

На правах рукописи



Болсуновский Михаил Алексеевич

Геосферное взаимодействие в инфразвуковом диапазоне

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 Григорий Иванович**
д.ф.-м.н., академик РАН, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория 2/5 физики геосфер, ФГБУН 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)

Ковалев Дмитрий Петрович
д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, лаборатория волновой динамики и прибрежных течений, заместитель директора по научной работе, ФГБУН Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ФГБУН ИМГиГ ДВО РАН)

Ведущая организация: Департамент наук о Земле Института Мирового океана Дальневосточного федерального университета (ФГАОУ ВО ДВФУ)

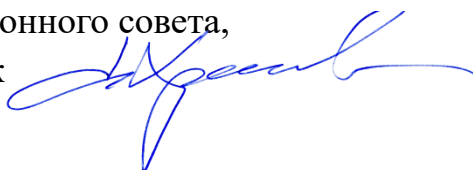
Защита состоится «19» июня 2026 г. в 13:00 на заседание диссертационного совета 24.1.214.02 при ФГБУН Тихоокеанском океанологическом институте им. В.И. Ильичева ДВО РАН по адресу: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, д. 43.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТОИ ДВО РАН, а также на сайте института по адресу: <https://www.poi.dvo.ru/ru/node/2814>.

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.

Исследование геосферного взаимодействия представляет собой ключевое направление в изучении волновых процессов и колебаний природных сред. Как антропогенные, так и природные явления оказывают прямое или косвенное воздействие на различные геосферы: порождая колебания в одной из них, они инициируют их распространение и трансформацию при переходе в другие геосферы. В частности, интенсивные атмосферные колебания способны вызывать колебания уровня моря и вызывать различные явления, например, метеоцунами. В этой связи принципиально важно не только фиксировать сами колебания, но и устанавливать их первоисточник.

Особую значимость приобретает изучение геосферных процессов, сопряжённых с катастрофическими природными явлениями, так-как они оказывают большое влияние на окружающую среду и жизнь человека. Изучение гидросферных, атмосферных и литосферных процессов, связанных с катастрофическими явлениями, позволяет определить природу возникновения регистрируемых различными приборами колебаний, а также предсказать их последствия. К таким катастрофическим процессам надо отнести землетрясения, цунами, метеоцунами, тайфуны, катастрофические шторма и, конечно, взрывные извержения вулканов.

Степень разработанности темы исследования.

Теоретической основой выполненных в рамках данной работы исследований послужили работы отечественных и зарубежных авторов по исследованию состояния и колебаний литосферы, гидросферы и атмосферы.

В основу экспериментальной базы исследования состояния литосферы и атмосферы легли данные многолетних записей лазерных деформографов и лазерного нанобарографа, расположенных на морской экспериментальной станции (МЭС) «м. Шульца». А в основу экспериментальной базы исследования состояния гидросферы и ионосферы — данные сетей морских уровнемерных станций и сетей приемников глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС/GNSS), входящих в международную сеть International GNSS Service (IGS), и приемников, расположенных на территории Приморского края.

Настоящая диссертация является законченным научным исследованием, в котором описаны геосферные возмущения, природа их возникновения и их первоисточники.

Цели и задачи диссертационной работы.

Целью работы является изучение механизмов воздействия атмосферных возмущений, вызванных катастрофическими и не катастрофическими природными процессами и явлениями, на гидросферу и литосферу, а также определение первоисточников зарегистрированных геосферных возмущений.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- 1) Обработаны записи лазерного нанобарографа, лазерных деформографов, ГНСС-данных ионосферы, данных морских уровнемерных станций;
- 2) Проанализированы результаты обработки данных лазерного нанобарографа, лазерных деформографов и ГНСС-данных ионосферы;
- 3) Проанализированы данные морских уровнемерных станций;
- 4) Сравнены результаты обработки данных морских уровнемерных станций с ГНСС-данными ионосферы;
- 5) Выполнена интерпретация полученных результатов.

Научная новизна.

1. Лазерными деформографами, установленными на МЭС «м. Шульца», не зафиксировано возмущение, прошедшее по земной коре от места мощного взрывного извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, случившегося 15 января 2022 года в 04:02 по всемирному координированному времени (UTC), до места расположения данных установок. По синхронным данным лазерного нанобарографа (установленного на МЭС «м. Шульца») и ГНСС-данным ионосферы были обнаружены атмосферные возмущения, достигшие МЭС «м. Шульца». На записях лазерного нанобарографа и двух лазерных деформографов с ориентацией измерительных плеч «север-юг» и «запад-восток» зафиксирован импульс, пришедший по атмосфере от места взрывного извержения вулкана, и который воздействовал на земную кору в месте расположения данных измерительных систем.

2. По данным морских уровнемерных станций, расположенных в Тихом океане и в Японском море, было установлено, что колебания уровня моря, зафиксированные после мощного взрывного извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, не являются колебаниями, вызванными распространением классического цунами от места расположения вулкана, а обусловлены метеоцунами, возбужденными в конкретных районах Тихого океана мощным атмосферным импульсом, движущимся в атмосфере со скоростью, близкой к скорости звука в воздухе, которая значительно превышает вероятную скорость волны классического цунами.

3. По данным морских уровнемерных станций и ГНСС-данным ионосферы обнаружены гидросферные и ионосферные колебания с совпадающими значениями периодов.

4. Исследован комплекс геосферных возмущений, связанных с уникальным явлением, – взрывным извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 года в 04:02 UTC, сопоставимым по мощности взрыва с взрывным извержением вулкана Кракатау в 1883 г.

