



Иванов Михаил Павлович

Статистические характеристики
микросейсмических колебаний, вызванных
штормовой активностью

1.6.17 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Владивосток – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичёва Дальневосточного отделения Российской академии наук (ТОИ ДВО РАН).

Научный руководитель:

Долгих Станислав Григорьевич

д.т.н., член корреспондент РАН, профессор ДВО РАН, заведующий лабораторией нелинейной гидрофизики и природных катастроф, ТОИ ДВО РАН

Официальные оппоненты:

Зайцев Андрей Иванович

д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, директор, ФГБУН Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДВО РАН (ФГБУН СКБ САМИ ДВО РАН)

Гаврилов Валерий Александрович

д.ф.-м.н., заведующий лабораторией комплексного мониторинга сейсмоактивных сред, ФГБУН институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (ФГБУН ИВиС ДВО РАН)

Ведущая организация:

ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ФГБУН ИМГиГ ДВО РАН), г. Южно-Сахалинск

Защита состоится «25» сентября 2026 г. в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.1.214.02 при ФГБУН Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева ДВО РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТОИ ДВО РАН, а также на сайте института по адресу: <https://www.poi.dvo.ru/ru/node/2841>.

Автореферат разослан « » 2026 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по вышеуказанному адресу на имя учёного секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат географических наук

Храпченков Ф.Ф.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Микросейсмические колебания шельфовой зоны являются важным индикатором комплексного изучения процессов взаимодействия атмосферы, океана и литосферы. Формирование микросейсмического шума обусловлено динамикой ветрового волнения, штормовой активностью и их воздействием на донное и береговое основание, в результате чего в верхнем слое земной коры возбуждаются слабые, но устойчивые колебания. Исследование микросейсмических процессов в последние годы привлекает всё большее внимание как в фундаментальных, так и в прикладных работах, поскольку микросейсмы рассматриваются в качестве информативного индикатора экстремальных гидрометеорологических явлений и могут быть использованы для задач мониторинга и прогноза опасных природных процессов, влияющих на безопасность морской инфраструктуры и прибрежных экосистем.

Особую актуальность приобретает исследование статистических характеристик микросейсмических сигналов в условиях штормовой активности. В рамках настоящей работы под статистическими характеристиками понимаются спектральные и вероятностные параметры микросейсмических колебаний, включающие распределение энергии по частотам, амплитудные распределения сигналов, функции плотности вероятности, а также параметры формы этих распределений и их временную изменчивость. Анализ указанных характеристик позволяет перейти от описания отдельных сигналов микросейсмического шума к выявлению устойчивых закономерностей энергообмена на границе раздела «океан – земная кора», а также установить связь между параметрами микросейсмического поля и особенностями штормового воздействия.

Применение статистического и вероятностного подходов особенно важно в условиях штормов и тайфунов, когда микросейсмические сигналы приобретают выраженную нестационарность, а их амплитудные распределения отклоняются от нормального закона. В таких условиях форма функции плотности вероятности и её развитие во времени содержат дополнительную физическую информацию о механизмах генерации микросейсмических колебаний, направленности волнового возбуждения и влиянии траектории шторма на характеристики регистрируемого сигнала.

Использование современных лазерно–интерференционных приборов обеспечивает регистрацию микросейсмических и деформационных процессов с высокой чувствительностью и временным разрешением, что создаёт принципиально новые возможности для детального статистического анализа слабых колебаний земной поверхности. Это позволяет не только расширить представления о физической природе микросейсмического шума, но и сформировать основу для разработки дистанционных методов диагностики и раннего выявления экстремальных штормовых событий в прибрежных зонах.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью работы является выявление закономерностей формирования спектральных и статистических характеристик микросейсмических колебаний в прибрежной зоне Японского моря в фоновых условиях и при воздействии штормовой активности на основе анализа данных лазерно–интерференционных измерительных систем и сейсмометрических наблюдений.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. На основе экспериментальных данных, полученных с использованием лазерного деформографа, лазерного измерителя вариаций давления гидросферы и широкополосного сейсмометра, исследовать спектральную структуру микросейсмических колебаний и установить диапазоны частот первичных и вторичных микросейсм в условиях штормовой активности.

2. Выполнить сравнительный анализ эффективности регистрации микросейсмических колебаний различными типами измерительных систем с учётом их амплитудно–частотных характеристик и физической природы регистрируемых величин.

3. Определить статистические характеристики фонового микросейсмического поля по данным лазерных деформографов, включая амплитудные распределения, функции плотности вероятности и параметры формы распределений, а также оценить степень отклонения от нормального закона.

4. Исследовать спектральные и статистические характеристики микросейсмических колебаний в периоды прохождения тайфунов различной интенсивности и траекторий движения, включая анализ изменений амплитуд, спектральной плотности энергии и формы распределений.

5. Установить закономерности формирования негауссовских распределений микросейсмических колебаний, включая наличие «тяжёлых хвостов», и определить параметры, характеризующие вероятность экстремальных отклонений сигналов.

6. Выявить универсальные статистические зависимости нормированных распределений микросейсмических колебаний, включая экспоненциальный характер спада хвостов и связь между коэффициентом эксцесса и параметрами распределений.

Научная новизна

1. Реализован комплексный подход к исследованию микросейсмических колебаний в прибрежной зоне Японского моря, основанный на совместном анализе синхронных данных лазерных деформографов, лазерного измерителя вариаций давления гидросферы и широкополосного сейсмометра, что позволило выявить особенности спектральной структуры сигналов с учётом физической природы регистрируемых величин.

2. Установлено, что амплитудные распределения фоновых микросейсмических колебаний обладают выраженной негауссовской структурой и характеризуются положительным эксцессом и асимметрией. Показано, что использование разложения

Грама–Шарлье для описания экспериментальных функций плотности вероятности, позволят учитывать вклад «тяжёлых хвостов» распределения.

3. Впервые выявлены универсальные статистические закономерности микросейсмических колебаний в условиях штормовой активности, заключающиеся в инвариантности формы нормированных распределений и экспоненциальном характере спада их хвостов, а также установлена связь между коэффициентом эксцесса и параметрами экспоненциального аппроксимационного закона.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы заключается в развитии представлений о закономерностях формирования спектральной и статистической структуры микросейсмических колебаний в прибрежной зоне в условиях фоновое состояние и при воздействии интенсивной штормовой активности. Полученные результаты уточняют физические механизмы генерации первичных и вторичных микросейсм, а также расширяют существующие подходы к анализу микросейсмического поля с учётом особенностей регистрации различных физических величин.

В работе показано, что микросейсмические колебания характеризуются устойчивыми негауссовскими свойствами, включая наличие «тяжёлых хвостов» распределений и универсальную структуру нормированных функций плотности вероятности. Установленные закономерности, в том числе экспоненциальный характер спада хвостов распределений и связь между их параметрами и коэффициентом эксцесса, вносят вклад в развитие статистических методов описания геофизических процессов и позволяют более точно характеризовать вероятность экстремальных микросейсмических событий.

Практическая значимость работы определяется возможностью использования полученных результатов и разработанных подходов для анализа и интерпретации микросейсмических данных в задачах мониторинга морского волнения и штормовой активности. Показано, что применение лазерно–интерференционных методов регистрации позволяет эффективно диагностировать параметры волновых процессов и динамику штормовых воздействий в условиях ограниченного доступа к прямым океанографическим измерениям.

Разработанные методики статистического анализа микросейсмических сигналов могут быть использованы при создании и совершенствовании систем дистанционного мониторинга состояния морской среды и прибрежной зоны, а также при решении задач оценки интенсивности штормовых воздействий и повышения надёжности прогноза опасных гидрометеорологических явлений.

Методология и методы исследования

Методологической основой работы является комплексный экспериментально–аналитический подход к исследованию микросейсмических колебаний в прибрежной зоне, основанный на совместном анализе данных различных типов измерительных систем и применении методов спектральной и статистической обработки сигналов.

В работе использованы следующие методы:

1. Регистрация колебаний земной поверхности лазерными деформографами и широкополосным сейсмометром;
2. Регистрация вариаций придонного давления с использованием лазерных измерителей вариаций давления гидросферы и гидрологических зондов;
3. Предварительная обработка временных рядов натуральных данных, включающая фильтрацию и выделение исследуемых сигналов;
4. Спектральный анализ микросейсмических колебаний с целью оценки характерных частотных диапазонов, соответствующих первичным и вторичным микросейсам;
5. Статистический анализ сигналов, включающий построение гистограмм, оценку функций плотности вероятности и вычисление параметров распределений (среднее значение, среднеквадратичное отклонение, коэффициенты асимметрии и эксцесса);
6. Аппроксимация экспериментальных распределений с использованием нормального закона и разложения Грама–Шарлье для анализа отклонений от гауссовского поведения;
7. Сравнительный анализ статистических и спектральных характеристик микросейсмических колебаний в фоновых условиях и в периоды штормовой активности.

