G(f)$ в 04:30 (рис. 4.6) и в 04:04 (рис. 4.7) характеризуют акустический фон, который создавался платформой «Моликпак», плавучим нефтехранилищем «Оха» и стоящими на якорю вблизи них вспомогательными судами. На спектрах в точках В.5, В.1 и В.2 виден отчетливый пик на частоте ~80 Гц, который был вызван внутренними электромагнитными наводками в электронных блоках радиоприемника АХ-700²².

4.2. Акустические характеристики оборудования, работающего на платформе «Моликпак»

Утром 18 сентября вспомогательное судно «Смит Сахалин» доставило на платформу «Моликпак» двух исследователей с судна «Ирбис». Их основной задачей было измерение акустических сигналов, создаваемых оборудованием работающим на платформе, и сбор данных о графиках и параметрах работы механизмов, которые могут являться потенциальными источниками шума. Измерения проводились с помощью устройств, которые применялись для записи акустических сигналов на «Гриф» [Борисов и др., 2002 г.]: двухканальный цифровой магнитофон, два гидрофона, три масштабных усилителя. Поскольку коэффициент передачи звука от оборудования в окружающую среду не известен, эти измерения не могут использоваться для определения уровня громкости источника звука, создаваемого на платформе «Моликпак». Таким образом, спектры акустических шумов, записанные на платформе «Моликпак» и представленные на диаграммах, не нормированы и не откорректированы на низких частотах. Эти данные используются только для анализа спектрального состава шумов, источником которых являлось оборудование на платформе «Моликпак».

Первые акустические измерения были проведены в балластном отсеке, расположенном вблизи от корпуса платформы «Моликпак», на глубине приблизительно 15 м ниже уровня моря. Платформа «Моликпак» оборудована 4-мя подобными отсеками; в двух из них имеется по четыре насоса, в двух других – по два. Все 12 насосов одной модели (мощность 170 кВт) с номинальной скоростью вращения 1770 оборотов в минуту, что соответствует частоте 29,5 Гц. В процессе проведения измерений с 09:28 до 09:38 один гидрофон был опущен в воду на дно балластного отсека, в то время как другой находился в «луже» на палубе над несущей балкой.

²² Внутренние наводки является техническим недостатком, присущим данному типу радиоприемников, который нельзя устранить. Для сохранения динамического диапазона при измерении сигналов с высоким уровнем низкочастотных составляющих, в предварительных усилителях гидрофонов был уменьшен коэффициент усиления для низких частот. Спад АЧХ сквозного тракта на низких частотах компенсируется с помощью частотного корректора [Борисов и др., 2002 г.], применение которого, однако, увеличивает коэффициент усиления при низких частотах как для акустического сигнала, так и для электрических шумов в электронных узлах.

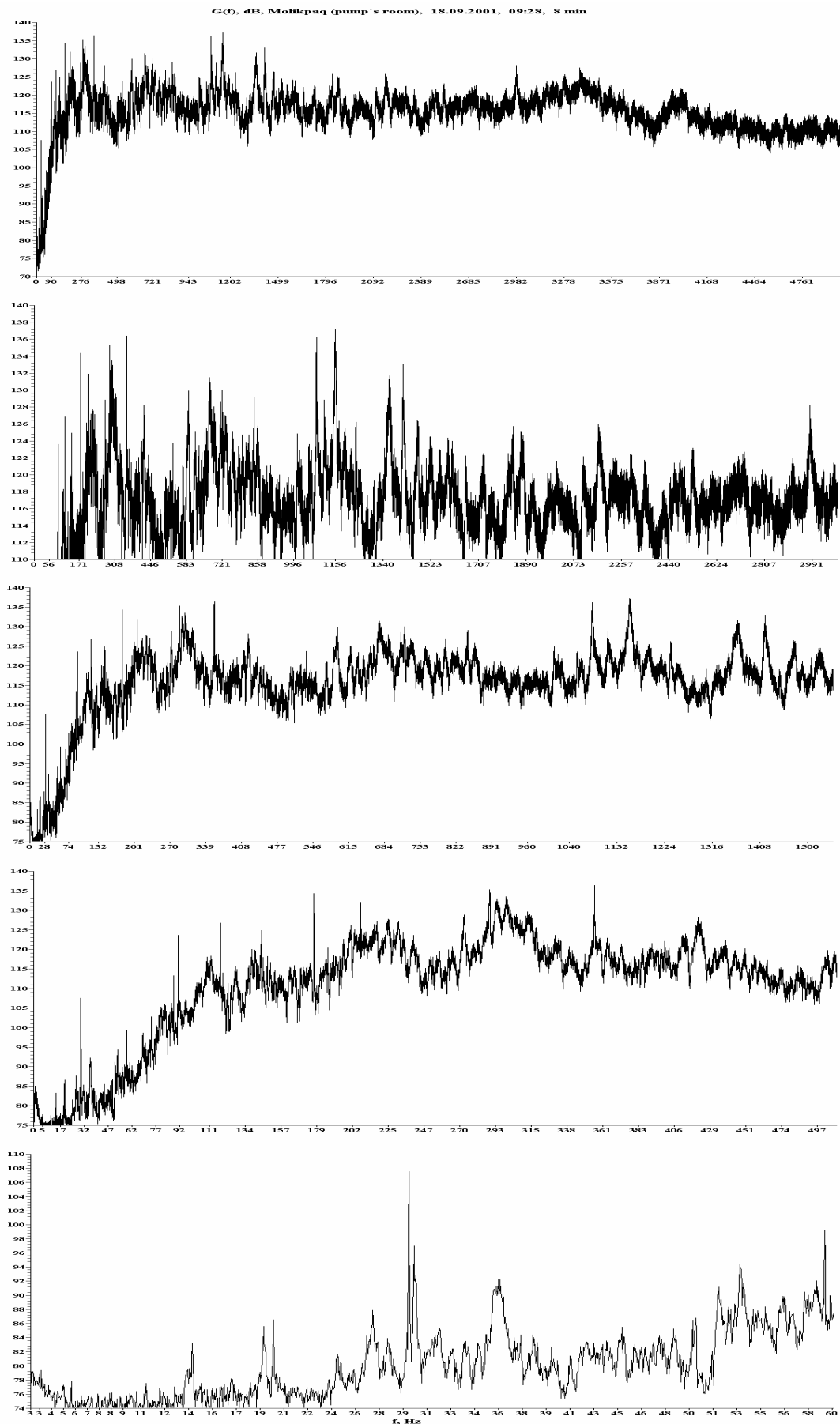


Рис. 4.8 – относительные спектры $G(f)$ акустических шумов, зарегистрированных в балластном отсеке платформы «Моликпак» в 09:30, 18 сентября 2001 г.

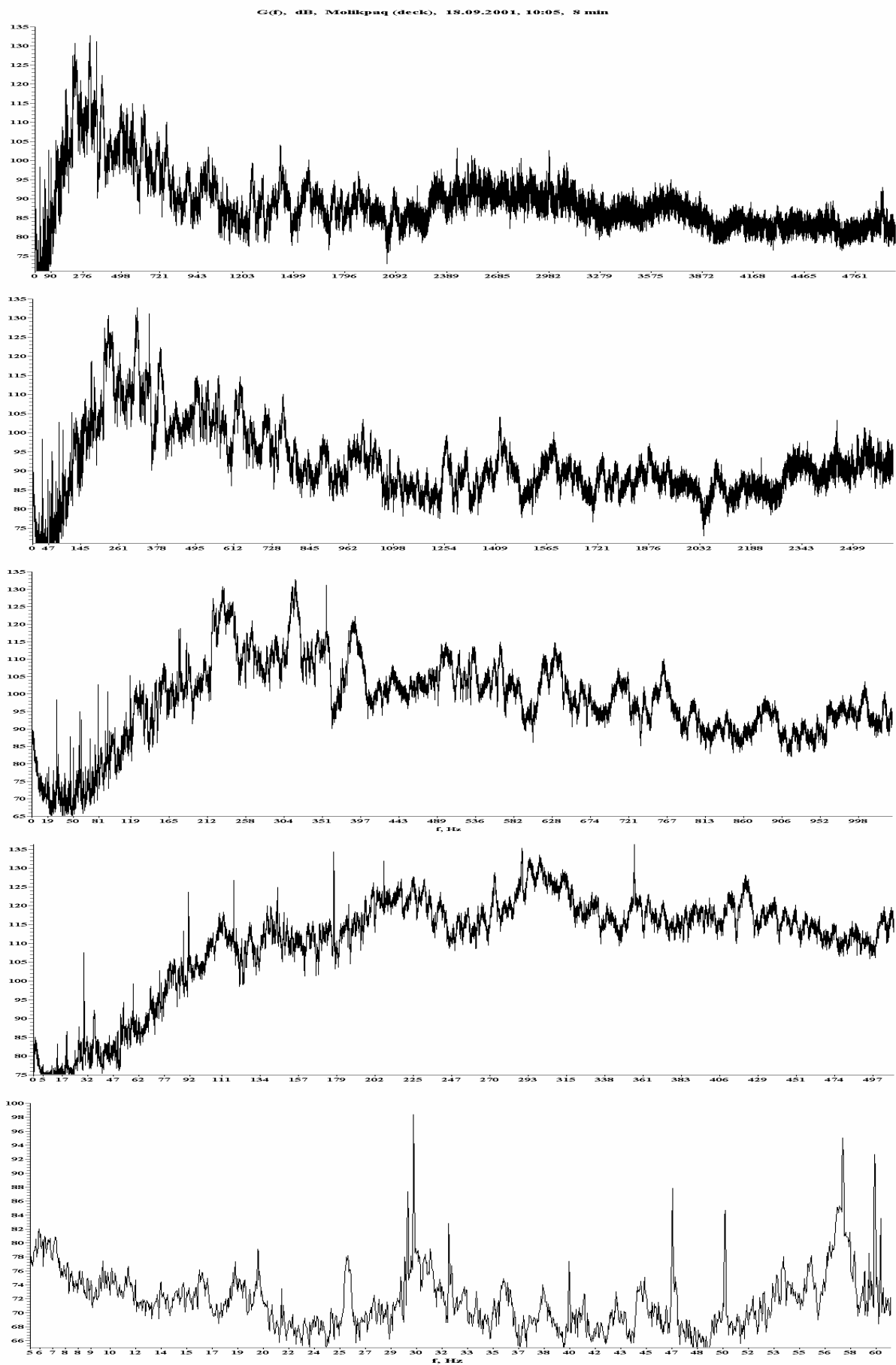


Рис. 4.9 – Относительные спектры $G(f)$ акустических шумов, зарегистрированных на палубе над балластным отсеком платформы «Моликпак» в 10:00, 18 сентября 2001 г.