Теоретическая и практическая значимость

В условиях постоянного возникновения природных и антропогенных процессов и явлений исследование физических законов, их вызывающих, сохраняет высокую актуальность. Это обусловлено тем, что эти процессы напрямую влияют на состояние окружающей среды и качество жизни человека. Одним из ключевых направлений в этой области выступает изучение геосферных процессов различных частотных диапазонов, особенно инфразвукового диапазона. Регистрация и анализ геосферных колебаний позволяют лучше понять по каким физическим законам происходит развитие этих процессов, а также какие последствия стоит ожидать при возникновении катастрофических явлений. При этом нередко данных о состоянии лишь одной геосферы оказывается недостаточно для полного исследования механизмов волновых процессов. Расширение комплекса научно-технического оборудования и разработка современных методов обработки данных позволяют решать данную проблему.

Методология и методы исследования

Для решения поставленных задач необходимо использование комплекса современного научно-технического оборудования и развитые сети международных и российских морских уровнемерных станций и ГНСС-станций. При обработке и анализе данных необходимо использование современных методов фильтрации данных, для выявления колебаний в определенных диапазонах периодов, а также применение современных методов спектрального и статистического оценивания.

Для обработки ГНСС-данных использовались программные обеспечения "tec-suite" и "Viewtecs". Для обработки данных деформографов, нанобарографа и уровнемерных станций использовалось программное обеспечение "Deformograph". Для анализа и визуализации данных использовались программные обеспечения "MATLAB", "Generic Mapping Tools" и "Excel".

Для получения информации о состоянии ионосферы, необходимой для обработки ГНСС-данных, были использованы данные о состоянии геомагнитной обстановки Потсдамского центра имени Гельмгольца, а также данные модели ионосферы IRI2016.

Положения, выносимые на защиту

1. Одновременная регистрация лазерным нанобарографом и лазерным деформографом аномальных атмосферных возмущений, вызванных мощным взрывным извержением вулкана, позволила не только установить среду распространения этих возмущений от вулкана до места их регистрации, но и оценить уровень нагружающего воздействия атмосферных процессов инфразвукового диапазона на земную кору.

2. Результаты обработки данных морских уровнемерных станций позволили установить факт возбуждения метеоцунами в местах расположения морских уровнемерных станций, а также описать механизм их возбуждения мощным атмосферным импульсом, движущимся в атмосфере со скоростью в несколько раз больше скорости вероятной волны цунами над морскими уровнемерными станциями Тихого океана и Японского моря.

3. Установленное совпадение периодов инфразвуковых колебаний водной поверхности, полученных при обработке данных уровнемерных станций в «спокойные»

интервалы наблюдений, и собственных колебаний атмосферы конкретных областей, полученных при обработке ГНСС-данных, позволило определить первоисточник этих возмущений, ярко проявляющихся в колебаниях ионосферного слоя.

Степень достоверности и апробации результатов

Полученные результаты работы основаны на результатах обработки данных комплекса различных видов научно-технического оборудования, что позволило изучить описанные в работе явления в разных геосферах и их влияние на смежные геосферы. Многолетний опыт соавторов публикаций по материалам данной работы, научного руководителя Долгих Григория Ивановича, а также различные монографии и научные публикации по теме исследования, позволили выполнить интерпретацию описываемых в работе явлений и сформулировать выводы. Существующие математические методы обработки данных, фильтрация, спектральный и статистический анализ позволили выполнить сравнение результатов, полученных при анализе состояния геосфер.

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на различных научных семинарах и следующих научных конференциях:

Конгресс молодых ученых Беларуси и России, 27–31 марта 2023 г., Минск, Беларусь;

X конференция молодых учёных «Океанологические исследования», 24–28 апреля 2023 г., Владивосток, Россия;

XIII Всероссийский симпозиум «Физика геосфер», 11–15 сентября 2023 г., Владивосток, Россия;

XI Всероссийская конференция молодых учёных с международным участием «Океанологические исследования», 26–30 мая 2025 г., Владивосток, Россия.

XIV Всероссийский симпозиум «Физика геосфер», 8–13 сентября 2025 г., Владивосток, Россия.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 7 статьях в научных рецензируемых журналах, из которых 6 входят в перечень ВАК, а также опубликовано 6 тезисов и материалов конференций.

Личный вклад авторов

Автор самостоятельно выполнил большой объем обработки данных, используемых в данной работе, совместно с научным руководителем Григорием Ивановичем Долгих сформулировал цели, задачи и положения, выносимые на защиту. Автор совместно с соавторами научных публикаций по материалам данной работы выполнил анализ и объяснение полученных результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, и библиографии. Общий объем диссертации 101 страница, из них 77 страниц текста, включая 64 рисунка. Библиография включает 99 наименований на 12 страницах.

Благодарности

Автор выражает благодарность научному руководителю в ТОИ ДВО РАН академику РАН, профессору д.ф.-м.н. Долгих Григорию Ивановичу за вклад в формирование научных навыков исследования геосферных процессов. Автор выражает благодарность научному руководителю в ДВФУ директору департамента мониторинга и освоения георесурсов к.т.н. доценту Шестакову Николаю Владимировичу в формировании научных навыков исследования состояния ионосферы. Автор выражает благодарность коллективу лабораторий физики геосфер (2/1) и нелинейной гидрофизики и природных катастроф (2/5) ТОИ ДВО РАН за помощь в обработке и получении экспериментальных данных лазерных деформографов и лазерного нанобарографа.

Автор выражает благодарность АО «ПРИН», ООО «АЭРОФОТОПРОМ», ООО «Меридиан», ИПМ ДВО РАН и ДВФУ за ГНСС-данные по используемым в анализе ГНСС-станциям на территории Приморского края и признателен научному сотруднику ИСЗФ СО РАН, к.ф.-м.н. Воейкову С.В. за предоставление программного обеспечения Viewtecs.