Использование совокупности указанных методов обеспечивает достоверность полученных результатов и позволяет выявлять устойчивые закономерности формирования микросейсмического поля, включая его спектральные особенности и негауссовские статистические свойства.

Положения, выносимые на защиту

1. Выявлены общие закономерности зависимости микросейсмических колебаний верхнего слоя земной коры от вариаций придонного давления по экспериментальным данным лазерных деформографов, лазерного измерителя вариаций давления гидросферы и широкополосного сейсмометра при штормовой активности, что позволяет определять периоды максимального морского волнения по вариациям первичных микросейсм, сгенерированных в зоне перехода «вода–земная кора».
2. Аппроксимация экспериментальных данных с использованием распределения Грама–Шарлье обеспечивает более точное описание, чем модель Гаусса при анализе амплитудных распределений микросейсмических колебаний, зарегистрированных на берегу Японского моря в условиях минимальной внешней возмущённости.
3. Выявлено увеличение амплитуды микросейсмических колебаний в диапазоне периодов от 16 до 20 с и отклонение от нормального закона распределения деформаций при спектральном и статистическом анализе натуральных данных лазерно-интерференционных приборов в периоды прохождения атмосферных процессов над акваторией Японского моря.

Степень достоверности и апробации результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием высокоточных лазерно–интерференционных приборов и современных геофизических средств измерений, а также применением признанных методов спектрального и статистического анализа сигналов. Повторяемость выявленных закономерностей проверялась на разных временных интервалах и при различных метеорологических условиях, что подтверждает устойчивость и воспроизводимость полученных данных. Корректность методик обработки и интерпретации результатов подтверждена сопоставлением экспериментальных данных с теоретическими моделями генерации микросейсмических колебаний.

Основные результаты диссертационной работы представлены на российских и международных научных конференциях, обсуждались на научных семинарах и отражены в ряде публикаций в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК и международные базы цитирования. Это свидетельствует о признании научным сообществом актуальности и значимости полученных автором результатов.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в семи статьях в научных рецензируемых журналах, три из которых входят в перечень ВАК, а также опубликованы девять материалов конференций.

Личный вклад автора

Автором самостоятельно выполнены сбор, предварительная обработка, спектральный и статистический анализ экспериментальных данных, использованных в диссертационной работе. Проведена обработка длительных временных рядов микросейсмических колебаний, зарегистрированных лазерно–интерференционными приборами, включая фильтрацию сигналов, построение спектральных характеристик, амплитудных распределений и функций плотности вероятности, а также анализ их временной изменчивости в различных гидрометеорологических условиях.

Автором разработаны и реализованы алгоритмы статистической обработки микросейсмических данных, выполнен анализ параметров формы распределений, а также проведена физическая интерпретация полученных результатов с точки зрения процессов взаимодействия океана и земной коры.

Формулировка целей, задач и положений, выносимых на защиту, осуществлялась автором под научным руководством Долгих Станислава Григорьевича. Основные результаты диссертационной работы получены автором лично и отражены в научных публикациях, выполненных как самостоятельно, так и в соавторстве, при определяющем вкладе автора в обработку данных, анализ результатов и подготовку текстов публикаций.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 127 страниц, из них 115 страниц текста, включая 52 рисунка и 4 таблицы. Список литературы включает 115 наименований на 12 страницах.

Благодарности Автор выражает свою искреннюю благодарность научному руководителю член–корреспонденту РАН, профессору ДВО РАН, д.т.н. Долгих Станиславу Григорьевичу за вклад в формирование научных навыков анализа микросейсмических процессов и методов их спектрального исследования. Автор выражает благодарность главному научному сотруднику отдела нелинейных геофизических процессов Института прикладной физики РАН, профессору, д.ф.–м.н. Пелиновскому Ефиму Наумовичу за формирование научных навыков и методов их статистического исследования. Автор признателен академику РАН, д.ф.–м.н. Долгих Г.И., к.ф.–м.н. Будрину С.С., д.ф.–м.н. Чупину В.А., д.ф.–м.н. Талиповой Т.Г., к.т.н. Яковенко С.В., к.т.н. Швецу В.А., к.г.–м.н. Обрезковой М.С., к.ф.–м.н. Овчаренко В.В., к.т.н. Стробыкину Д.С., Болсуновскому М.А, Антонову В.А. за помощь в сборе и подготовке натуральных данных лазерно–интерференционных приборов, консультации и всестороннее содействие на всех этапах выполнения работы.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведён обзор литературы по теме исследования, рассмотрены основные физические механизмы формирования ветрового волнения и связанных с ним микросейсмических колебаний, а также описаны методы регистрации и статистического анализа исследуемых процессов.

В **разделе 1.1** рассмотрены физическая природа и основные характеристики ветрового волнения. Приведены основные представления о процессах генерации морских волн под действием ветра, механизмах передачи энергии от атмосферы к водной поверхности, а также рассмотрены особенности пространственно–временной структуры ветрового волнения в широком диапазоне периодов.

В **разделе 1.2** рассмотрены статистические характеристики ветрового волнения. Описаны основные подходы к статистическому описанию морской поверхности, приведены вероятностные распределения параметров волнения, а также рассмотрены особенности формирования негауссовских распределений и «тяжёлых хвостов» при развитии нелинейных процессов в волновом поле.

В **разделе 1.3** рассмотрены микросейсмические колебания как следствие ветрового волнения и штормовой активности. Приведены основные механизмы генерации первичных и вторичных микросейсм, возникающих при взаимодействии морского

волнения с дном и береговой зоной, а также рассмотрены особенности спектральной структуры микросейсмических сигналов.

В разделе 1.4 рассмотрены статистические характеристики фоновых микросейсмических колебаний и методы их описания. Приведены основные методы статистического анализа микросейсмических сигналов, включая анализ плотностей вероятности, коэффициентов асимметрии и эксцесса, а также подходы к исследованию «тяжёлых хвостов» распределений и экспоненциальных асимптотик.

В разделе 1.5 описаны аппаратные методы измерения характеристик морского волнения и микросейсмических колебаний. Приведены основные характеристики лазерно–интерферометрического приборного комплекса, а также систем сейсмометрических наблюдений.

Во второй главе приведены результаты анализа микросейсмических колебаний, зарегистрированных в прибрежной зоне морской экспериментальной станции МЭС "м. Шульца" в периоды прохождения тропических циклонов различной интенсивности. Целью исследования было определить спектральные особенности, характер и условия формирования первичных и вторичных микросейсмических колебаний при различных сценариях штормового воздействия.

В разделе 2.1 приведена характеристика района исследований и рассмотрены штормовые события, зарегистрированные на акватории Японского моря в период с 2018 по 2020 гг. Отмечена необходимость комплексной регистрации при помощи лазерного измерителя вариаций давления гидросферы (ЛИВДГ) [А1, А2], лазерного деформографа [А3, А4] и широкополосного сейсмометра [А5]. В период 2018–2020 гг. были зарегистрированы восемь тропических циклонов.

Для детального анализа выбраны тайфуны «Симарон», «Конг–Рэй» и «Хагупит», различающиеся интенсивностью, траекторией движения и продолжительностью воздействия на акваторию Японского моря. Траектории их прохождения по данным Японского метеорологического агентства (JMA) [1] представлены на рисунке 1.