На рис. 4.8 показаны спектры $G(f)^{23}$, соответствующие измерениям акустических шумов, проведенных с помощью гидрофона опущенного в воду в балластном отсеке. В спектре отчетливо видны узкополосные компоненты; тональные сигналы имеют частоту приблизительно 14, 20, 30, 59, 93, 128, 175, 205, и 360 Гц. Имеются также узкополосные сигналы с более высокими частотами (1100, 1200, 1360, 1400 и 3000 Гц). Спектральные уровни этих тональных составляющих на 25 дБ выше, чем уровень широкополосного шума, особенно на низких частотах²⁴.

На рис. 4.9 приведены результаты спектрального анализа акустических сигналов, зарегистрированных гидрофоном, который находился в «луже» на главной палубе платформы «Моликпак» над балластными отсеками примерно на уровне моря. В спектре шумов, изображенном на рис. 4.9, также, как и на рис. 4.8 отчетливо выделяются тональные компоненты.

Другим потенциальным источником шума на платформе «Моликпак» является нагнетательный насос. Данный насос включает турбину и компрессор, соединенные через редуктор, и применяется для закачки газа в скважину. Скорость вращения (об./мин.) и амплитуда колебания вала регистрируются с помощью специальных датчиков. В 10:30 работало два нагнетательных насоса со следующими характеристиками:

- Турбина № 1 - 10560 об./мин. (176 Гц)
- Компрессор № 1 - 9630 об./мин. (160,5 Гц)
- Турбина № 2 - 10290 об./мин. (171,5 Гц)
- Компрессор № 2 - 9600 об./мин. (160 Гц)

Амплитуды колебаний вала составляли:

- Турбина № 1 - 33 мкм;
- Компрессор № 1 - 20 мкм;
- Редуктор № 1 - 26 мкм;

²³ В целях увеличения разрешения по частоте (<0,1 Гц). эти спектры (рис. 4.8 и 4.9) были рассчитаны по приблизительно 10-секундным реализациям. Эти 10-секундные реализации спектров были усреднены на временном интервале 10 минут.

²⁴ Обратите внимание на то, что поскольку спектральные уровни на графиках не являются абсолютными, числовые значения уровней спектральных составляющих – условны и не могут сравниваться с откалиброванными абсолютными спектральными значениями.

- Турбина 2 - 31 мкм;
- Компрессор № 2 - 19 мкм;
- Редуктор № 2 - 20 мкм.

Скорость вращения в 10:57 не изменилась. Амплитуды колебания валов составили:

- Турбина № 1 - 32 мкм;
- Компрессор № 1 - 20 мкм;
- Редуктор № 1 - 27 мкм;
- Турбина 2 - 30 мкм;
- Компрессор № 2 - 20 мкм;
- Редуктор № 2 - 20 мкм.

Спектры, представленные на рис. 4.8 и 4.9, говорят о том, что оборудование работающее на платформе «Моликпак» является источником акустического шума, и этот шум может передаваться в морскую среду через металлический корпус платформы.

В следующей главе мы приведем описание эксперимента, проведенного для того, чтобы определить происходит ли переизлучение шумов с платформы «Моликпак» в воду, с помощью их идентификации среди акустических сигналов, синхронно измеренных на разном удалении от платформы «Моликпак».

5 Анализ техногенного акустического поля, формируемого комплексом «Моликпак»

В данном разделе приводятся спектральные, пространственные и временные характеристики акустического поля измеренного на трассе простирающейся от платформы «Моликпак» до района кормления серых китов расположенном у входа в залив Пильтун.

5.1 Характеристики акустического поля между платформой «Моликпак» и заливом Пильтун

Сонограммы $G(f,t)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.5, В.1, В.2, В.3, и В.4, будут представлены в ходе анализа спектральных, пространственных и временных характеристик акустического поля на трассе «Моликпак-Пильтун». Эти сонограммы описывают временную изменчивость (в течение более 12 часов) акустического поля на этой трассе. Для различных точек трассы и разного времени регистрации будут представлены количественные оценки амплитудных и частотных характеристик сигналов, основанные на абсолютных спектрах $G(f)$.

На Рисунке 5.1 показаны сонограммы акустических шумов, синхронно измеренных во всех 5 точках днем 18 сентября 2001 г. На этом рисунке видно, что акустические шумы, генерируемые как движущимся судном, так и судном, стоящим на якоре возле платформы «Моликпак», достигают мелководного участка шельфа, распространяются в нем и явно присутствуют в акустических сигналах, зарегистрированных в точках В.3 и В.4²⁵. Эти измерения проводились при следующих погодных условиях:

- 08:00 - штиль, зыбь с высотой волны ~ 1 м;
- 10:46 - штиль, зыбь с высотой волны ~1 м. Два судна находились между платформой «Моликпак» и плавучим нефтехранилищем «Оха», еще два судна находились к северу от платформы

«Моликпак»;

- 15:20 - Некоторые волны обрушаются (с белыми гребнями);

Спектры $G(f)$ представленные на Рис. 5.2²⁶ соответствуют тому же самому временному интервалу, когда проводилась регистрация акустических шумов в балластном отсеке платформы «Моликпак» (Рис. 4.8). К сожалению, в это же самое время возле платформы находилось маневрирующее судно, поэтому, возможно, что тональные компоненты с частотами меньше 100 Гц, наблюдаемые в спектрах (в точках В.5, В.1, и В.2), а также узкополосные шумы (в диапазоне 100-140 Гц) были произведены этим судном.

²⁵ Следует отметить, что высокие уровни шумов на низких частотах, зарегистрированные в точке В.3 и до некоторой степени в точке В.4, вызваны шумом обтекания (псевдошумом) и поэтому не являются антропогенным акустическим сигналом.

²⁶ Спектры, представленные на Рис. 5.2, получены с высоким разрешением. С целью увеличения разрешающей способности по частоте ($< 0,1$ Гц) эти спектры были рассчитаны по рядам данных длиной примерно 15 секунд. Поэтому оценка спектра (приведенная к полосе 1 Гц) не является абсолютной [дБ на 1 мкПа²/Гц] для тональных акустических сигналов. Затем эти 15 секундные оценки спектров были усреднены за 16 минут.

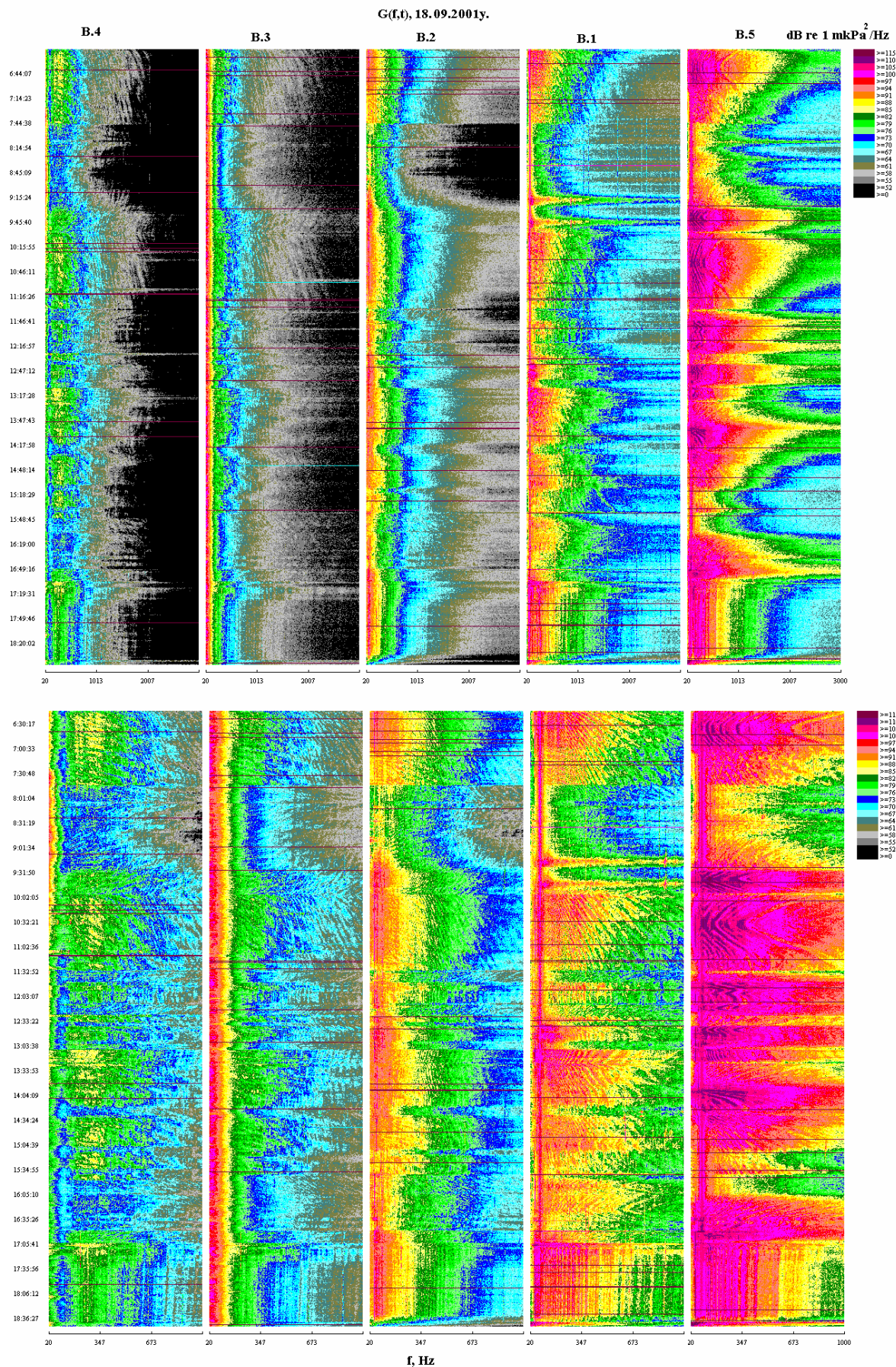


Рис. 5.1 - Сонограммы $G(f,t)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3, В.2, В.1 и В.5 днем 18 сентября 2001 г.