Содержание работы

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

В **первой главе** приводится обзор и описание измерительных средств, входящих в атмосферно-гидросферно-литосферный комплекс, используемых для мониторинга и зондирования геосфер, приводится обзор литературы по теме исследования. В **разделе 1.1** описываются ГНСС, описывается изучаемая с помощью этих систем ионосфера, приведен алгоритм получения значений полного электронного содержания (ПЭС/ТЕС) из ГНСС-данных. В **разделах 1.2 и 1.3** описываются лазерные деформографы и лазерный нанобарограф (соответственно), разработанные и созданные в ТОИ ДВО РАН. В **разделе 1.4** описаны средства, используемые для изучения колебаний уровня моря. В **разделе 1.5** кратко описаны основные процессы взаимодействия геосфер и приводится описание явления метеоцунами.

Материалы главы, посвященные планетарному лазерно-интерферометрическому сейсмоакустическому комплексу деформографов и межгеосферному взаимодействию в гравитационном и инфрагравитационном диапазонах, представлены в работах [А1-А5].

Во **второй главе** рассматривается регистрация катастрофических природных явлений на примере мощного взрывного извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, произошедшего 15 января 2022 г. в 04:02 UTC. Описанная в главе регистрация выполнена с помощью сети ГНСС-станций, расположенных в направлении от вулкана в сторону Приморского края (включая станции Приморского края), и двух лазерных деформографов и лазерного нанобарографа, расположенных на МЭС «м. Шульца».

По ГНСС-данным были получены характеристики ионосферных возмущений над Приморским краем, а также получена динамика распространения ионосферных возмущений от вулкана на расстоянии ~11000 км в направлении к Приморскому краю.

С использованием двух лазерных деформографов и лазерного нанобарографа удалось установить, что прихода возмущений от вулкана до МЭС «м. Шульца» по земной коре не было. Были обнаружены атмосферные возмущения, одновременно зафиксированные на записях лазерного нанобарографа и лазерных деформографов,

которые вызваны атмосферным импульсом, распространяющимся от места взрывного извержения вулкана до места расположения измерительных систем.

В разделе 2.1. кратко описывается сеть ГНСС-станций (рис. 1). Приводится информация о состоянии геомагнитной обстановки на момент взрывного извержения вулкана, геомагнитная обстановка в момент исследуемого вулканического события характеризовалась как возмущенная. На рис. 2 представлен график изменения геомагнитного индекса K_p , определяемого по станциям в средних широтах и характеризующего геомагнитную обстановку на планете с трехчасовым временным разрешением.

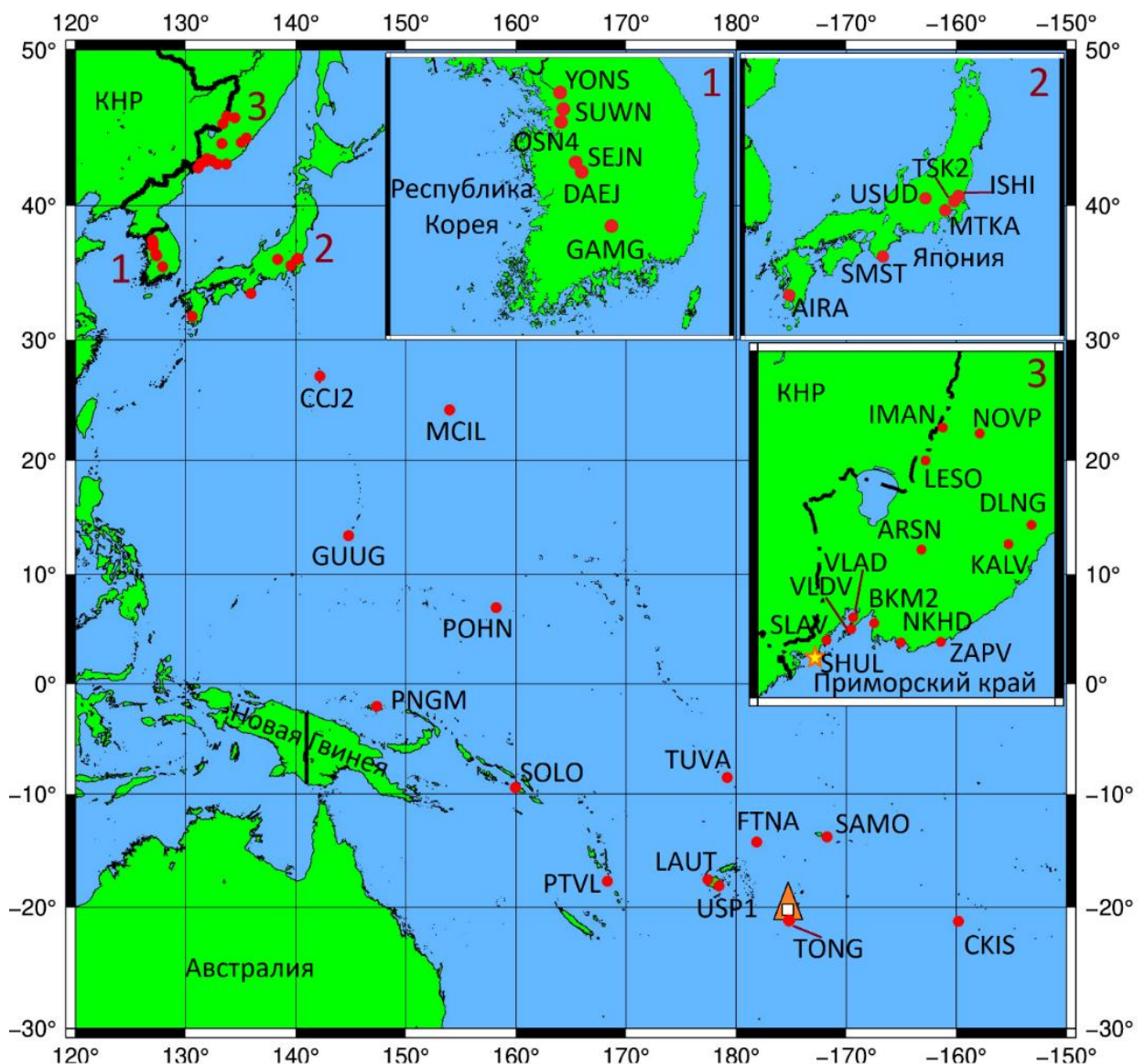


Рис. 1. Расположение ГНСС-станций относительно вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай. Вулкан расположен рядом с ГНСС-станцией TONG.