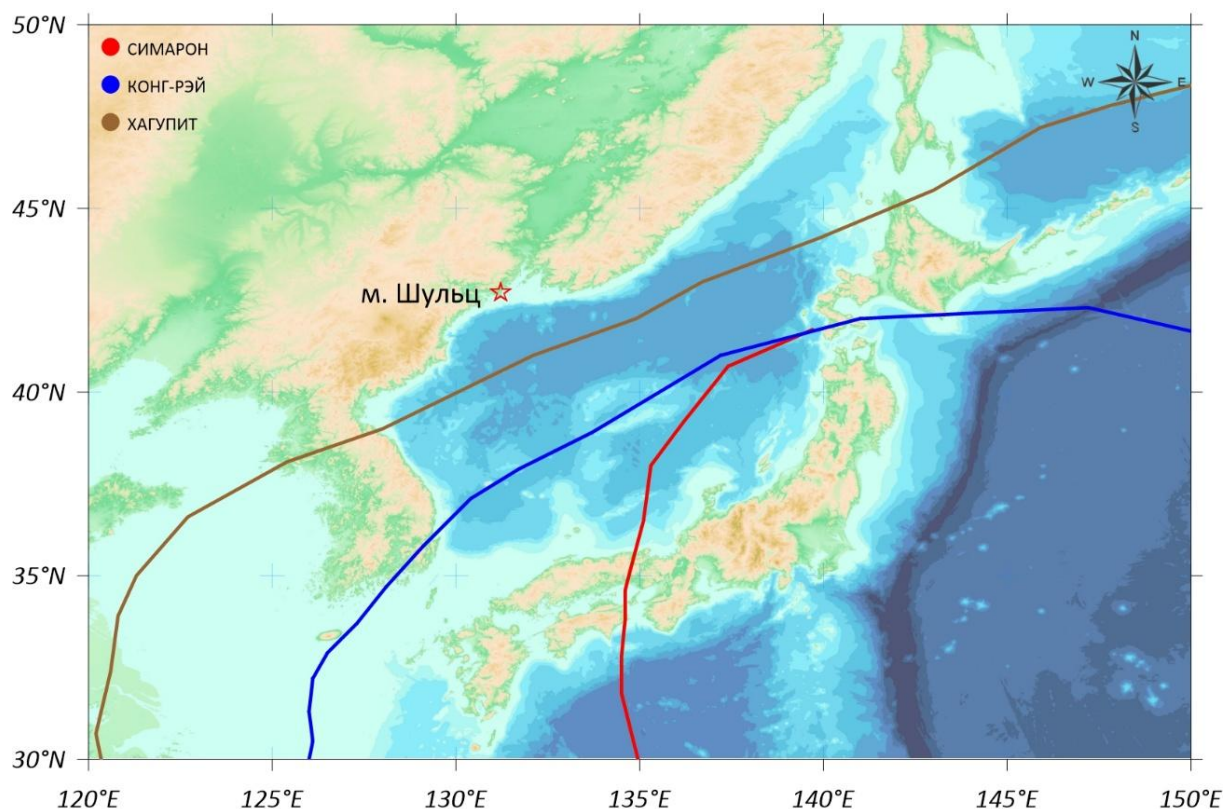


Рисунок 1. Траектории прохождения тайфунов «Симарон», «Конг–Рэй» и «Хагупит» над акваторией Японского моря.

В **разделе 2.2** описаны методы обработки экспериментальных данных. После предварительной полосовой фильтрации выполнялся расчёт спектральной плотности мощности сигналов в диапазоне частот 0.05–0.5 Гц, соответствующего периодам от 2 до 20 с. На основе анализа спектральных характеристик определялись диапазоны частот, соответствующие первичным и вторичным микросейсмическим колебаниям.

В **разделе 2.3.** анализируются спектральные особенности микросейсмических колебаний, зарегистрированных в периоды прохождения тайфунов «Симарон», «Конг–Рэй» и «Хагупит», с рассмотрением индивидуальных особенностей каждого события.

Волны зыби, возникшие вследствие прохождения тайфуна «Симарон» над акваторией Японского моря, вызвали микросейсмы первого рода, которые отчётливо выражены на данных лазерного деформографа и широкополосного сейсмометра (0.08–0.215 Гц). На частотах от 0.225 до 0.4 Гц регистрируются вторичные микросейсмические колебания, возникающие вследствие нелинейного взаимодействия встречных волн одинаковой частоты [2]. Такие колебания наиболее отчётливо зафиксированы в записях лазерного деформографа и сейсмометра (рисунок 2 (б, в)), тогда как в данных ЛИВДГ (рисунок 2 (а)) указанный частотный диапазон не содержит выраженного энергетического компонента. Спектры, представленные на рисунке 2 (г), подтверждают наличие выраженного энергетического максимума в диапазоне 0.08–0.215 Гц на всех приборах, а также проявление вторичных микросейсм в области 0.225–0.4 Гц на деформографе и сейсмометре.

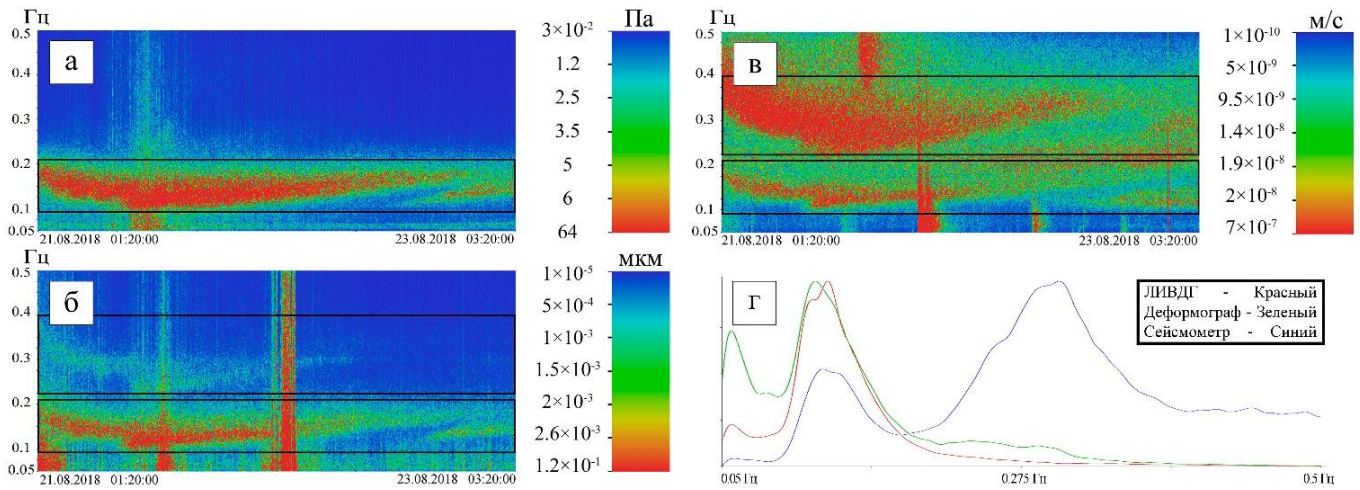


Рисунок 2. Динамические спектрограммы в период прохождения тайфуна «Симарон»: а) ЛИВДГ; б) лазерного деформографа; в) сейсмометра Guralp CMG-3ESP; г) спектры плотности мощности микросейсмических колебаний, зарегистрированных ЛИВДГ (красный), лазерным деформографом (зеленый) и сейсмометром (синий).

Во время прохождения тайфуна «Конг–Рэй» первичные (0.05–0.158 Гц) и вторичные (0.167–0.264 Гц) микросейсмические колебания отчётливо зарегистрированы всеми приборами, с доминированием вторичных в данных сейсмометра (рисунок 3).

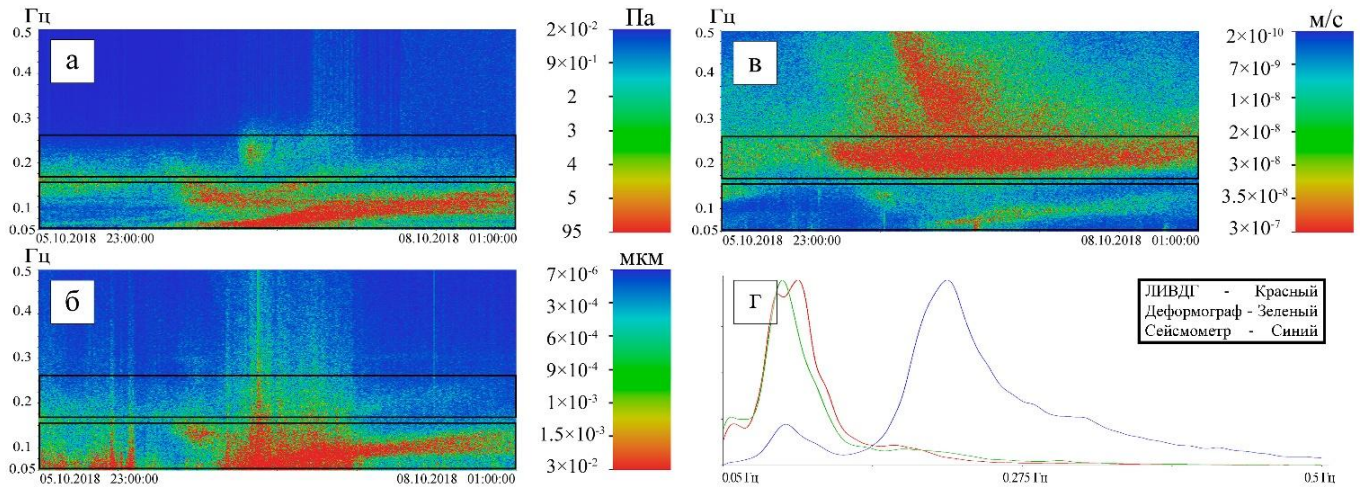


Рисунок 3. Динамические спектрограммы в период прохождения тайфуна «Конг–Рэй а) ЛИВДГ; б) лазерного деформографа; в) сейсмометра Guralp CMG-3ESP; г) спектры плотности мощности микросейсмических колебаний, зарегистрированных ЛИВДГ (красный), лазерным деформографом (зеленый) и сейсмометром (синий).