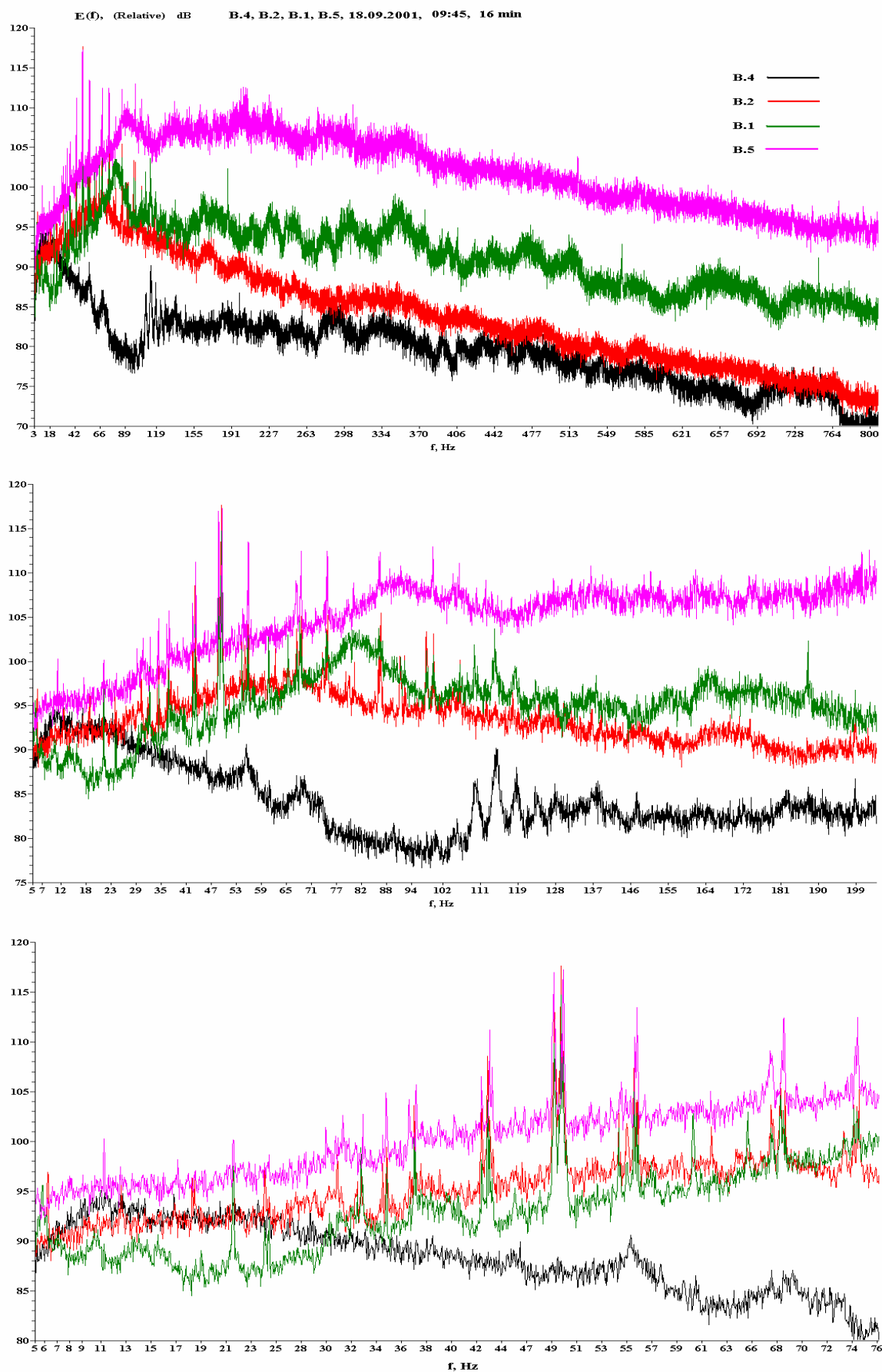


Рис. 5.2 - Относительные спектры $E(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3, В.2, В.1 и В.5 при одновременной регистрации сигнала на пл. «Моликпак».

В низкочастотной части спектра, представленном на Рис. 5.2, имеются тональные сигналы с частотами 12, 22, и 24 Гц, однако сигнал с частотой примерно 30 Гц, зарегистрированный на платформе «Моликпак» (Рис. 4.8), отсутствует. Неизвестен источник самого мощного сигнала с частотой 50 Гц. Однако, поскольку данный сигнал имеет два пика, возможно, что он мог быть вызван работой дизель-генераторов, работающих на разных вспомогательных судах. Точное место нахождения этих судов не известно.

Спектры, представленные на Рис. 5.3, количественно характеризуют изменения акустических фоновых шумов вдоль трассы (от В.5 до В.4). Спектры $G(f)$, сигналов, зарегистрированных в 08:28 и 08:43, соответствуют времени, когда около платформы «Моликпак» не наблюдалось движение судов и уровень шумов был относительно низким. Высокие уровни, зарегистрированные в диапазоне низких частот в точке В.4 между 07:30 и 10:30 (Рис. 5.1), не подтверждаются данными, полученными другими буями, и скорее всего вызваны шумами обтекания. Спектр $G(f)$, сигналов, зарегистрированных в 10:37, соответствует времени, когда наблюдалось движение судна «Смит Сахалин» от платформы «Моликпак» по направлению к плавучему нефтехранилищу «Оха». Периодически во всех точках вдоль трассы наблюдались многочастотные акустические сигналы в диапазоне частот от 500-1300 Гц (Рис. 5.4). Иногда длительность этих сложных сигналов превышала 10 минут. Спектральные уровни этих тональных компонентов превышали уровни широкополосных шумов более чем на 10 дБ. Интересно, что некоторые тональные составляющие, ясно различимые в спектрах, зарегистрированных в точках В.5, В.1, и В.2, не выражены в синхронном спектре В.4, и наоборот. Возможно, это свидетельствует о том, что шум, распространяющийся из зоны производственной деятельности (платформы «Моликпак»), затухает прежде, чем он достигает района кормления серых китов (возле устья залива Пильтун), а некоторые шумы, зарегистрированные в прибрежной зоне, вызваны источниками не связанными с платформой «Моликпак»

(например, Пильтунский маяк).

На Рис. 5.5 показаны сонограммы $G(f,t)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3, В.2, В.1, и В.5 ночью 19 сентября 2001 г. Эти сонограммы показывают, что источники шумов были стационарными, и в основном связаны с судами, стоявшими на якоре возле платформы «Моликпак», включая «Ирбис».

21 сентября сильный северный ветер (15-20 м/сек) и сильное волнение на море (5-6 баллов по шкале Бофорта) вынудили «Ирбис» поднять якорь и начать штормовое маневрирование. В 13:00 «Ирбис» начал движение в точку с координатами 52°54.27' с. ш. 143°31.06' в. д. В 15:37 «Ирбис» прибыл в указанную точку и лег на курс 183°. В 16:09 «Ирбис» шел со скоростью 7,4 узлов (при этом приводной вал основного двигателя вращался со скоростью 450 об/мин).

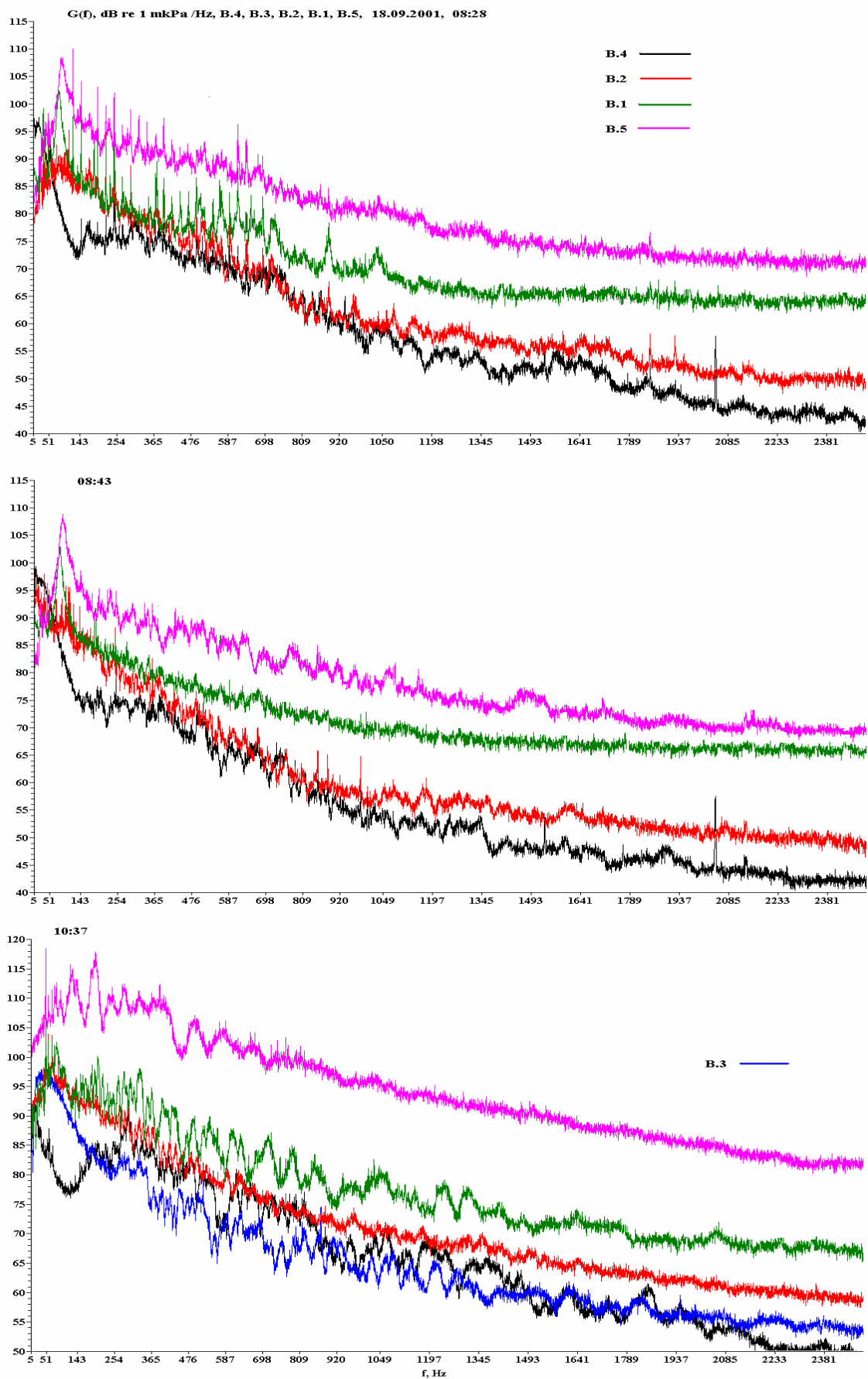


Рис. 5.3 - Спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3, В.2, В.1 и В.5 18 сентября 2001 г.