Рис. 2. Состояние геомагнитной обстановки в исследуемый временной интервал по индексу Kp [1].

В разделе 2.2. Приводится анализ результатов обработки ГНСС-данных ионосферы. С целью поиска и выделения ионосферных возмущений, связанных с активностью вулкана Хунга-Тонга (ковулканические возмущения), а также получения картины фоновых вариаций ПЭС и ее изменений до и после исследуемого эруптивного эпизода, нами были построены и проанализированы диаграммы дальность-время за временной интервал с 11 по 20 января 2022 г. На построенных диаграммах возмущения, достигшие территории Приморского края, зафиксированы только для периодов 10-60 мин. На диаграммах за 15 января 2022 года были обнаружены интенсивные ковулканические вариации ПЭС, прослеживающиеся непосредственно от вулкана до расстояний свыше 10 тыс. км от него (рис. 3). Получены характеристики скоростей возмущений (таблица 1). Четыре перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) 1-4, характеризующиеся средними скоростями от ~ 720 до ~ 950 м/с, распространялись до расстояний 2.5-3 тыс. км в течение примерно 3 ч после извержения. Полученные скорости соответствуют акустической моде, которая порождается ударными волнами в нижней атмосфере Земли, часто возникающими при сильных взрывах. На расстоянии около 3 тыс. км от вулкана эти возмущения разделяются на две моды: первая мода распространяется до расстояний 7-8 тыс. км от вулкана с несколько меньшей средней скоростью ~ 630 м/с (ПИВ 5-6), вторая мода, регистрируемая на значительно больших расстояниях, в том числе и над Приморьем, имеет скорость порядка 340 м/с (ПИВ 7-8) и отождествляется рядом авторов с волнами Лэмба [2-6]. Явление разделения возмущений ВПЭС на удалении от породившего их источника уже ранее наблюдалось для сильных землетрясений и описано

в работах [7,8]. Выделяющиеся в дальней зоне ПИВ 9-10, распространяющиеся со средней скоростью ~ 330 м/с, также могут быть ассоциированы с ковулканическими аномалиями ПЭС, т.к. не наблюдаются в предшествующие извержению и последующие дни. Средняя амплитуда обнаруженных над территорией Приморского края ковулканических возмущений ПЭС составила ~ 1.0 ТЕСУ. Полупериод обнаруженных возмущений составил ~ 28 мин, а половина длины волны ~ 580 км (соответственно, период и длина волны составили ~ 57 мин и ~ 1160 км). Полученные характеристики ионосферных возмущения сравнивались с работами [2-6, 9].

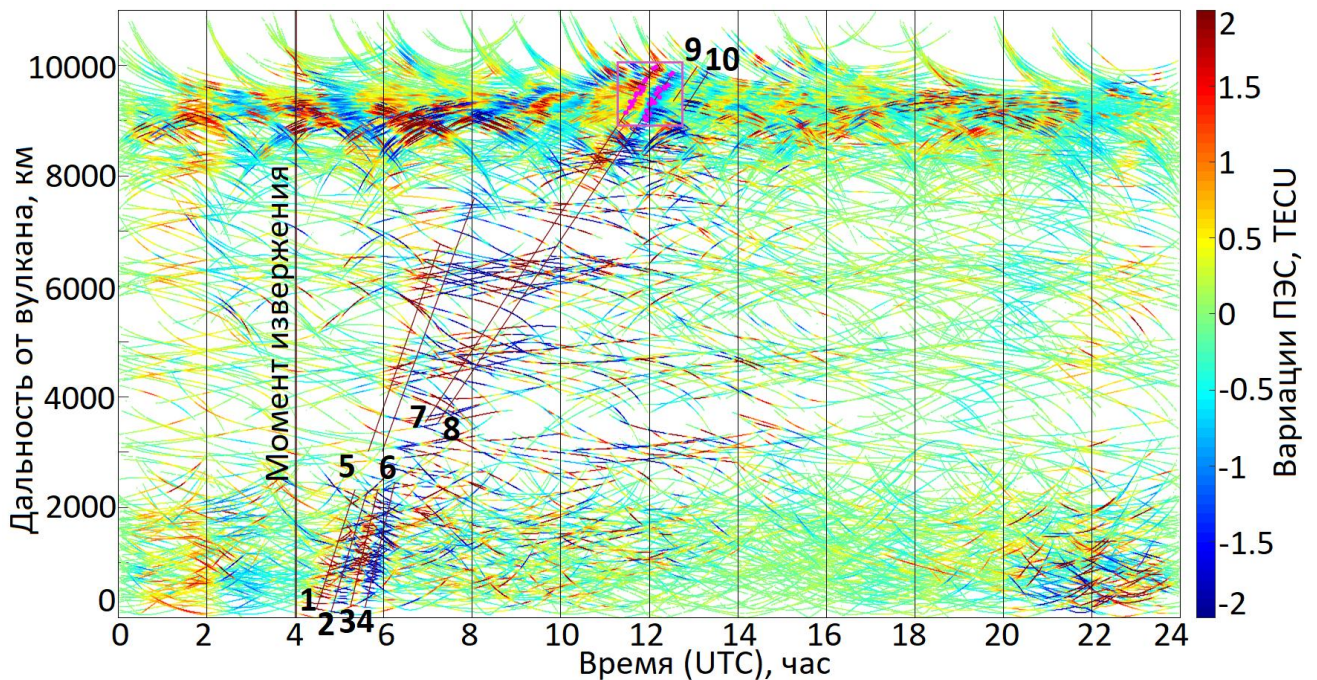


Рис. 3. Диаграмма дальность-время за 15.01.2022 г., для периода фильтрации 10-60 мин.