При умеренной интенсивности тайфуна «Хагупит» выявлены устойчивые первичные микросейсмы (0.11–0.212 Гц) и локальные вторичные (0.27–0.335 Гц), наиболее заметные на сейсмометре (рисунок 4).

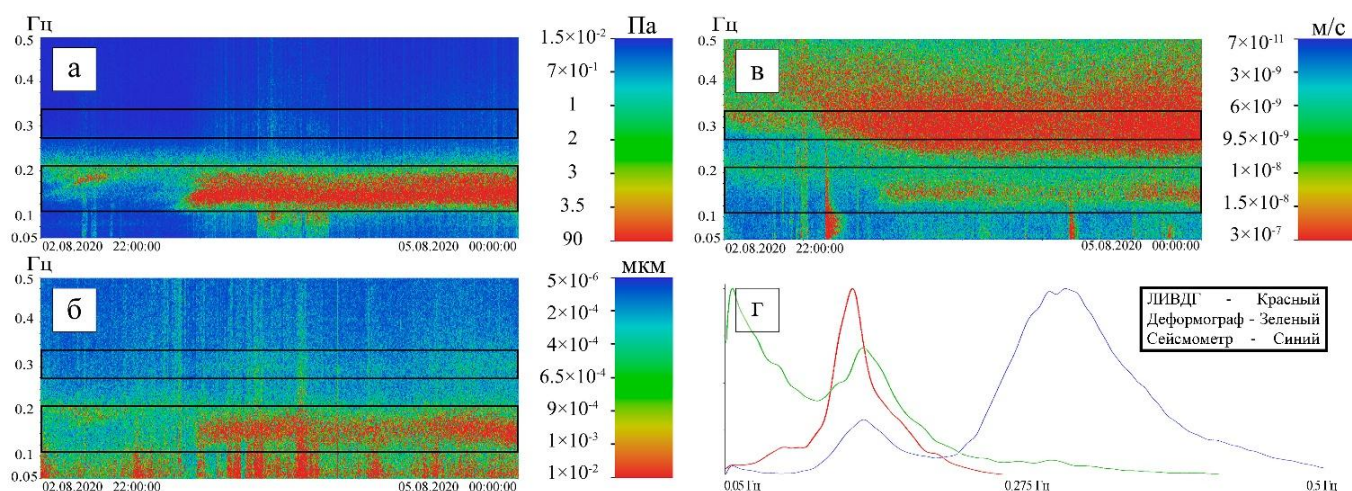


Рисунок 4. Динамические спектрограммы в период прохождения тайфуна «Хагупит»: а) ЛИВДГ; б) лазерного деформографа; в) сейсмометра Guralp CMG-3ESP; г) спектры плотности мощности микросейсмических колебаний, зарегистрированных ЛИВДГ (красный), лазерным деформографом (зеленый) и сейсмометром (синий).

В разделе 2.4 выполнен сравнительный анализ полученных спектральных характеристик и дана их физическая интерпретация с учётом механизмов генерации микросейсм и амплитудно–частотных свойств применяемых приборов. Установлено, что лазерный измеритель вариаций давления гидросферы наиболее эффективно регистрирует низкочастотные составляющие первичных микросейсм, тогда как лазерный деформограф устойчиво фиксирует как первичные, так и вторичные микросейсмические колебания. На записях широкополосного сейсмометра вторичные микросейсм проявляются более интенсивно вследствие особенностей регистрации скорости смещений среды. По результатам анализа показано, что лазерно–интерференционные приборы обеспечивают надёжную регистрацию микросейсмических колебаний в прибрежной зоне и могут использоваться для исследования параметров морского волнения в условиях штормовой активности [А6].

В третьей главе представлены результаты анализа фонового микросейсмического поля, зарегистрированного в прибрежной зоне Японского моря с использованием высокочувствительных лазерных деформографов. Целью главы было выявление и количественная оценка статистических характеристик фоновых колебаний в условиях минимальной внешней возмущённости.

В разделе 3.1 приводится описание используемых экспериментальных данных и критериев отбора временных интервалов, соответствующих условиям минимальной внешней возмущённости.

В разделе 3.2 рассматриваются методы статистической обработки микросейсмических временных рядов, включая построение плотностей вероятности, оценку моментов распределений и анализ формы амплитудных распределений.

Раздел 3.3 посвящён аппроксимации экспериментальных распределений с использованием нормального закона и рядов Грама–Шарлье [3], а также сравнению

точности различных подходов к описанию фонового микросейсмического поля при помощи процента объяснённой дисперсии [4]. Также анализируются взаимосвязи статистических характеристик между ортогональными компонентами регистрации и обсуждаются возможные физические причины выявленных различий. Приведены результаты статистической обработки сигналов. Для каждого фрагмента записей вычислены среднеквадратичное отклонение – σ , коэффициенты асимметрии – Sk и эксцесса – Ku (таблицы 1 и 2).

Таблица 1. Данные обработки для компоненты Север – Юг.

Файл №	Дата начала записи	Время (1 час), UTC	Средняя скорость ветра, м/с	σ (СЮ), мкм	Sk (СЮ)	Ku (СЮ)	Pe Гаусса (СЮ), %	Pe Грама–Шарлье (СЮ), %
1	07.06.2019	16:34:11	1.7	0.00006	0.074	2.10	97.3%	98.1%
2	25.06.2019	16:14:12	8.4	0.00021	-0.029	0.72	98.6%	98.7%
3	12.07.2019	16:09:22	1.1	0.00007	0.007	0.50	99.1%	99.2%
4	12.07.2019	20:09:23	1.7	0.00008	0.047	-0.22	99.1%	99.3%
5	12.07.2019	23:09:24	4.4	0.00013	-0.004	0.55	98.7%	99.3%
6	13.07.2019	16:09:30	5.1	0.00013	-0.068	2.65	97.2%	96.3%
7	14.07.2019	16:09:39	4.5	0.00008	-0.091	0.43	98.8%	99.2%
8	15.07.2019	13:09:46	3.2	0.00024	-0.051	1.14	97.9%	99.1%
9	17.07.2019	16:10:04	7.1	0.00013	0.097	0.39	98.7%	99.3%
10	20.07.2019	16:37:29	9.2	0.00044	0.118	2.30	87.5%	97.5%
11	24.07.2019	16:56:39	2.4	0.00007	-0.060	1.21	99.1%	98.3%
12	02.08.2019	06:10:06	5.5	0.00025	0.055	0.82	97.9%	99.1%
13	07.08.2019	16:11:02	8.5	0.00108	0.112	1.47	97.2%	98.9%
14	11.08.2019	16:11:39	4.6	0.00015	0.025	0.66	98.9%	99.5%
15	08.06.2020	16:17:16	1.5	0.00011	0.100	0.02	99.3%	99.4%
16	19.09.2020	19:49:27	4.5	0.00010	-0.124	1.74	95%	99.2%

Таблица 2. Данные обработки для компоненты Запад-Восток.