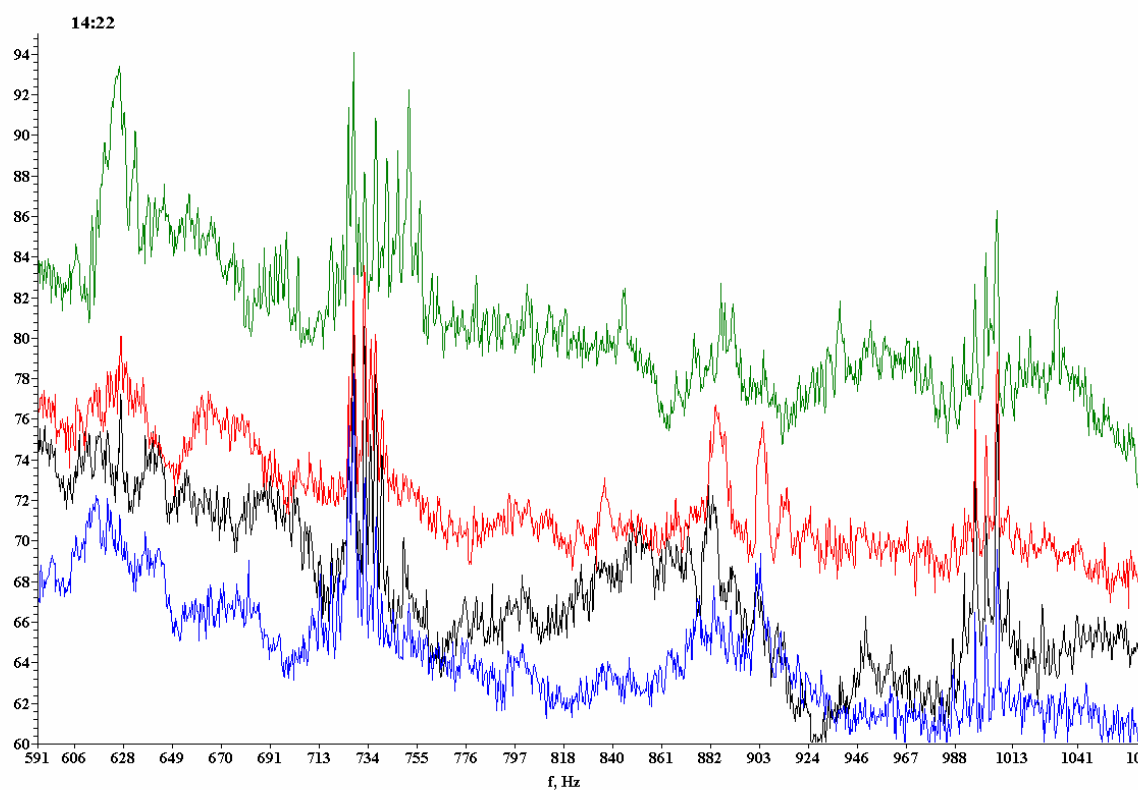
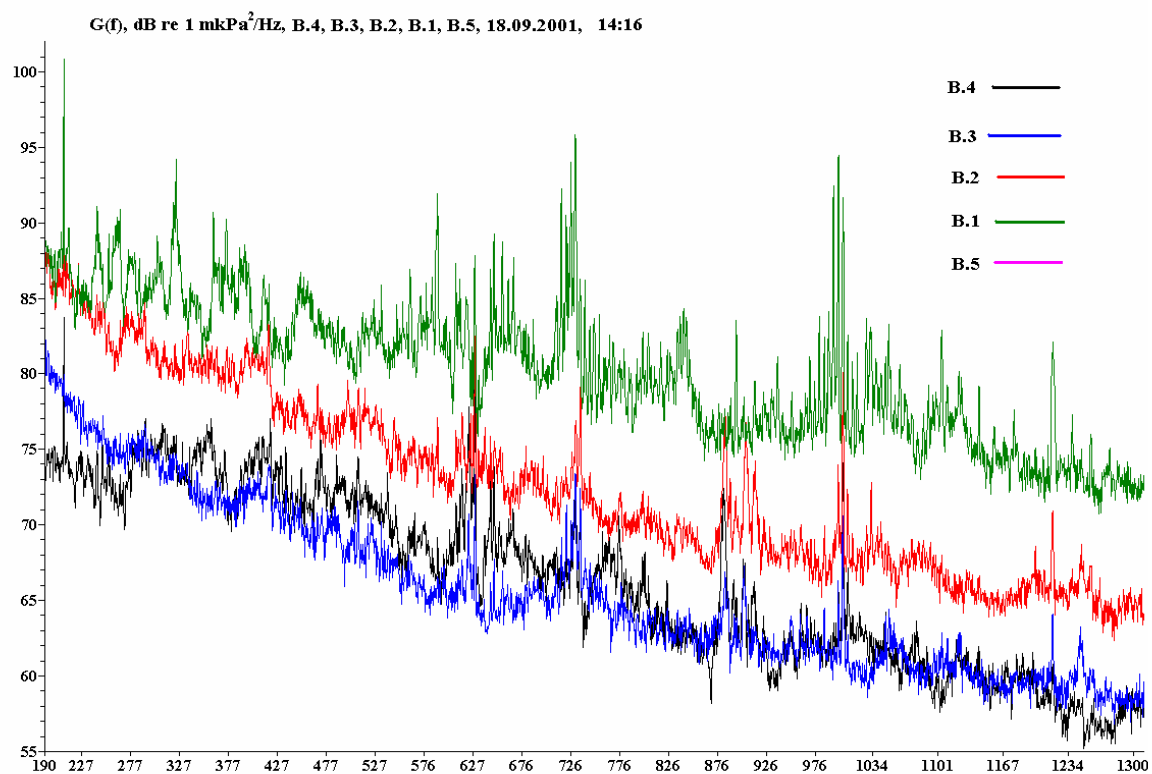


Рис. 5.4 - Спектры $G(f)$ тональных акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3, В.2, В.1 и В.5 18 сентября 2001 г.

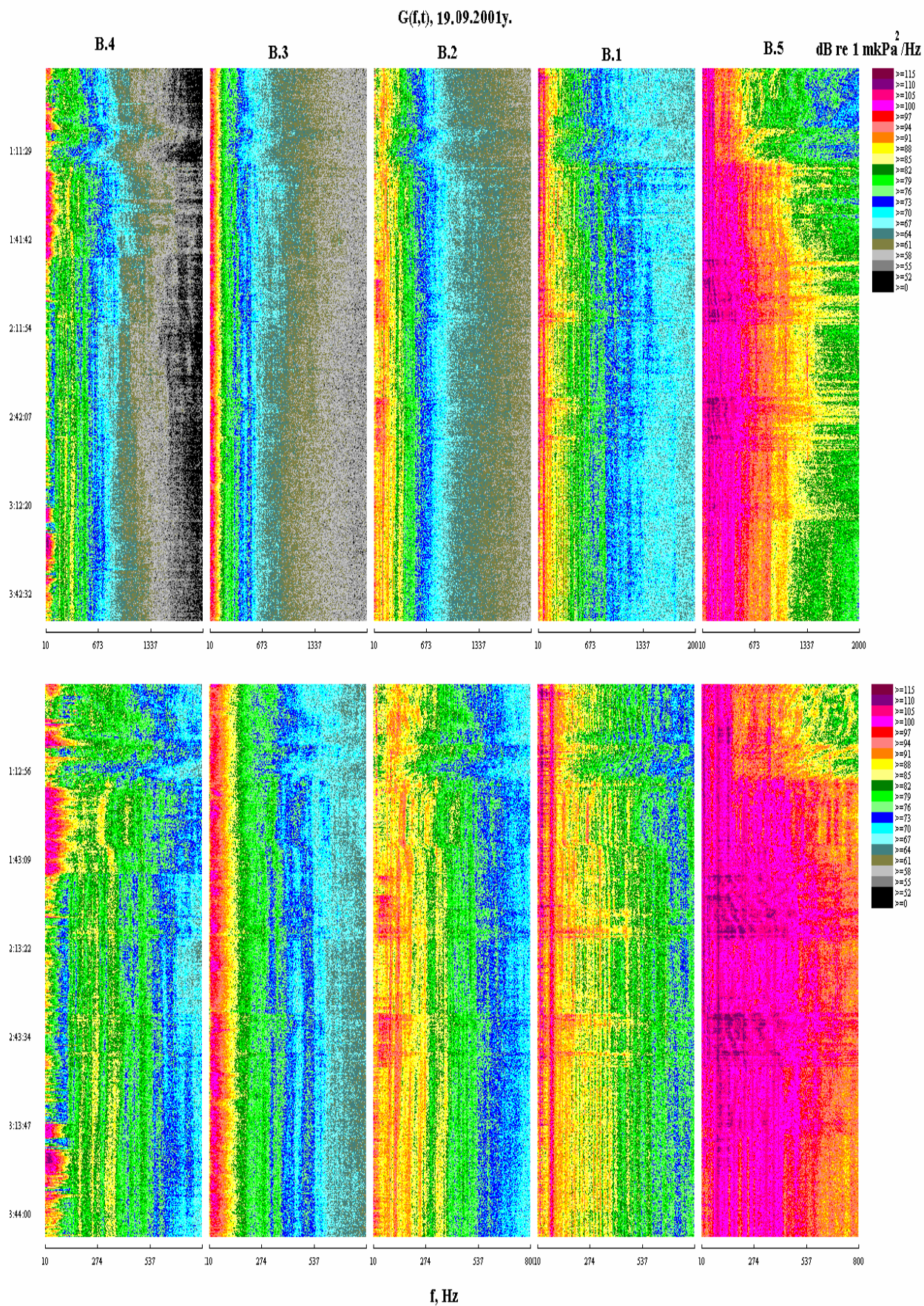


Рис. 5.5 - Сонограммы $G(f,t)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.4, В.3, В.2, В.1 и В.5 ночью 19 сентября 2001 г.