Таблица 1. Оценки скоростей распространения ковулканических возмущений ПЭС по диаграмме дальность-время, обозначенных цифрами 1-10 на рис. 3

Номер возмущения	Скорость (средняя скорость)
1-2	690-750 (~ 720) м/с
3-4	940-950 (~ 950) м/с
5-6	610-640 (~ 630) м/с
7-8	320-360 (~ 340) м/с
9-10	320-340 (~ 330) м/с

В разделе 2.3. описывается регистрация атмосферных возмущений лазерным интерферометрическим комплексом, расположенном на МЭС «м. Шульца». На рис. 4 приведены фрагменты записей с колебаниями, вызванными извержением вулкана.

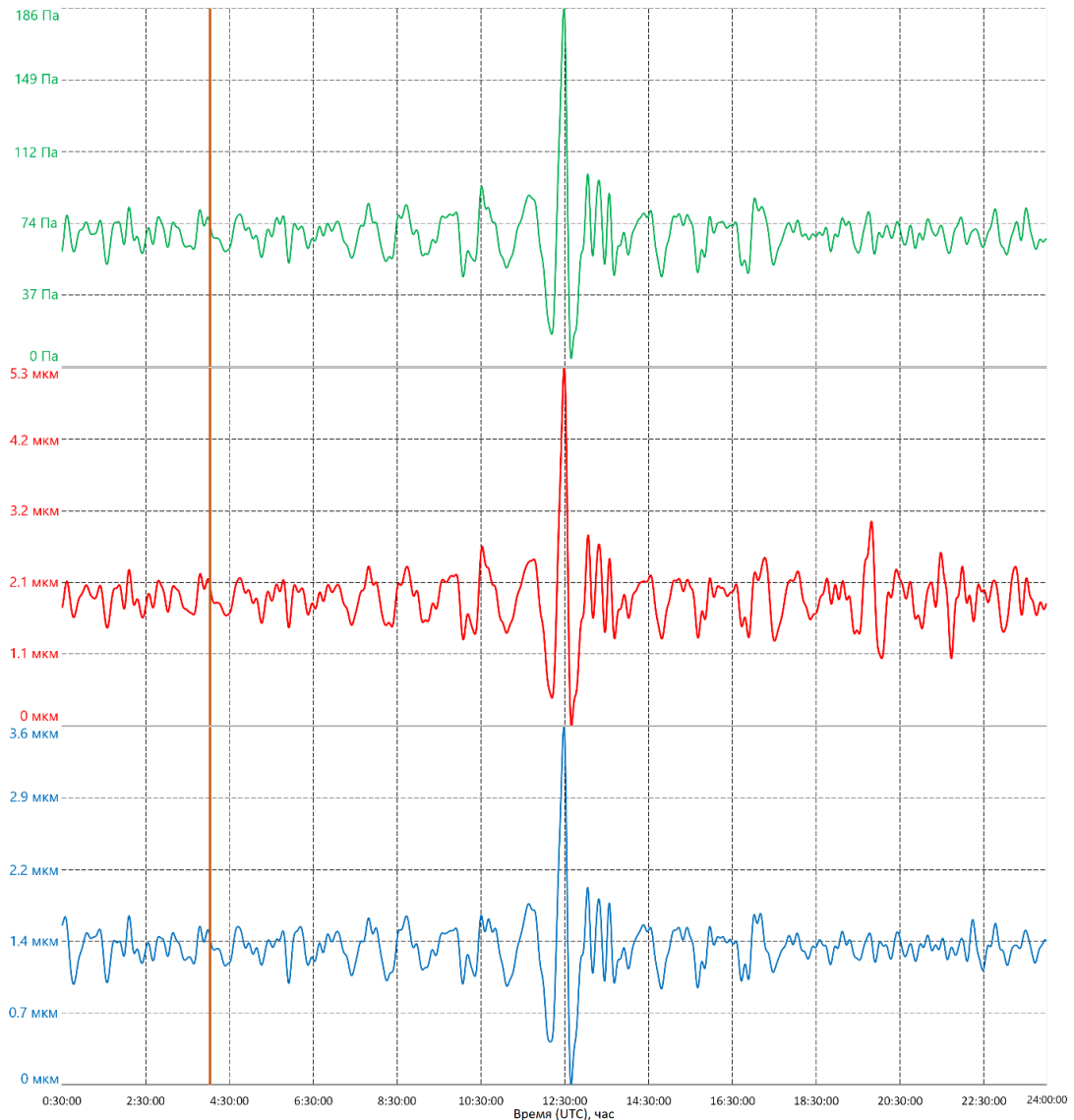


Рис. 4. Фрагменты записи нанобарографа и двух деформографов за 15 января 2022 г. Диапазон фильтрации 10-60 мин.

Интенсивные возмущения, вызванные извержением вулкана Хунга-Тонга, наблюдались в период с 12:10:00 UTC до 14:00:00 UTC [10]. Записи всех трех инструментов фиксируют практически синхронные изменения приземного давления и колебаний земной поверхности, что говорит о том, что последние были инициированы распространением возмущения в нижнем слое атмосферы (тропосфере). Максимум возмущений наблюдался в ~12:29:00 UTC, а минимум в ~12:39:00 UTC. Возмущений, вызванных взрывным извержением вулкана, распространяющихся по земной коре от вулкана не обнаружено. Зафиксированные деформографами колебания земной коры вызваны воздействием атмосферных колебаний на земную кору.

Результаты второй главы опубликованы в работах [А6-А9].