Файл №	Дата начала записи	Время (1 час), UTC	Средняя скорость ветра, м/с	σ (ЗВ), мкм	Sk (ЗВ)	Ku (ЗВ)	Pe Гаусса (ЗВ), %	Pe Грама-Шарлье (ЗВ), %
1	07.06.2019	16:34:11	1.7	0.00023	0.165	2.77	98%	95.2%
2	25.06.2019	16:14:12	8.4	0.00061	0.159	0.61	98.6%	98.7%
3	12.07.2019	16:09:22	1.1	0.00018	0.023	1.76	98.3%	98%
4	12.07.2019	20:09:23	1.7	0.00016	0.059	1.23	99%	98.6%
5	12.07.2019	23:09:24	4.4	0.00074	-0.200	0.96	97.3%	99.4%
6	13.07.2019	16:09:30	5.1	0.00065	-0.25	4.76	82.5%	92.7%
7	14.07.2019	16:09:39	4.5	0.00035	0.051	0.33	99%	99.1%
8	15.07.2019	13:09:46	3.2	0.00126	-0.022	1.42	97.6%	98.9%
9	17.07.2019	16:10:04	7.1	0.00041	0.111	1.34	98.8%	99%
10	20.07.2019	16:37:29	9.2	0.00317	-0.097	0.84	93.9%	97.1%
11	24.07.2019	16:56:39	2.4	0.00037	-0.017	2.79	97.3%	96.1%
12	02.08.2019	06:10:06	5.5	0.00124	-0.018	1.08	97.3%	99%
13	07.08.2019	16:11:02	8.5	0.00512	0.071	1.17	98.5%	99.1%
14	11.08.2019	16:11:39	4.6	0.00151	-0.318	1.56	96.7%	98.9%
15	08.06.2020	16:17:16	1.5	0.00022	-0.285	0.91	97.9%	98.7%
16	19.09.2020	19:49:27	4.5	0.00077	0.008	1.3	97.7%	99%

Построены плотности вероятности (рисунок 5) с аппроксимацией распределений Гаусса и Грама-Шарлье.

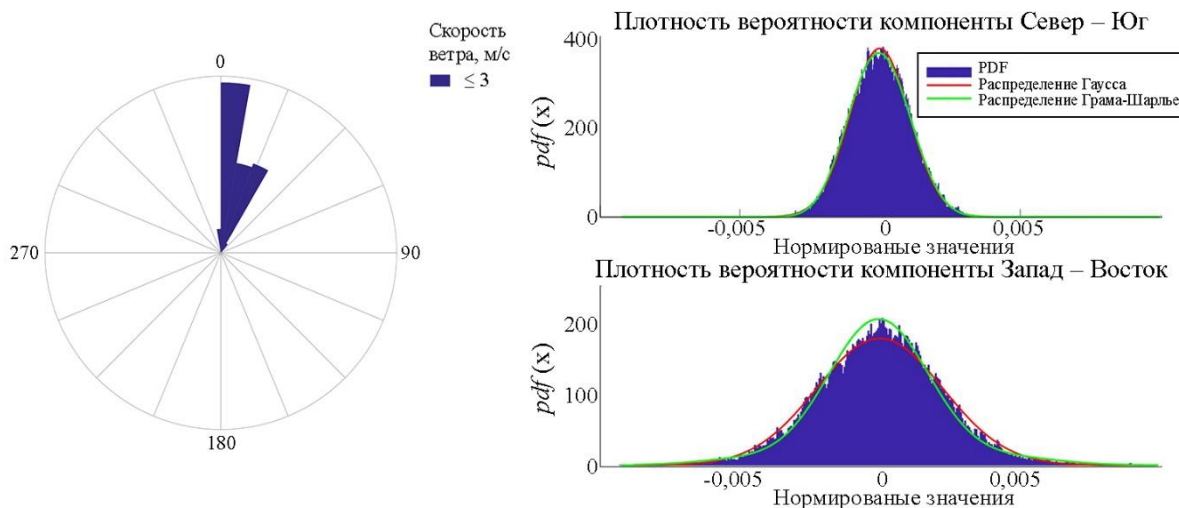


Рисунок 5. Плотность вероятности нормированных значений сигнала с двух деформографов, ориентированных в направлениях Север-Юг и Запад-Восток. 12.07.2019 в период времени с 20:09:23 по 21:09:23.

В большинстве случаев положительный эксцесс ($Ku > 0$) указывает на «тяжёлые хвосты» распределений, что может быть связано с нестационарными волновыми возмущениями, включая волны-убийцы [5]. Корреляционный анализ показал высокую корреляцию среднеквадратичного отклонения – σ между компонентами ($R^2 \approx 0.9$) и низкую корреляцию коэффициентов асимметрии и эксцесса, что отражает различную реакцию компонент на локальные возмущения (рисунок 6).

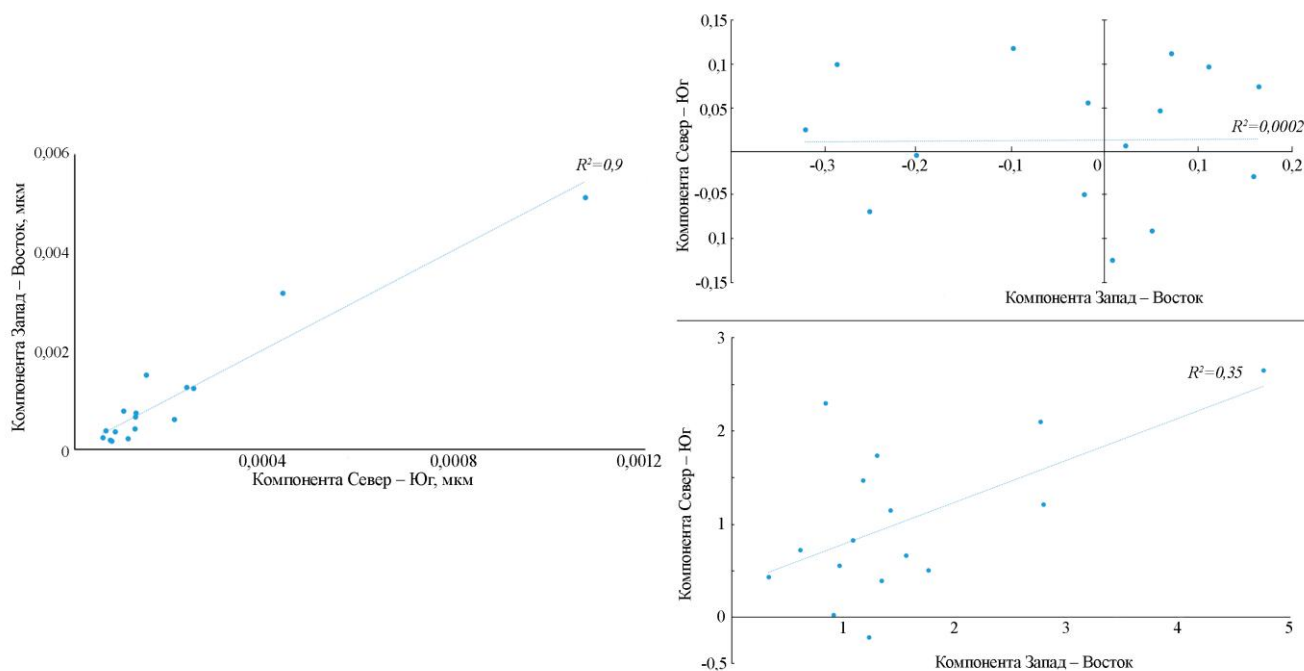


Рисунок 6. График корреляции среднеквадратичного отклонения (а), асимметрии (б) и эксцесса (в) для компонент Север–Юг и Запад–Восток.

В разделе 3.4 сформулированы выводы. Показано, что амплитудные распределения фоновых микросейсм часто отклоняются от нормального закона и лучше описываются распределением Грамма–Шарлье. Высокая согласованность σ между компонентами подтверждает общий источник возбуждения – морское волнение, тогда как параметры формы распределения менее согласованы. Полученные результаты целесообразно использовать для алгоритмов выделения слабых геофизических сигналов и моделирования фонового микросейсмического поля в прибрежных районах [А7].

Четвертая глава посвящена спектральному и статистическому исследованию микросейсмических колебаний, зарегистрированных в прибрежной зоне Японского моря в периоды прохождения тайфунов различной интенсивности. Анализ выполнен на основе натурных данных лазерно–интерференционных измерительных систем, включая два лазерных деформографа с ориентацией по направлениям Север–Юг и Запад–Восток, ЛИВДГ, а также широкополосного сейсмометра. Особое внимание уделено исследованию структуры сигналов, регистрируемых лазерными деформографами, и выявлению закономерностей изменения статистических характеристик микросейсмического поля.

Раздел 4.1 посвящён описанию пяти тайфунов – «Соулик» (2018), «Конг–Рэй» (2018), «Хагупит» (2020), «Чондари» (2024) и «Санба» (2012), проходивших через территорию Корейского полуострова и далее на акваторию Японского моря. Приводятся траектории их движения (рисунок 7), метеорологические условия в точке измерений, а также описание исходных данных, используемых измерительных систем и методики обработки сигналов.