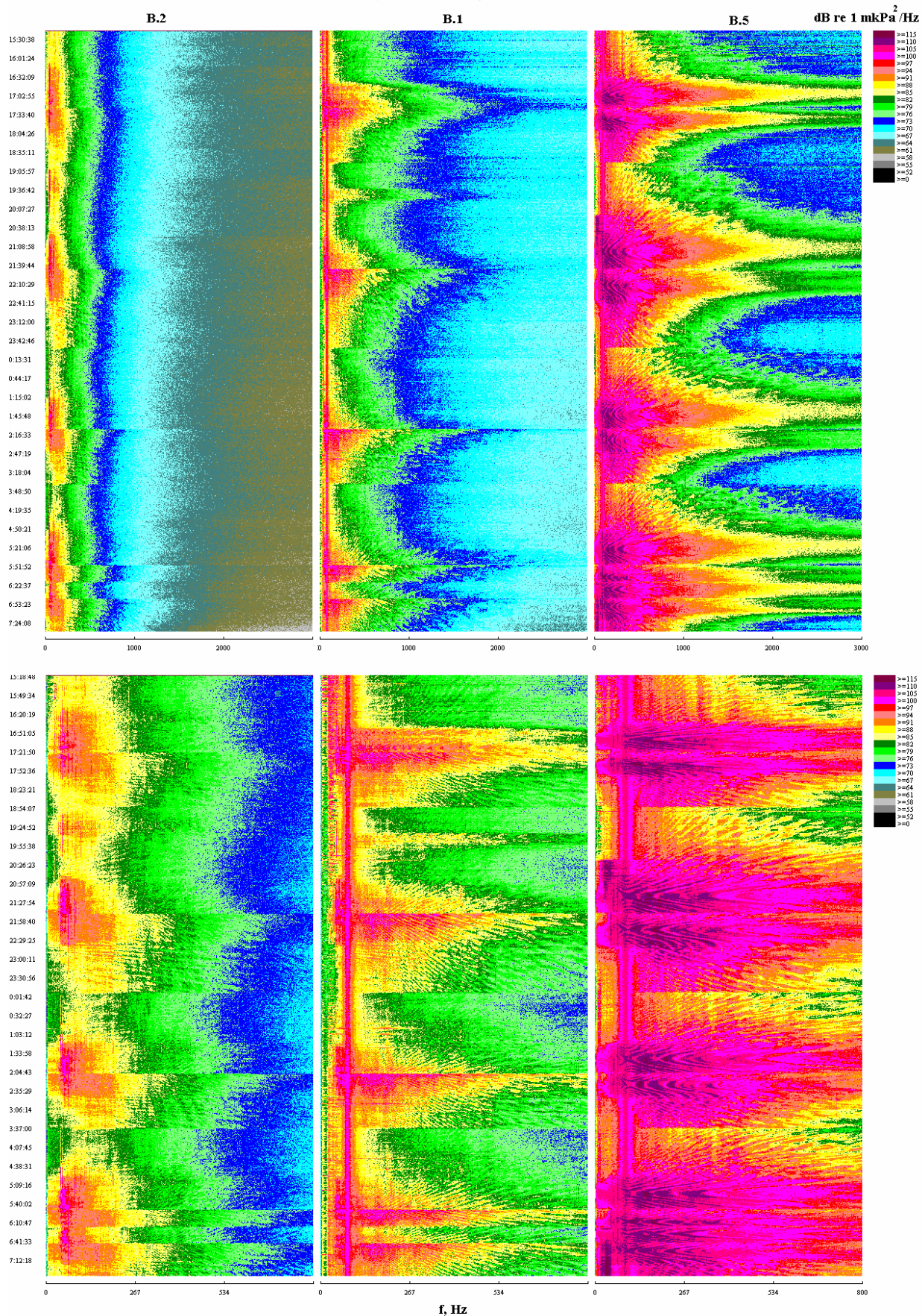


Рис. 5.6 - Сонограммы $G(f,t)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.2, В.1 и В.5 21-22 сентября 2001 г.

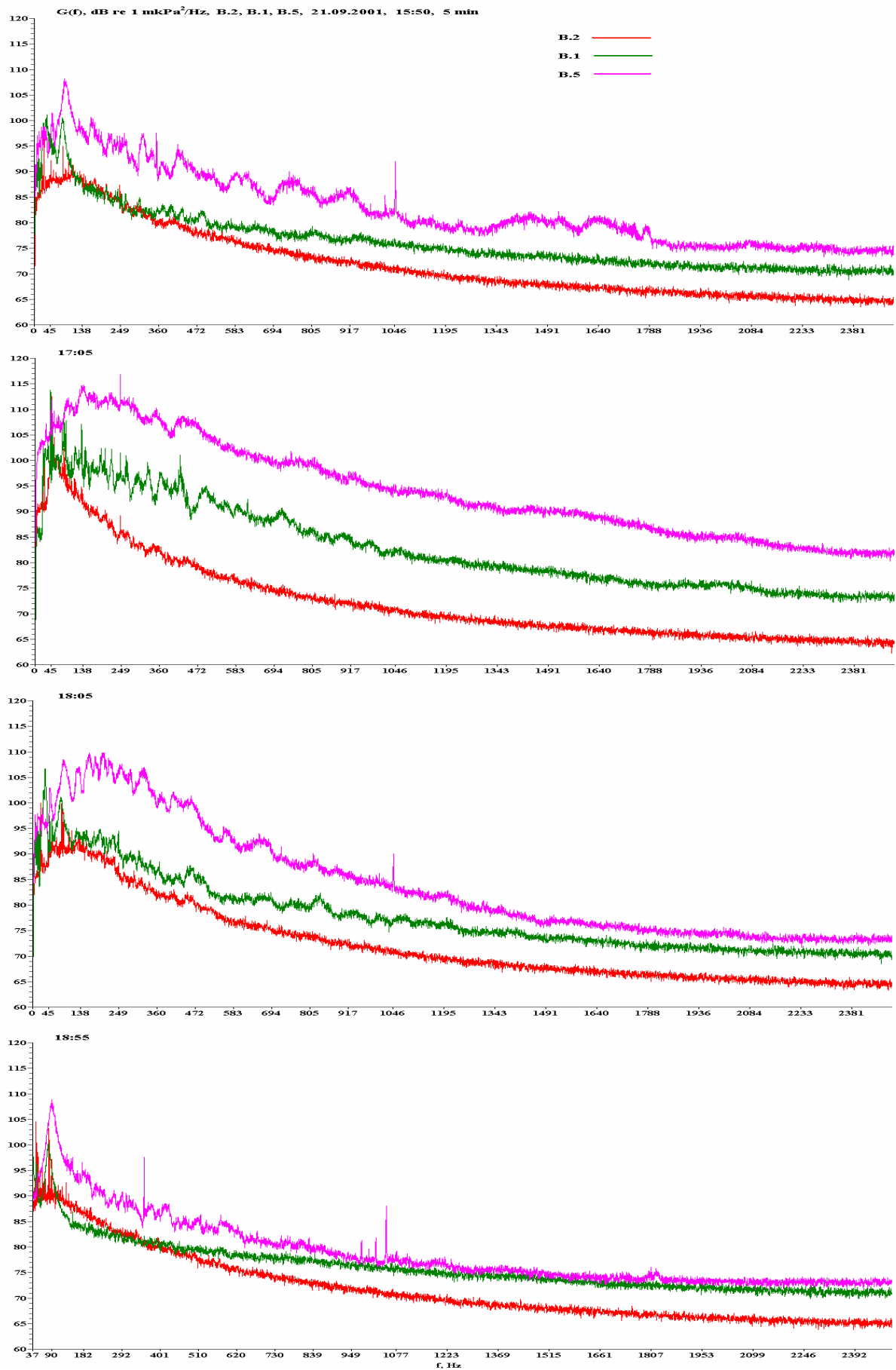


Рис. 5.7 - Спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.2, В.1 и В.5 в 15:50, 17:05, 18:05 и 18:55 21 сентября, 2001 г.

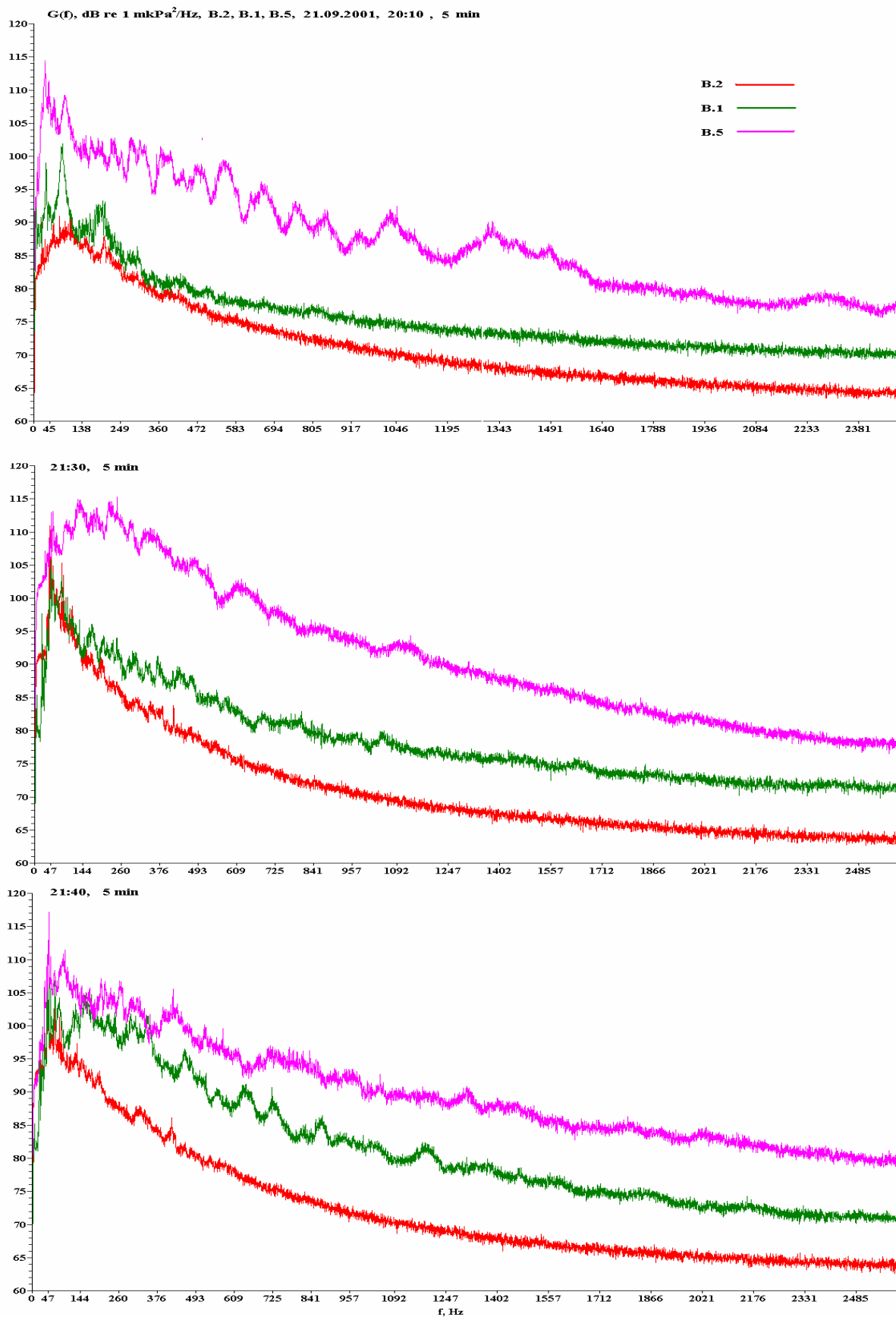


Рис. 5.8 - Спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.2, В.1 и В.5 в 20:10, 21:30 и 21:40 21 сентября 2001 г.