В третьей главе описывается регистрация метеоцунами, возникшего в результате мощного взрывного извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай, произошедшего 15 января 2022 г. в 04:02 UTC. Взрывное извержение вулкана спровоцировало мощные атмосферные колебания. Они, в свою очередь, привели к возникновению метеоцунами в акваториях Тихого океана и Японского моря.

В результате обработки данных морских уровнемерных станций были получены значения периодов колебаний морской поверхности. По полученным результатам можно сделать вывод, что атмосферные колебания, распространяясь над морской поверхностью, генерировали метеоцунами в акваториях Тихого океана и Японского моря.

В разделе 3.1. приведена сеть морских уровнемерных станций (рис. 5).

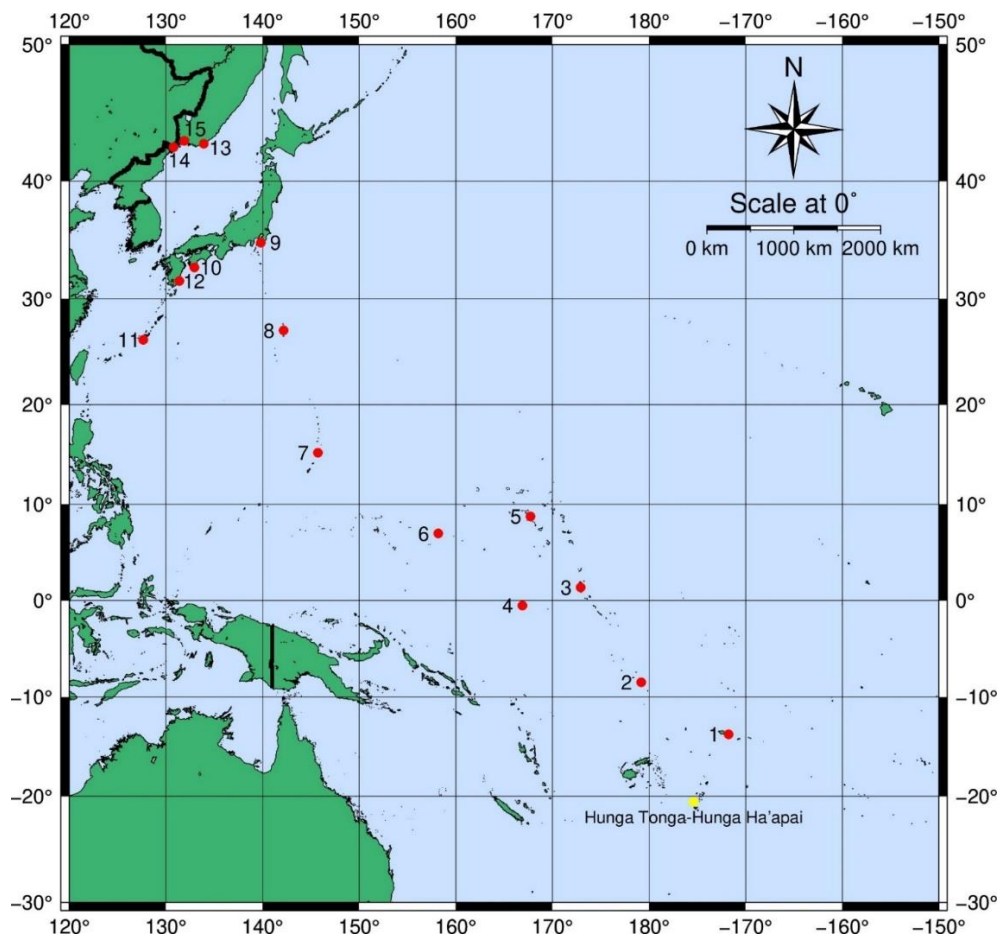


Рис. 5. Уровнемерные станции Тихого океана и Японского моря. 1 – Apia Upolu WS, 2 – Fongafale, 3 – Betio Tarawa, 4 – Nauru, 5 – Kwajalein, 6 – Dekehtik Pohnpei, 7 – Saipan, 8 – Chichijima, 9 – Mera, 10 – Tosashimizu, 11 – Naha, 12 – Aburatsu, 13 – Preobrazhenije, 14 – Pos'et, 15 – Vladivostok.

В разделе 3.2. приводятся результаты обработки данных морских уровнемерных станций. Приведены графики фрагментов записи уровнемерных станций.

Начало всех возмущений на записях уровнемерных станций совпадает с появлением атмосферного возмущения, вызванного взрывом вулкана, скорость которого приблизительно равна скорости звука в воздухе. В работах [11, 12] утверждается, что вместе с атмосферным возмущением станции зафиксировали волны цунами, возникшие в результате взрыва вулкана.

В таблице 2 приведены результаты спектральной обработки экспериментальных данных. В таблицу введены следующие обозначения: в первом столбце указаны названия морских уровнемерных станций, во втором столбце приведены названия фрагментов в фоновый период и во время регистрации сигналов возмущений, в столбцах 3, 4, 5 указаны периоды выявленных максимумов, в столбце 6 – скорость распространения возмущающего сигнала от вулкана к точке станции. Обработаны данные четырнадцати станций, из которых на девяти станциях выявлены спектральные максимумы, периоды которых совпадают с максимумами фоновых периодов наблюдений. Это свидетельствует о том, что возникновение этих сигналов произошло во время прихода атмосферного возмущения, возникшего в результате взрыва вулкана.

Таблица 2. Статистика результатов обработки записей уровнемерных станций.