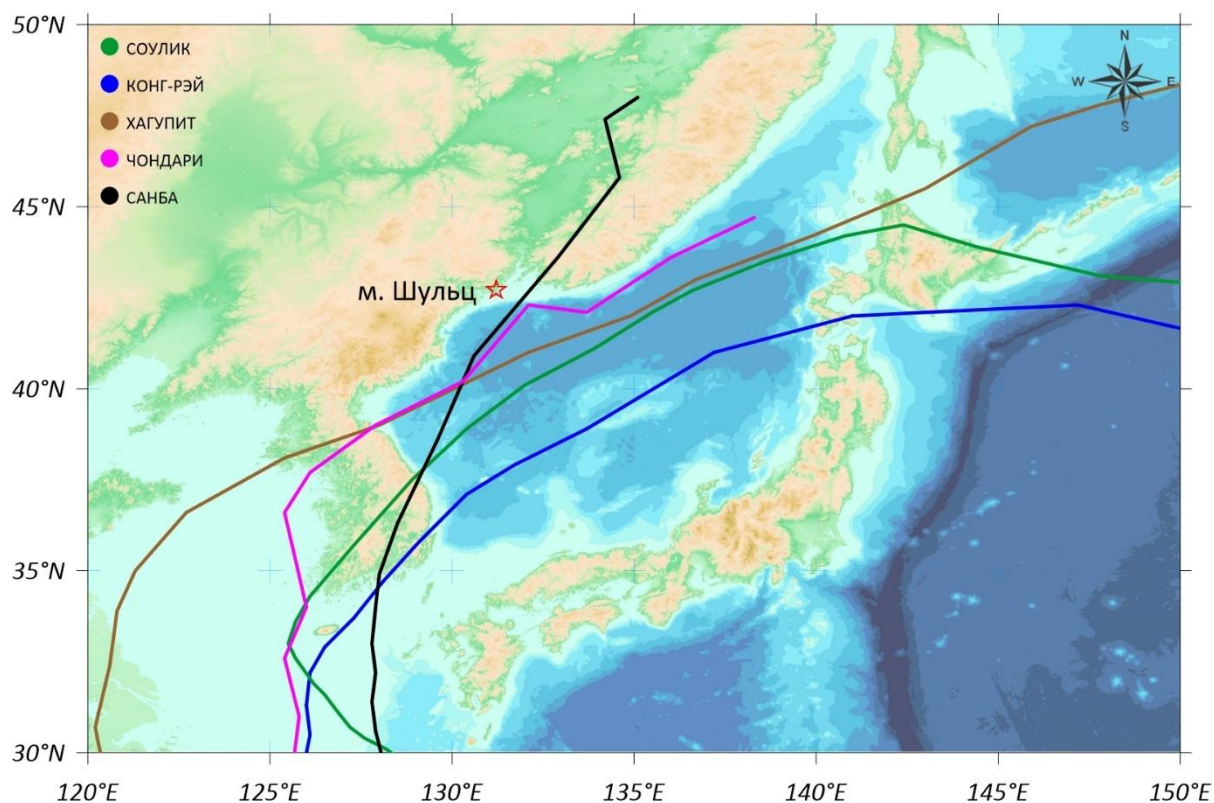


Рисунок 7 Траектории движения тайфунов «Соулик», «Конг-Рэй», «Хагупит», «Чондари» и «Санба».

В разделе 4.2 выполняется анализ сигналов и их динамических спектрограмм, зарегистрированных в периоды прохождения указанных тайфунов. Для всех рассмотренных событий установлено, что в период выхода тайфунов с Корейского полуострова и последующего их движения над акваторией Японского моря наблюдается существенное увеличение амплитуды микросейсмических колебаний, сопровождающееся усилением энергии в характерном диапазоне периодов. Как показано на примере тайфуна «Конг-Рэй» (рисунок 8), динамические спектрограммы лазерных деформографов демонстрируют устойчивое увеличение спектральной плотности энергии не только в диапазоне периодов 6–12 с, типичном для вторичных микросейсмических колебаний штормового происхождения, но и в более низкочастотной области – в диапазоне периодов 16–20 с.

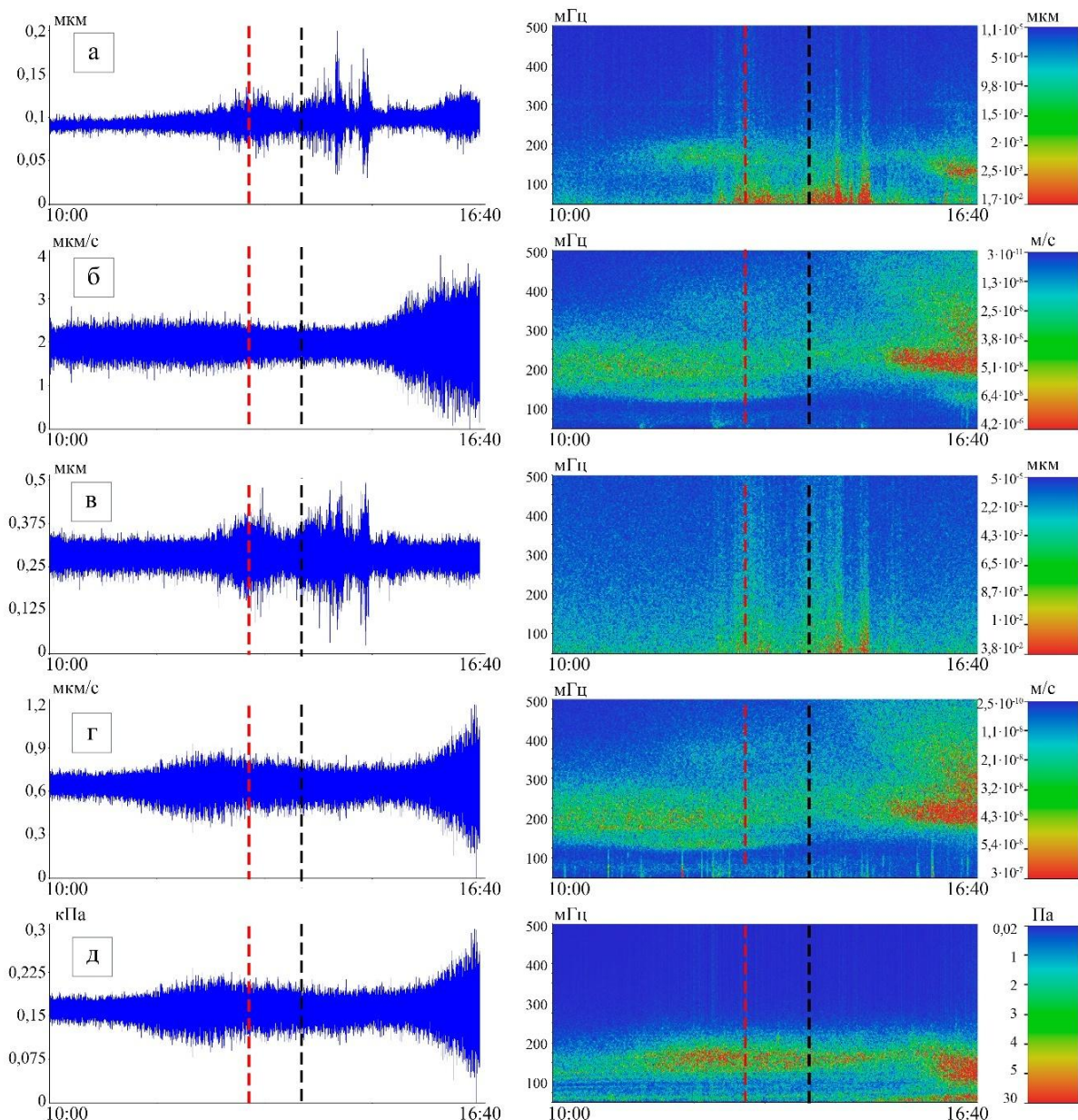


Рисунок 8 Фрагменты записей приборного комплекса в период прохождения тайфуна «Конг–Рэй», проходившего в период: 05.10.2018 10:00 – 06.10.2018 16:40(UTC). На рисунке отмечены: (а) – сигнал и динамическая спектрограмма компоненты деформографа по направлению Север–Юг, (б) – сигнал и динамическая спектрограмма сейсмометра по направлению Север–Юг, (в) – сигнал и динамическая спектрограмма компоненты деформографа Запад–Восток, (г) – сигнал и динамическая спектрограмма сейсмометра по направлению Запад–Восток, (д) – сигнал и динамическая спектрограмма ЛИВДГ. Момент входа тайфуна на территорию Корейского полуострова – 06.10.2018 00:00 (красный пунктир), момент выхода на акваторию Японского моря – 06.10.2018 04:00 (чёрный пунктир).