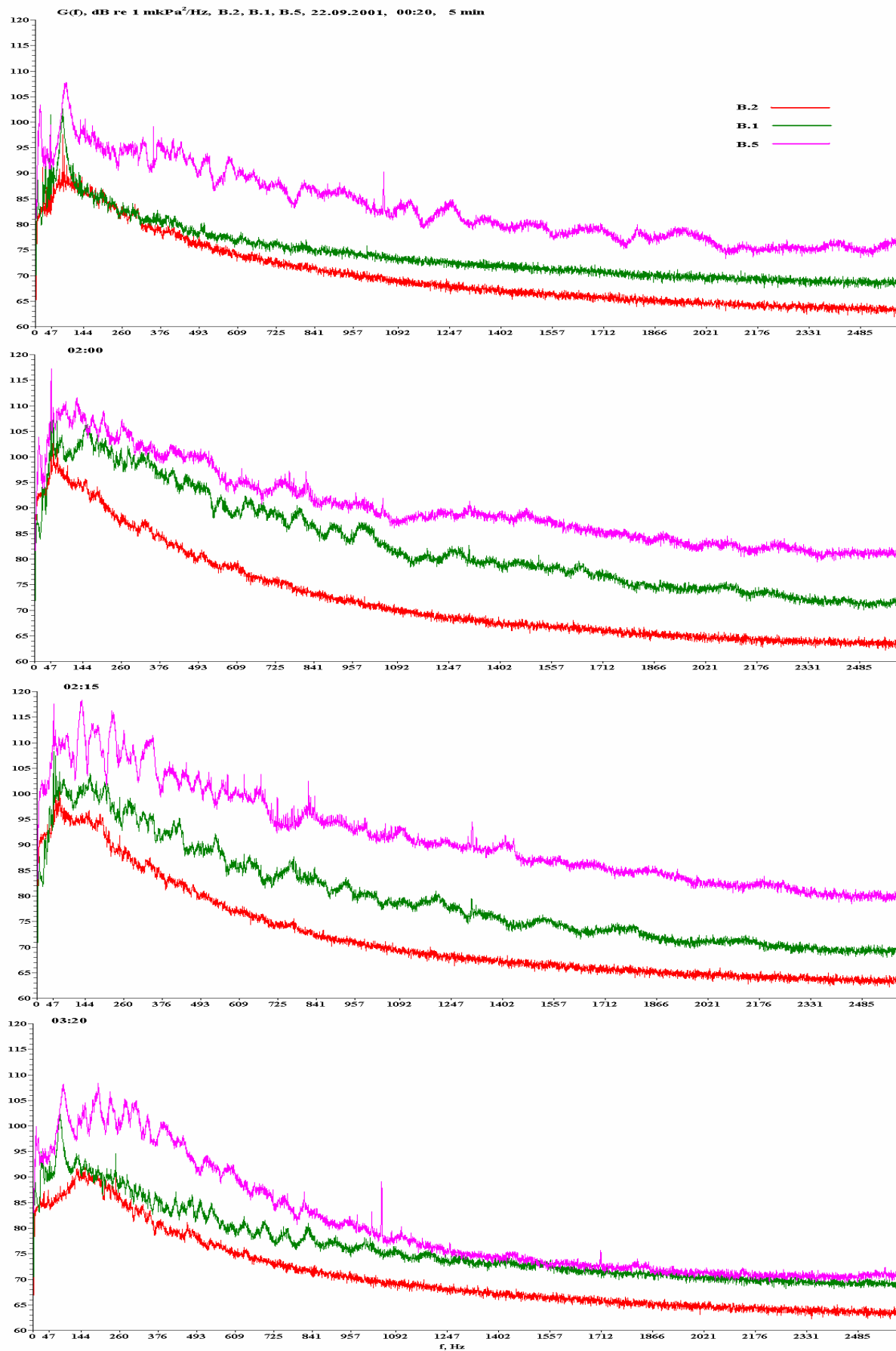


Рис. 5.9 - Спектры $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.2, В.1 и В.5 в 00:20, 02:00, 02:15 и 03:20 22 сентября 2001 г.

С 21:55 21 сентября до 07:15 22 сентября «Ирбис» двигался между точками т.1 и т.2 по маршрутам, показанным на Рис. 1.1. В это время, другие суда стояли на якорях. На Рис. 5.6 показаны сонограммы акустических сигналов, одновременно зарегистрированных в точках В.5, В.1, и В.2 во время выполнения «Ирбисом» маневров во время шторма (Рис. 1.1). Резкие изменения характера частотной интерференции, наблюдаемые на Рис. 5.6, вызваны разворотами «Ирбиса» и прохождением траверза относительно измерительного гидрофона.

Акустическое поле, создаваемое движущимся судном, обычно является более интенсивным за кормой судна. На спектрах $G(f)$, показанных на Рис. 5.7 - 5.9, представлена количественная оценка уровней шумов в условиях сильного ветра и волнения на различных расстояниях от «Ирбиса».

Ниже приводится информация о погодных условиях и движении судов днем 22 сентября:

- 07:15 - Судно «Ирбис» встало на якорь;
- 07:52 - Солнечно, небольшое количество белых гребней волн, три судна находятся возле платформы «Моликпак»;
- 09:28 - Судно «Мисс Сибил» отошло от плавучего нефтехранилища «Оха» и идет к судну «Ирбис»;
- 09:57 - Судно «Мисс Сибил» выключило двигатели; танкер «Приморье» приближается с востока;
- Суда «Смит Сибу» и «Смит Сахалин» стоят на якорях корма к корме у «Ирбиса»; танкер «Приморье» остановился;
- 12:25 - Танкер «Приморье» получил приказ поднять якорь и идти в зону швартовки;
- 13:09 - «Мисс Сибил» идет к «Приморью»; «Смит Сахалин» идет к «Охе»; вспомогательное судно «Смит Сибу» стоит на якоре;

- 13:48 - Танкер «Приморье» начал швартовые операции;
- 14:55 - Катер «Малыш», спущенный с «Охи», осуществляет проводку буксира; «Смит Сибу» идет к платформе «Моликпак»; «Смит Сахалин» находится у кормы танкера «Приморье», удерживая ее в заданном положении;
- 15:16 - «Оха» и «Приморье» сблизились на 100 м; цепочка, состоящая из судов «Оха», «Приморье» и «Смит Сахалин» протянулась с севера на юг;
- 16:45 - Началась отгрузка нефти;
- 17:05 - «Ирбис» включил основной двигатель;
- 17:20 - «Ирбис» начал двигаться к платформе «Моликпак»;
- 17:38 - «Ирбис» остановился в 300 м к северу от платформы «Моликпак»;
- 18:33 - «Ирбис» идет курсом 262°; второй танкер появился на горизонте;
- 18:50 - «Ирбис» встал на якорь;
- 21:30 - Течение изменило направление на 180°, и цепочка судов сделала то же самое.

На Рис. 5.10 и 5.11 представлены результаты спектрального анализа акустических шумов, одновременно зарегистрированных в точках В.2, В.1, и В.5 в течение указанного выше периода времени. К сожалению, во время шторма были повреждены антенны радиогидроакустических буев (РГАБ), находившихся в точках В.4 и В.3, и они перестали функционировать; поэтому в наличии имеются только данные, полученные в точках В.2, В.1, и В.5.

Максимальные уровни акустических шумов были зарегистрированы в точках В.2 и В.1 во время швартовки «Приморья» к «Охе» (Рис. 5.10). Этот уровень шумов зависит от ориентации цепочки из судов «Оха»-«Приморье»-«Смит Сахалин», которая определяется направлением

приливного течения. Основным источником шумов был буксир «Смит Сахалин», двигатели которого постоянно работали, создавая упор для стабилизации расположения цепочки танкеров, находящихся под воздействием течения. Когда течение имело направление с севера на юг, «Смит Сахалин» находился ближе к радиогидроакустическому бую, и уровень регистрируемого шума был выше.

Во время отгрузки нефти (Рис. 5.11), в точках В.1 и В.5 были зарегистрированы тональные компоненты и широкополосные шумы. Тональные компоненты на частотах ниже 300 Гц превышали 115 дБ (в точке В.5). На частотах выше 500 Гц сложный характер частотной интерференции акустического поля в точке В.2 (на глубине воды 14 м, в 15,5 км от платформы «Моликпак») был значительно менее выражен. Однако низкочастотные тональные компоненты (40-130 Гц), зарегистрированные в точке В.2, могли иногда превосходить уровни этих же сигналов, зарегистрированных в точке В.1 (на глубине воды 20 м, в 8,3 км от платформы «Моликпак»)²⁷. На Рис. 5.11 (21:34 и 21:46) показаны сложные акустические сигналы с дискретным спектром. Эти сигналы были одновременно зарегистрированы в трех точках (В.5, В.1 и В.2).

Операции по отгрузки нефти из «Охи» на танкер «Приморье» были завершены к 03:00 23 сентября 2002 г. В 08:20 танкер «Приморье» отошел от «Охи», и второй танкер начал швартоваться к «Охе». На Рис. 5.12 представлена сонограмма акустических сигналов, синхронно измеренных в точках В.2, В.1, и В.5 во время операций швартовки второго танкера и отгрузки нефти с «Охи» на этот танкер.

²⁷ Неясно, является ли это эффектом, возникшим в результате различий в условиях распространения шумов, или это вызвано погрешностью калибровки гидрофонов аналоговых гидроакустических буюв на частотах ниже 100 Гц.

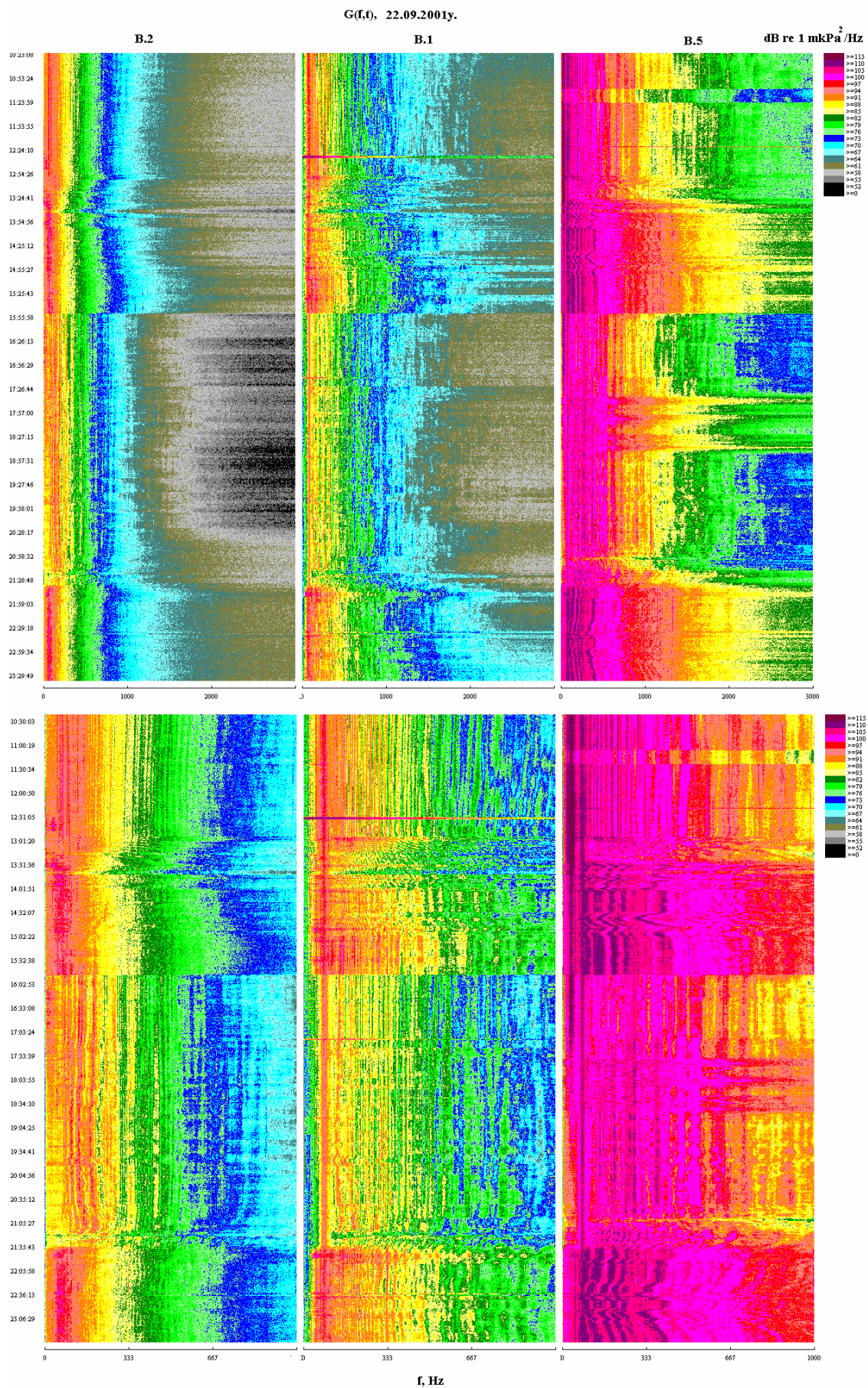


Рис. 5.10 - Сонограммы $G(f,t)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.2, В.1 и В.5 днем 22 сентября 2001 г.