Станция		Максимум 1	Максимум 2	Максимум 3	Скорость, м/с
1	2	3	4	5	6
Aria Upolu WS	Фон	1 ч 04 мин 13 сек	25 мин 41,4 сек	18 мин 21,0 сек	
	Сигнал	11 мин 56,9 сек	30 мин 13,4 сек (0,027)	18 мин 21,0 сек (0,021)	218
Fongafale	Фон	42 мин 48,9 сек	8 мин 01,7 сек	6 мин 35,2 сек	
	Сигнал	9 мин 52,8 сек	42 мин 48,9 сек	20 мин 33,1 сек	209
Betio Tarawa	Фон	32 мин 02,7 сек			
	Сигнал	32 мин 02,7 сек	7 мин 25,8 сек	10 мин 03,2 сек	212
Nauru	Фон	51 мин 22,7 сек	39 мин 31,3 сек	13 мин 53,2 сек	
	Сигнал	6 мин 15,9 сек	36 мин 41,9 сек	28 мин 32,6 сек	222
Kwajalein	Фон	58 мин 48,5 сек	5 мин 14,4 сек	37 мин 48,3 сек	
	Сигнал	13 мин 55,7 сек	48 мин 07,0 сек	9 мин 37,4 сек	235
Dekehtik Pohnpei	Фон	56 мин 58,1 сек	16 мин 01,3 сек	5 мин 53,6 сек	
	Сигнал	56 мин 51,0 сек	14 мин 9,8 сек	6 мин 0,1	
Saipan	Фон	56 мин 51 сек	23 мин 15,4 сек	7 мин 12,4 сек	
	Сигнал	11 мин 53,9 сек	9 мин 50,4 сек	13 мин 49,7 сек	279
Chichijima	Фон	20 мин 28,0 сек	16 мин 30,3 сек	13 мин 49,7 сек	
	Сигнал	20 мин 28,0 сек	15 мин 02,9 сек	12 мин 47,5 сек	286
Mera	Фон	6 мин 09,9 сек	5 мин 19,8 сек	22 мин 14,7 сек	
	Сигнал	22 мин 14,7 сек	6 мин 05,5 сек	6 мин 38,7 сек (290
Tosashimizu	Фон	20 мин 28,0 сек	39 мин 21,4 сек		
	Сигнал	20 мин 28,0 сек	24 мин 21,8 сек	42 мин 38,2 сек	290
Naha	Фон	26 мин 55,7 сек			
	Сигнал	24 мин 21,8 сек	10 мин 26,5 сек		

	Сигнал	22 мин 14,7 сек	25 мин 34,9 сек	19 мин 40,7 сек	288
Preobrazhenije	Фон	31 мин 58,7 сек	15 мин 59,3 сек		
	Сигнал	30 мин 05,8 сек	9 мин 28,5 сек	15 мин 59,3 сек	293
Pos'et	Фон	31 мин 58,7 сек	17 мин 38,6 сек	10 мин 53,2 сек	
	Сигнал	30 мин 05,8 сек	17 мин 38,6 сек	11 мин 22,2 сек	287
Vladivostok	Фон	39 мин 21,4 сек	31 мин 58,7 сек		
	Сигнал	31 мин 58,7 сек			286

Если мы считаем, что наряду с атмосферным возмущением, приведшим к возникновению метеоцунами, взрыв вулкана должен вызвать классическое цунами, то мы можем поискать это возмущение в записях станций. Трудно понять, с какой скоростью должна распространяться классическая волна цунами. Рассчитаем эту скорость в соответствии с выражением $v = \sqrt{gh}$ на глубинах 2000 или 4000 м. Задержка классического цунами по сравнению с метеорологическим цунами для каждой приемной станции, перечисленной в таблице 2, составит:

– Apia Upolu WS –	с 37 мин 54 сек	до 6 мин 52 сек;
– Fongafale –	с 1 ч 05 мин	до 6 мин 46 сек;
– Betio Tarawa –	с 1 ч 53 мин 51 сек	до 15 мин 39 сек;
– Nauru –	с 2 ч 12 мин 07 сек	до 27 мин 21 сек;
– Kwajalein –	с 3 ч 03 мин 21 сек	до 50 мин 30 сек;
– Dekehtik Pohnpei –	с 3 ч 41 мин 16 сек	до 1 ч 12 мин 26 сек;
– Saipan –	с 5 ч 48 мин 31 сек	до 2 ч 23 мин 36 сек;
– Chichijima –	с 7 ч 08 мин 51 сек	до 3 ч 02 мин 46 сек;
– Mera –	с 8 ч 02 мин 25 сек	до 3 ч 29 мин 13 сек;
– Tosashimizu –	с 8 ч 21 мин 09 сек	до 3 ч 37 мин 20 сек;
– Naha –	с 8 ч 15 мин 38 сек	до 3 ч 33 мин 07 сек.

При изучении записей четырнадцати указанных станций не удалось обнаружить сигналов, соответствующих цунами, которые прошли по водной поверхности от места извержения вулкана.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [A10-A12].

В **четвертой главе** описывается сравнение ГНСС-данных ионосферы с записями данных морских уровнемерных станций. В результате сравнения обнаружены атмосферные колебания, которые вызывают колебания в гидросфере.

При обработке данных об изменениях общего электронного содержания в ионосфере, полученных с помощью GNSS по лучу ГНСС-приемник – спутник, было установлено, что периоды основных выбранных максимумов совпадают с большой точностью. Они выделяются при обработке данных уровнемерных станций для участков

трассы передачи данных ГНСС-приемник – спутник, расположенных вблизи конкретной уровневой станции.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что выбранные периоды колебаний относятся к одним и тем же периодам собственных колебаний областей атмосферы, расположенных над определенными территориями и акваториями Земли. Возбуждение этих колебаний, вызванное различными мощными источниками, распространяющимися в атмосфере, приводит не только к их возбуждению, но и к генерации метеоцунами в отдельных заливах при определенном совпадении периодов собственных атмосферных колебаний с периодами сейш этих заливов.

В таблице 3 представлены результаты обработки данных морских уровневых станций. В таблице 4 представлены периоды, полученных по ГНСС-станции и спутнику.

Таблица 3. Периоды, полученные по морским уровневым станциям.