При этом важно отметить, что данный длиннопериодный максимум не регистрировался лазерным измерителем вариаций давления гидросферы, что исключает его прямую связь с волновыми процессами в гидросфере. Аналогичная особенность проявляется в записях других рассмотренных тайфунов, что позволяет рассматривать её как устойчивую характеристику отклика среды на мощное атмосферное

воздействие в данном регионе. Исходя из факта отсутствия колебаний периодами 16–20 с в записях ЛИВДГ, можно предположить, что данный диапазон не связан напрямую с гидродинамическими процессами на акватории, а вызван собственными колебаниями какой-то части Корейского полуострова, возможно минигеоблоком достаточно большой добротности, период колебаний которого незначительно изменяется в зависимости от величины воздействия внешней силы или от вариаций упругих параметров внешней среды зоны расположения минигеоблока.

Раздел 4.3 посвящён статистическому анализу сигналов, зарегистрированных лазерными деформографами в периоды штормовой активности. Исследуются распределения плотности вероятности и их отклонения от нормального закона, а также особенности формирования хвостов функции распределений. Показано, что после нормировки данных деформографа, среднеквадратичное отклонение распределения для различных штормовых событий имеют универсальную форму. Установлено, что хвосты распределений хорошо аппроксимируются экспоненциальной зависимостью, а параметр экспоненциального убывания хвостов связан с эксцессом распределения деформаций.

Для каждого события построены распределения плотности вероятности деформаций и их нормированные аналоги. Установлено, что центральная часть всех полученных распределений аппроксимируется гауссовской кривой, тогда как края распределений демонстрируют существенное отклонение от нормального закона, проявляющееся в формировании «тяжёлых хвостов» [6].

С целью количественного описания структуры хвостов распределений применена экспоненциальная аппроксимация вида:

$$p(z) \sim \exp(-\lambda z),$$

где $z = \varepsilon/\sigma$ –нормированная деформация, λ –параметр, характеризующий скорость убывания вероятности экстремальных событий [7]. Аппроксимация выполнялась отдельно для правого ($z > 3$) и левого ($z < -3$) хвостов в полулогарифмических координатах методом линейной регрессии. На примере тайфуна «Конг-Рэй» (рисунок 9) показано, что хвосты распределений для обеих ортогональных компонент деформографов удовлетворительно описываются экспоненциальным законом; численные значения параметра λ для направлений Север–Юг и Запад–Восток различаются, что указывает на анизотропию статистических характеристик поля микродеформаций.

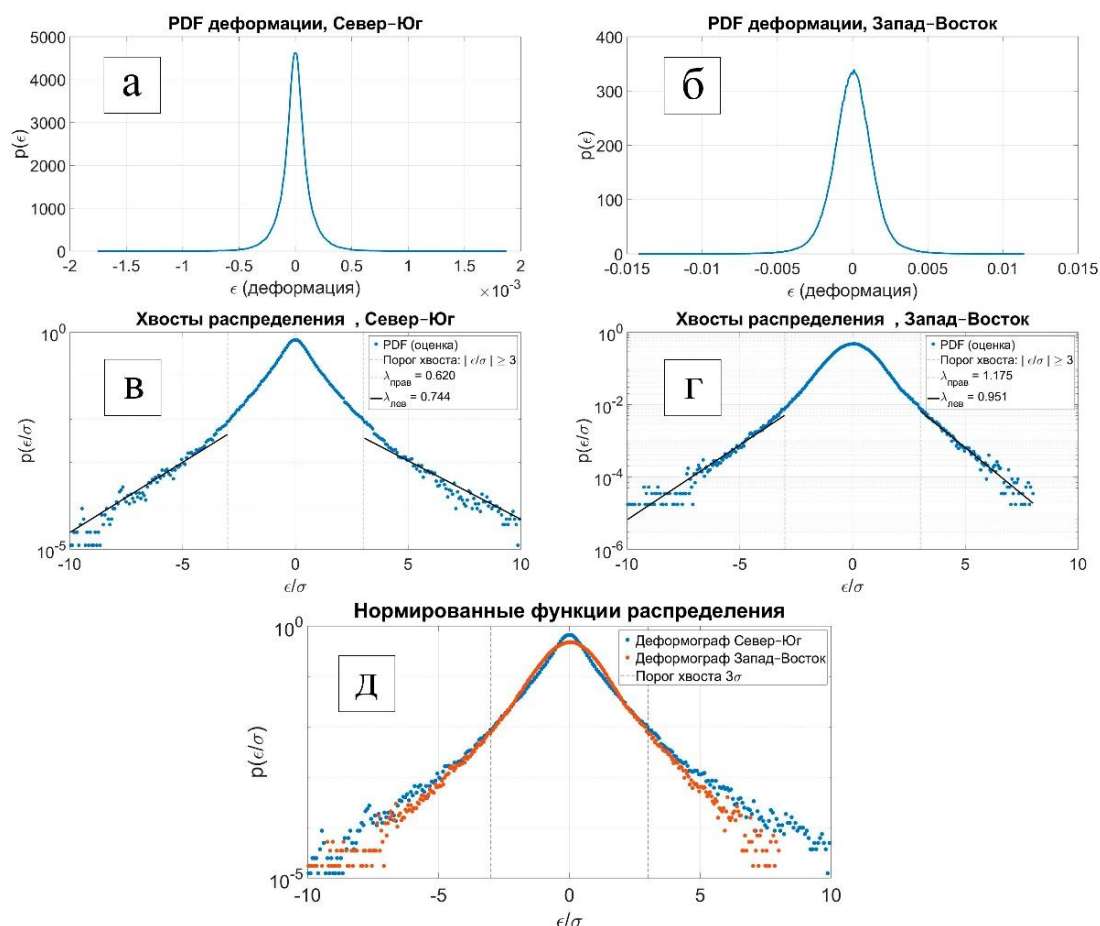


Рисунок 9. Статистические характеристики деформаций, зарегистрированных в период прохождения тайфуна «Конг-Рэй». а – распределение плотности вероятности деформаций для компоненты деформографа Север-Юг, б – распределение плотности вероятности деформаций для компоненты Запад-Восток, в – хвосты распределения плотности вероятности нормированных деформаций $p(\epsilon/\sigma)$ для компоненты Север-Юг в полулогарифмических координатах, г – хвосты распределения для компоненты Запад-Восток, д – сравнение нормированных распределений плотности вероятности для обеих компонент.

Сравнительный анализ нормированных распределений для всех рассмотренных тайфунов (таблица 3) выявил их универсальную форму: независимо от интенсивности события и траектории его движения все кривые демонстрируют идентичную структуру с экспоненциальным характером спада хвостов. Данный результат свидетельствует о существовании общего механизма формирования статистических свойств микросейсмического поля в условиях штормового волнения.

Таблица 3. Статистические характеристики распределений деформаций, зарегистрированных лазерными деформографами в период прохождения тайфунов

Тайфун	Компонента деформографа	σ (СКО деформации)	Экссес Ku	$\lambda_{прав}$	$\lambda_{лев}$	$\lambda_{ср}$
Соулик	Север-Юг	4.75×10^{-4}	10.56	0.63	0.62	0.63
	Запад-Восток	2.5×10^{-3}	4.42	1.19	0.86	1.02
Конг-Рэй	Север-Юг	1.43×10^{-4}	8.71	0.62	0.74	0.68

	Запад–Восток	1.42×10^{-3}	3.19	1.17	0.95	1.06
Хагупит	Север–Юг	2.72×10^{-4}	23.07	0.43	0.42	0.42
	Запад–Восток	1×10^{-3}	17.96	0.65	0.69	0.66
Чондари	Север–Юг	3.98×10^{-4}	13.41	0.5	0.68	0.59
	Запад–Восток	2.66×10^{-4}	7.31	0.92	0.72	0.82
Санба	Север–Юг	1.05×10^{-3}	14.21	0.74	0.66	0.7
	Запад–Восток	3.73×10^{-3}	31.41	0.54	0.46	0.5

На заключительном этапе исследована количественная взаимосвязь между формой распределения и его статистическими характеристиками. Построена зависимость параметра экспоненциального спада λ от коэффициента эксцесса Ku для компонент деформографов Север–Юг и Запад–Восток (рисунок 10).