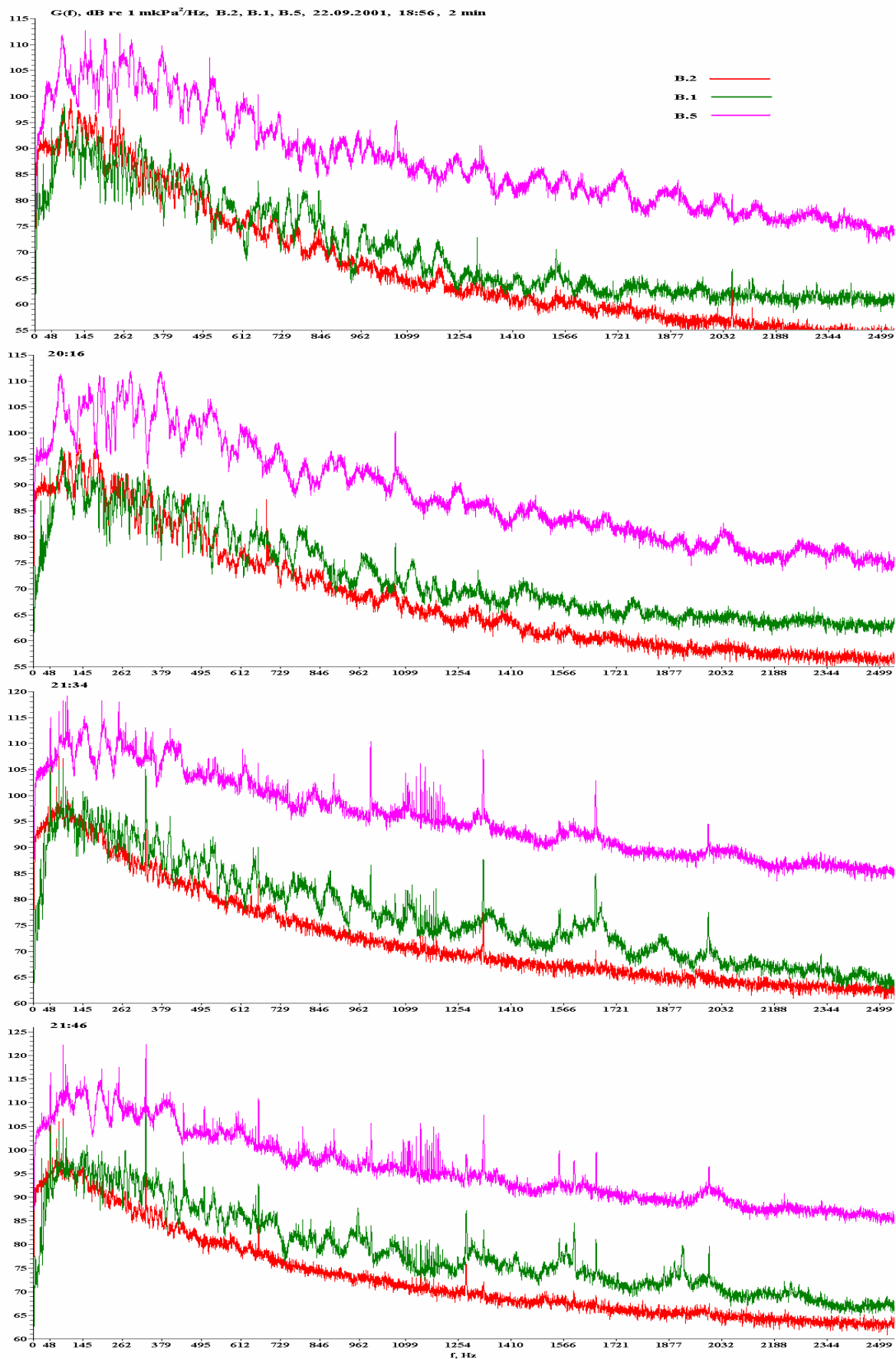


Рис. 5.11 - Спектра $G(f)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.2, В.1 и В.5 в 18:56, 20:16, 21:34 и 21:46 22 сентября 2001 г.

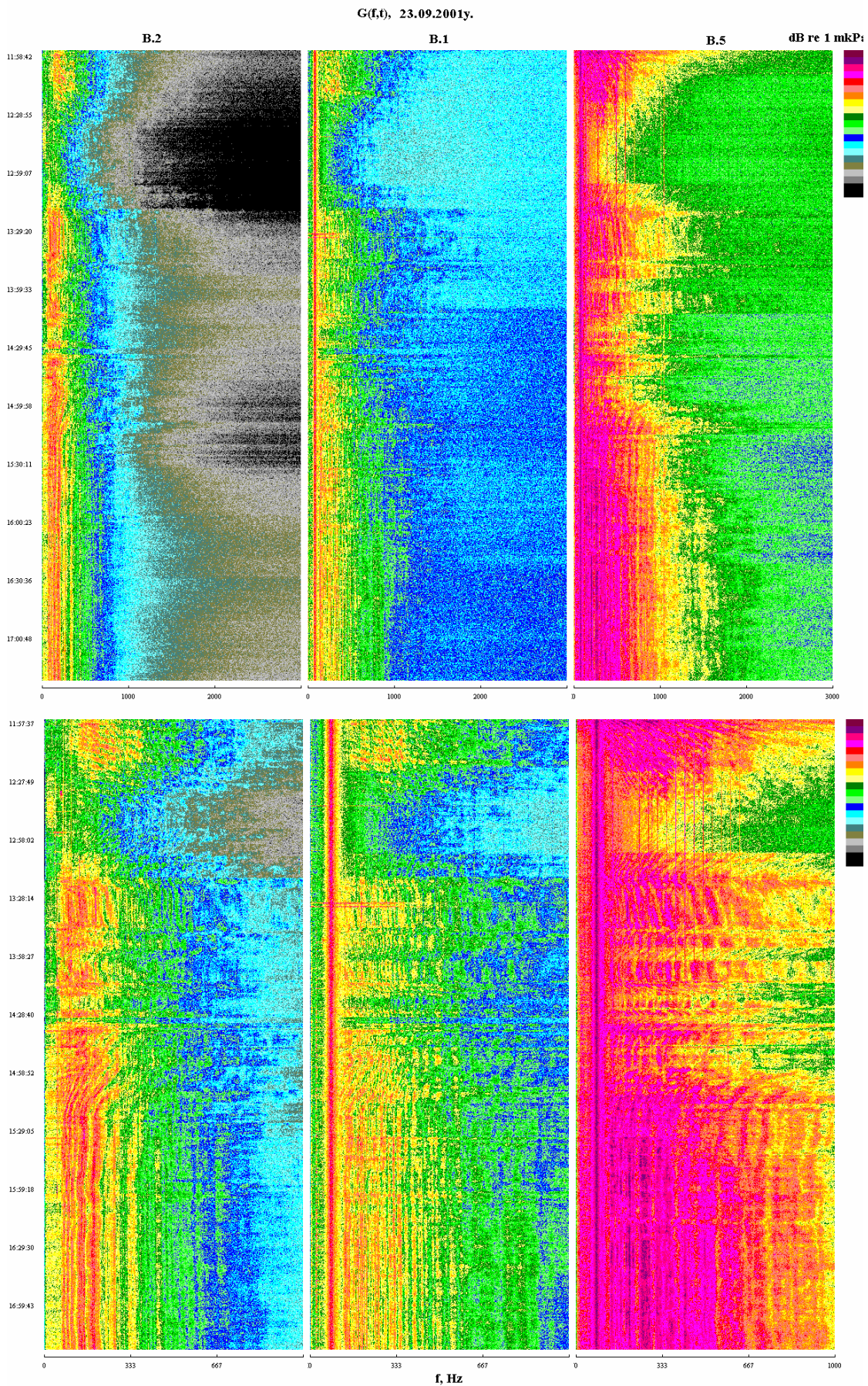


Рис. 5.12 - Sonograms $G(f,t)$ акустических шумов, синхронно зарегистрированных в точках В.2, В.1 и В.5 днем 23 сентября 2001 г.

6 Выводы

1. Платформа «Моликпак» и нефтедобывающий комплекс «Витязь», генерируют тональные и узкополосные шумовые сигналы, спектральные уровни которых на 10-15 дБ превышают уровень широкополосного шума.
2. В районе месторождения были зарегистрированы антропогенные тональные сигналы с частотами ниже 30 Гц.
3. Измерения акустического фона в районе залива Пильтун показали, что суда технического обеспечения являются источниками наиболее интенсивных акустических шумов с частотами ниже 1000 Гц. Во время движения одного из них интенсивность широкополосного шума увеличивается на 15-20 дБ. Во время отгрузки нефти наблюдаются высокие уровни шумов из-за участия в этой операции нескольких судов.
4. Антропогенные акустические шумы, создаваемые стационарными и движущимися индустриальными источниками, регулярно регистрируются в зоне кормления серых китов у входа в залив Пильтун. Однако эти шумы в значительной степени ослабляются прежде, чем они достигают этой зоны. Спектральные уровни тональных и узкополосных шумовых сигналов на частотах ниже 500 Гц, зарегистрированные в точках В.3 (11 м) и В.4 (10 м), не превышали 85 дБ отн. 1 мкПа²/Гц.

7 Планы на будущее

Акустические исследования, проводившиеся в районе платформы "Моликпак" в 2001 г. подтвердили актуальность организации акустического мониторинга с помощью автономных радиогидроакустических буйев (РГАБ). Сигналы от этих РГАБ могут быть синхронно записаны, что позволяет более эффективно их анализировать. Тем не менее, проблемы, связанные с измерениями на низких частотах и ограниченным динамическим диапазоном, обуславливают необходимость создания нового радиогидроакустического бую с цифровым радиотелеметрическим каналом, который разрешит проблемы измерений на низких частотах и обеспечит более широкий динамический диапазон.

ТОИ имеет большой опыт в области разработки, проектирования, изготовления и эксплуатации цифровых радиогидроакустических измерительных систем, передающих акустические сигналы в цифровом формате [Бондарь и др. 1993]. Основным ограничением в передаче цифровых акустических данных по радиоканалу является ширина полосы пропускания радиоприемника. Цифровой радиогидроакустический буй с 16-битовым аналого-цифровым преобразователем АЦП (динамический диапазон 96 дБ) может передавать сигналы только в диапазоне 0 - 2500 Гц. При использовании 12-битового АЦП (72 дБ) частотный диапазон составляет 0-4000 Гц. Важным достоинством цифрового кодирования является устранение электромагнитных наводок (в радиоприемнике) на низких частотах, что позволяет проводить высокоточные измерения в инфразвуковом диапазоне (<20 Гц). К сожалению расширение полосы пропускания в радиотелеметрическом канале уменьшает дальность надежной передачи данных даже при удвоении мощности радиопередатчика. Сочетание цифровых и аналоговых радиогидроакустических буйев позволит выполнять точные акустические измерения в диапазоне частот от 1 до 10000 Гц (цифровой 1-2500 Гц, аналоговый 200-10000 Гц). Цифровые радиогидроакустические буи с

пьезоэлектрическими акселерометрами позволят выполнить акустические измерения в диапазоне от 0.07-80 Гц²⁸.

Для точных полевых измерений потерь при распространении низкочастотного звука в настоящее время разрабатывается низкочастотный резонансный излучатель электромагнитного типа.

В связи с повреждениями буев, работавших в точках В.3 и В.4 и возможными искажениями при измерениях на низких частотах, проводимых с помощью аналоговых радиогидроакустических буев, проведение корректного анализа потерь при распространении звука, на основе акустических данных, полученных в 2001 году, не представляется возможным и поэтому в полевом сезоне 2002 г. будет выполнено более полное и точное исследование потерь при распространении звука от платформы "Моликпак" до устья залива Пильтун.

²⁸ Следует отметить, что низкочастотные шумы высокой амплитуды, записываемые радиогидроакустическими буюми, установленными на мелководье (например, в точке В.3) вызываются течением (псевдошумы). Эти шумы генерируются при взаимодействии гидрофона с потоком и не являются характеристикой фона. С этими шумами трудно бороться и они, по всей вероятности, будут присутствовать даже в данных, измеряемых и более совершенными измерительными системами.

8 Благодарности

Авторы хотели бы поблагодарить Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН за помощь в организации и проведении этих работ

Авторы хотели бы также выразить признательность следующим сотрудникам ТОИ, которые хотя и не участвовали в написании этого отчета, но оказали значительное содействие, способствовавшее успешному выполнению программы в ходе полевых работ: научному сотруднику Р.А. Коротченко; инженерам Е.А. Масленникову, В.В. Лихачеву, Д. Г. Ковзелю.

Авторы хотели бы также принести благодарность экипажу судна "Ирбис" за их гостеприимство и помощь в проведении акустических исследований в данном районе.

И, наконец, авторы хотели бы поблагодарить д-ра Г. И. Долгих (ТОИ), д-ра Ричарда Т. Хоука, Д-ра Уоррена С. Росса ("ЭксонМобил Апстрим Рисерч Компани") и д-ра Х. Роджера Мелтона ("ЭксонМобил Апстрим Рисерч Компани") за рецензирование данного отчета.

Особую благодарность выражаем инвестиционным компаниям, их сотрудникам и консультантам, без помощи которых данная работа не была бы возможной. Среди них:

Эл-Джи-Эл Лтд. (LGL Limited) - д-р С. Б. Язвенко и д-р. С. Р. Джонсон
Эксон Нефтегаз Лимитед. -М. Р. Дженкерсон, К. Р. Мартин и Х.Р. Мелтон
Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд- Дж. К Робинсон и С. Балыцок

9 Перечень авторов отчета

От Тихоокеанского океанологического института им. В.И. Ильичева
Дальневосточного отделения Российской Академии Наук:

Научный сотрудник С.В. Борисов

Научный сотрудник А.В. Гриценко

Д-р. ф.-м. н. наук А.Н. Рутенко

Научный сотрудник А.В. Ходзевич

10 Библиография

1. Борисов С.В., Гриценко А.В., Дженкерсон М.П., Рутенко А.Н. и Ходзевич А.В. (2002 г.) Оценка и мониторинг передачи акустических шумов при проведении сейсморазведки 3-Д на месторождении Одопту 5 августа - 9 сентября 2001 г. (Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН), отчет для компании Эксон Нефтегаз Лтд.
2. Cummings W.C., Thompson P.O., and Cook R (1968) Underwater sounds of migrating gray whales, *Eschrichtius glaucus* (Cope) (Подводные шумы от мигрирующих серых китов) // J. Acoust. Soc. Am. Vol. 44. no. 5. P. 1278-1281.
3. Sobolevsky Ye.I, et. al. (Соболевский Е.И. и др.) (1999) Report for Sakhalin Energy Investment Company (Отчет для «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.»).
4. Sobolevsky Ye.I, et. al. (Соболевский Е.И. и др.) (2000) Report for Sakhalin Energy Investment Company (Отчет для «Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.»).
5. Richardson W.J., Greene C.R., Malme C.I. and Thomson D.H. (1995). Marine mammals and noise. (Морские млекопитающие и шум). Academic Press Limited. 576 p.
6. Bondar` L.F., Gritsenko A.V., Zakharov V.A., Kovzel` D.G. and Rutenko A.N. Digital radio-telemetry system for the collection and results of its application in studies of sea reverberation characteristics (Цифровая радиотелеметрическая система для сбора данных и результаты ее применения при изучении характеристик реверберации моря).// Acoust. Phys., 1993, vol.39, no.2, pp.118-122
7. Красная книга Российской Федерации (Животные). 2001. Аст и Астрел - Балашиха, Агинское, 862 с.
8. Hilton-Taylor, C. 2000. IUCN Red List of Threatened Species. IUCN/SSC, Gland, Switzerland and Cambridge, United Kingdom.
9. Язвенко, С., Т. Макдональд, С. Мейер, С. Блохин, С.Р. Джонсон, В. Владимиров, С. Лагерева, М. Маминов, Е. Разливалов, М. Ньюкамер, Р. Нилсен, и В.С. Хокс. 2002. Аэровизуальный мониторинг состояния морских млекопитающих в связи с проведением трехмерной сейсморазведки в пределах лицензионной площади Одопту в 2001 г., северо-восточный шельф острова Сахалин, Охотское море, Россия. Заключительный отчет, подготовленный компанией ЛГЛ Лимитед, Сидней, Британская Колумбия, для компании Эксон Нефтегаз Лимитед, Южно-Сахалинск, Россия. 179 стр. + Приложения.

Приложение А - Методология нормирования и анализа акустических данных

Нормировка и корректировка данных выполнялась с использованием следующих алгоритмов²⁹:

1. Нормировка исходных данных:

$$A = \frac{V}{K_g \cdot K_U} \quad [\text{мкПа}]$$

где:

A - амплитуда отсчета [мкПа]

V - выходное напряжение АЦП

K_U - сквозной коэффициент усиления измерительного тракта

K_g - чувствительность гидрофона [мкВ/Па].

2. Для расчета спектральной плотности энергии и мощности:

Для ряда "давление-время" в цифровом представлении:

$$p(i\Delta t) \quad , \quad i = 0, M-1 \quad [\text{мкПа}]$$

где:

M - число отсчетов

T - продолжительность временного ряда (секунды)

Δt - интервал между двумя отсчетами (секунды)

²⁹ Было выполнено тестирование всех программ нормировки, корректировки и усреднения спектральных данных. В этих тестах по измерительно-регистрационному тракту пропускались калиброванные широкополосные и тональные сигналы, которые подавались на вход гидрофонного усилителя.

А. Расчет спектральной плотности энергии в пределах окна анализа T :

$$E(k\Delta f) = 2\Delta t^2 |P_{FFT}(k\Delta f)|^2 \quad [(\text{мкПа}/\text{Гц})^2] \text{ или } [\text{мкПа}^2 \cdot \text{с}/\text{Гц}]^{30}$$

где:

$$\Delta f = \frac{1}{M\Delta t} \quad \text{частотный шаг (Гц)}$$

Алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ) должен быть проверен на соответствие теореме Парсеваля:

$$\sum_{i=0}^{M-1} p^2(i\Delta t)\Delta t = \sum_{k=0}^{M/2} E(k\Delta f)\Delta f$$

Для удовлетворения условий теоремы Парсеваля, необходима компенсация Δf , иначе значения энергии не будут правильно суммироваться. При это если быстрое преобразование Фурье представлено временным окном, отличающимся от 1 сек, будет иметь место компенсация протяженности окна.

В. Расчет спектральной плотности мощности (при нормализации энергии по окну в 1 секунду):

$$G(k\Delta f) = \frac{1}{T} E(k\Delta f) \quad [\text{мкПа}^2/\text{Гц}]$$

С. Перевод спектров в логарифмический масштаб:

$$E_{dB}(k\Delta f) = 10\text{Log} 2 + 20\text{Log}(\Delta t |P_{FFT}(k\Delta f)|) \quad [\text{дБ отн. } 1 \text{ мкПа}^2 \cdot \text{с}/\text{Гц}]^{31}$$

$$G_{dB}(k\Delta f) = E_{dB}(k\Delta f) - 10\text{Log} T \quad [\text{дБ отн. } 1 \text{ мкПа}^2/\text{Гц}]^{32}$$

³⁰ Коэффициент равный 2 обеспечивает компенсацию одностороннего быстрого преобразования Фурье ($k = 0, \dots, M/2$)

D. Расчет средней энергии и спектральной плотности мощности для окна продолжительностью NT секунд путем усреднения спектров, рассчитанных в последовательных неперекрывающихся окнах продолжительностью T :

$$\bar{E}(k\Delta f) = \frac{2\Delta t^2}{N} \sum_{i=1}^N |P_{FFT}(k\Delta f)|^2 \quad [(\text{мкПа}/\text{Гц})^2] \text{ или } [\text{мкПа}^2 \cdot \text{с}/\text{Гц}]$$

$$\bar{G}(k\Delta f) = \frac{1}{T} \bar{E}(k\Delta f) \quad [\text{мкПа}^2/\text{Гц}]$$

$$\bar{G}(k\Delta f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N G(k\Delta f) \quad [\text{мкПа}^2/(\text{с Гц})] \text{ или } [\mu\text{Па}^2]$$

Обычно в качестве единиц измерения спектральной плотности мощности применяются $\text{мкПа}^2/\text{Гц}$ или $\text{мкПа}/\sqrt{\text{Гц}}$.

³¹ Следует определить окно, для которого определяется энергия.

³² Коррекция $-10 \log T$ позволяет рассчитывать спектральную плотность мощности для более протяженных окон с целью обеспечения статистической стабильности.