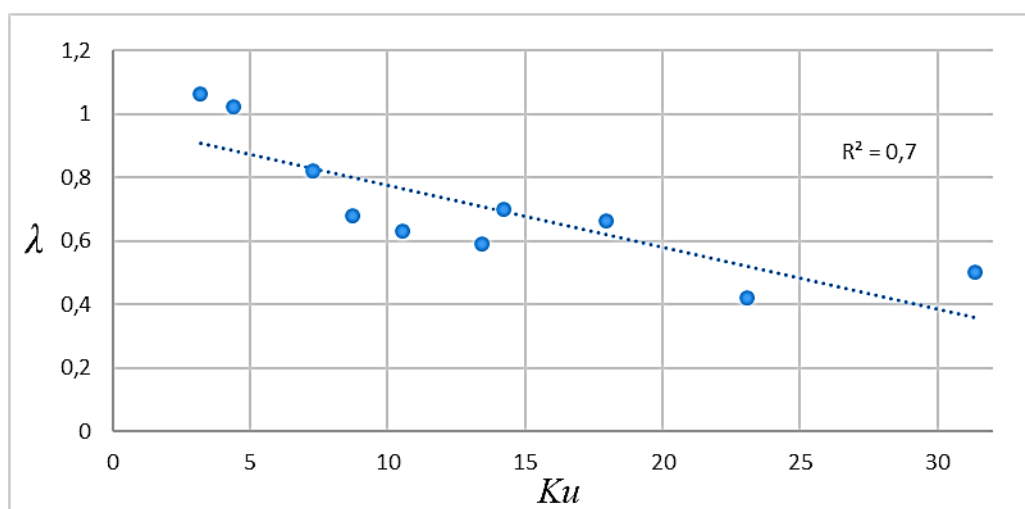


Рисунок 10. Зависимость параметра экспоненциального спада хвостов распределения λ от коэффициента эксцесса распределения деформаций Ku для обеих компонент деформографа.

Полученные регрессионные зависимости $\lambda(Ku)$ являются линейными, что подтверждает гипотезу о единой природе формирования аномальной статистики микродеформаций, обусловленной нелинейными процессами взаимодействия морского волнения с земной корой в прибрежной зоне.

Заключение.

В заключении приведены основные результаты выполненного исследования микросейсмических колебаний в прибрежной зоне Японского моря, основанного на анализе данных лазерно–интерференционных измерительных систем и сейсмометрических наблюдений. Установлено, что спектральная структура микросейсмического поля определяется взаимодействием морского волнения с донной поверхностью и верхними слоями земной коры, а характеристики микросейсмических колебаний существенно зависят от параметров волнения и штормовой активности. По результатам анализа записей, зарегистрированных в периоды прохождения тайфунов, показано формирование как первичных, так и вторичных микросейсмических колебаний. Установлено, что первичные микросейсмы устойчиво регистрируются в диапазоне частот 0.05–0.215 Гц, тогда как вторичные микросейсмические колебания проявляются в более высокочастотной области спектра и характеризуются значительным энергетическим вкладом. С помощью сравнительного анализа записей лазерного измерителя вариаций давления гидросферы, лазерных деформографов и широкополосного сейсмометра установлены особенности регистрации микросейсмических колебаний различными типами измерительных систем. Показано, что лазерный измеритель вариаций давления гидросферы эффективно регистрирует низкочастотные вариации давления, соответствующие первичным микросейсам, тогда как лазерные деформографы и сейсмометр обеспечивают устойчивую регистрацию как первичных, так и вторичных микросейсмических колебаний.

В результате статистического анализа фонового микросейсмического поля установлено, что распределения микросейсмических колебаний отклоняются от нормального закона и характеризуются наличием «тяжёлых хвостов». Показано, что распределение Грама–Шарлье обеспечивает более точное описание экспериментальных данных по сравнению с нормальным распределением. Установлено, что среднеквадратичные отклонения сигналов в ортогональных направлениях обладают высокой степенью корреляции, что свидетельствует о наличии общего источника возбуждения микросейсмического фона, связанного с морским волнением.

По результатам анализа микросейсмических колебаний в периоды прохождения тайфунов через территорию Корейского полуострова установлено существенное перераспределение энергии спектра и усиление колебаний в диапазоне периодов 16–20 с. Показано, что данные колебания не регистрируются лазерным измерителем вариаций давления гидросферы, что позволяет предположить их связь с собственными колебаниями отдельных геологических структур Корейского полуострова. Установлено, что статистические распределения деформаций в периоды штормовых воздействий обладают выраженной негауссовской природой и характеризуются устойчивыми экспоненциальными хвостами. Получено, что вероятность экстремальных отклонений описывается экспоненциальной зависимостью, а параметры спадания хвостов распределений для различных тайфунов изменяются в ограниченном диапазоне, что свидетельствует о наличии универсальных закономерностей формирования микросейсмического поля.

Цитированная литература

1. Japan Meteorological Agency // [Электронный ресурс]. URL: <https://www.jma.go.jp/jma/indexe.html> (дата обращения: 15.07.2025).
2. Tanimoto T., Anderson A. Seismic noise between 0.003 Hz and 1.0 Hz and its classification // *Prog. Earth Planet. Sci.* 2023. Vol. 10, № 1. P. 56.
3. Сайфуллин Р. Т. Бочкарев А.В. Вычисление коэффициентов асимметрии и эксцесса хроматографических пиков с применением функций Чебышева–Эрмита и рядов Грамма–Шарлье // *Вестник СамГТУ. Серия: Технические науки.* 2020. Т. 28, № 4 (68). С. 89–105.
4. Montgomery D., Runger G. *Applied Statistics and Probability for Engineers.* 5th ed. // Wiley, 2010. 784 p.
5. Slunyaev A. V., Pelinovsky D.E., Pelinovsky E.N. Rogue waves in the sea: observations, physics and mathematics // *Physics Uspekhi.* 2023. Vol. 66, № 2. P.148–172.
6. Taleb N. N. *Statistical Consequences of Fat Tails: Real World Preasymptotics, Epistemology, and Applications* // *Stem Academic Pr.*, 2020, p. 441.
7. Thoroddsen S.T., Van Atta C.W. Exponential tails and skewness of density– gradient probability density functions in stably stratified turbulence // *J. Fluid Mech.* 1992. Vol. 244. P. 547–566.

Список публикаций

- A1. Иванов М.П., Долгих С.Г. Расчет коэффициента преобразования натуральных данных лазерного измерителя вариаций давления гидросферы // *Фотоника = PHOTONICS RUSSIA.* –2023. –Т. 17, № 6. –С. 462–473. DOI: 10.22184/1993–7296.FRos.2023.17.6.462.472
- A2. Dolgikh G., Dolgikh S., Ivanov M.P. Verification of Data from Supersensitive Detector of Hydrosphere Pressure Variations // *Sensors.* –2023. –Vol. 23, Iss. 15. –Art.no. 6915. DOI: 10.3390/s23156915
- A3. Dolgikh G., Budrin S., Dolgikh S., Bolsunovskii M., Ivanov M.P. Planetary laser interferometric seismoacoustic observatory // *Sensors.* –2025. –Vol. 25, Iss. 1. –Art.no. 48. DOI: 10.3390/s25010048
- A4. Dolgikh G., Bolsunovskii M., Budrin S., Dolgikh S., Ivanov M.P., Ovcharenko V., Pivovarov A., Samchenko A., Chupin V., Yaroshchuk I. Transformation Of Hydroacoustic Energy Into Seismoacoustic Energy At 22 Hz In Medium–Depth And Deep Sea Conditions // *Applied Sciences.* –2025.–Vol. 15, Iss. 1. –Art.no. 267. DOI: 10.3390/app15010267
- A5. Долгих Г.И., Антонов В.А., Болсуновский М.А., Будрин С.С., Долгих С.Г., Иванов М.П., Овчаренко В.В., Чупин В.А., Швец В.А, Яковенко С.В. Комплексный подход к исследованиям геосферных волновых процессов // *Экологические системы и приборы.* – 2025. –№ 11. –С. 31–41. DOI: 10.25791/esip.11.2025.1556

A6. Dolgikh G.I., Budrin S.S., Dolgikh S.G., Ivanov M.P. Microseismic motion as affected by a typhoon // *Journal of Volcanology and Seismology*. –2025. –Vol. 19, Iss. 6. –P. 564–571. DOI: 10.1134/S0742046325700307

A7. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Иванов М.П., Пелиновский Е.Н., Талипова Т.Г. Статистические характеристики фонового поля микросейсмических колебаний // *Морской гидрофизический журнал*. –2025. –Т. 41, № 5. –С. 611–630.

Научное издание

Иванов Михаил Павлович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук на тему:

Статистические характеристики микросейсмических колебаний, вызванных
штормовой активностью

Подписано в печать «19» июня 2026 г.

Формат 60 × 90 1/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано с авторского оригинал-макета в ТОИ ДВО РАН

690041, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43.