Номер станции	Станция	Период, фон	Период, сигнал
8	Chichijima	20 min 28.0 s 16 min 30.3 s 13 min 49.7 s	20 min 28.0 s 15 min 02.9 s 12 min 47.5 s
9	Mera	6 min 09.9 s 5 min 19.8 s 22 min 14.7 s	22 min 14.7 s 6 min 05.5 s 6 min 38.7 s
10	Tosashimizu	20 min 28.0 s 39 min 21.4 s	20 min 28.0 s 24 min 21.8 s 42 min 38.2 s
11	Naha	26 min 55.7 s	24 min 21.8 s 10 min 26.5 s 22 min 14.7 s 25 min 34.9 s 19 min 40.7 s
12	Aburatsu	26 min 55.7 s 17 min 38.6 s 11 min 37.7 s	22 min 14.7 s 10 min 26.5 s 9 min 18.2 s
13	Preobrazheniye	31 min 58.7 s 15 min 59.3 s	30 min 05.8 s 9 min 28.5 s 15 min 59.3 s
14	Pos'et	31 min 58.7 s 17 min 38.6 s 10 min 53.2 s	30 min 05.8 s 17 min 38.6 s 11 min 22.2 s
15	Vladivostok	39 min 21.4 s 31 min 58.7 s	31 min 58.7 s

Таблица 4. Периоды по ГНСС-данным.

Номер морской станции	станция ARSN – спутник	станция ВКМ2 – спутник	станция KALV – спутник	станция SLAV – спутник	станция VLAD – спутник	станция SHUL – спутник	станция ZAPV – спутник	станция IMAN – спутник
8			05:39- 06:43 R21 14:03.2 18:17.7					

9	07:04- 08:09 G31 06:42.4	07:18- 08:22 G31 07:58.2	06:43- 7:47 R21 22:03.1 05:59.6	06:39- 08:48 R11 22:47.4 21:46.9	05:40- 09:57 G26 21:36.3	09:38- 10:44 G16 21:57.7	05:36- 10:17 R21 22:01.5 06:40- 08:49 R21 04:50.8 22:11- 23:16 R21 22:23.5 06:31- 09:54 G26 22:49.3	
10	7:00- 8:05 R12 19:57.7 07:04- 08:09 G31 41:23.4 20:15.9 07:04- 08:09 G31 20:15.9	10:51- 11:56 R12 19:06.2 05:36- 06:40 G27 39:56.6 06:34- 07:39 G27 44:22.5 04:18- 05:23 G16 44:22.5		07:00- 11:34 R22 42:43.0 06:40- 07:45 R21 24:42.5 06:39- 08:48 R11 41:39.6	05:40- 06:45 R21 20:29.9 08:03- 11:54 R12 38:36.6 05:32- 07:41 G31 19:41.4 05:45- 12:14 G27 43:11.5 21:24.7		06:40- 08:49 R21 43:21.2 03:31- 04:37 G26 41:56.0 19:02.1 03:47- 08:04 G26 19:09.6	08:06- 11:48 R12 42:38.2 06:06- 11:48 R12 42:14.6 05:52- 06:57 G27 19:50.2
11		05:36- 06:40 G27 19:08.9						
12		05:36- 06:40 G27 11:53.5c			05:45- 06:50 G27 22:21.6 10:17.5		03:31- 04:37 G26 21:59.5	
13	09:09- 10:13 R22 09:09.3 07:07- 09:15 R21 09:28.0	07:51- 08:56 R12 29:55.9	05:46- 06:51 G16 15:20.8 10:03- 11:08 G16 30:51.3	06:40- 07:45 R21 09:43.0 05:36- 10:20 R21 31:44.9	07:26- 08:24 R22 09:14.4 15:23.5 05:40- 06:45 R21 15:35.2	04:32- 05:37 G26_1 09:09.6 15:19.0 05:32- 06:37 G26 09:01.0	22:11- 23:16 R21 15:58.5 06:49- 07:54 R11 09:09.0	07:36- 11:59 R22 31:46.7 05:52- 12:18 G27 30:26.3

	<p>08:20-11:31 R12 30:45.8</p> <p>06:07-07:13 G27 09:09.3</p> <p>07:00-09:09 G26 16:15.6</p> <p>09:00-10:05 G08 09:04.0</p>			<p>07:38-08:44 G16 16:12.1</p>	<p>09:13.8</p> <p>05:39-10:14 R21 30:54.1</p> <p>22:15-23:42 R21 15:56.6</p> <p>05:32-07:41 G31 15:36.1</p> <p>06:33-08:42 G16 09:46.1</p> <p>10:20-11:26 G16 09:45.9</p>	<p>06:42-07:47 G16 09:04.7</p>	<p>05:43-07:51 G16 30:35.4 09:03.6 09:49.5</p>	<p>11:37-13:46 G08 09:54.0</p>
14	<p>06:03-07:07 R21 17:05:0</p> <p>08:20-10:29 R12 18:00.4</p> <p>08:20-11:31 R12 30:45.8</p> <p>07:08-08:13 G08 16:51.0</p> <p>08:00-09:05 G08 30:09.4</p>	<p>09:56-11:00 R22 17:50.8</p> <p>09:52-10:56 R22 17:27.4</p> <p>07:51-10:00 R12 17:53.2</p> <p>04:32-06:41 G31 10:50.4</p> <p>06:34-07:39 G27 17:11.6 11:23.0</p> <p>05:35-12:18 G27 17:21.3 11:49.7</p>	<p>05:46-06:51 G16 10:35.1</p> <p>06:46-07:51 G16 17:25.1</p>	<p>05:36-10:20 R21 31:44.9</p> <p>03:32-04:37 G26 10:41.9</p> <p>04:32-05:37 G26 11:00.9</p>	<p>07:26-11:44 R22 11:02.1</p> <p>06:44-07:49 R21 11:05.9</p> <p>22:15-23:20 R21 11:32.4</p> <p>08:03-10:12 R12 17:07.6 11:55.0</p> <p>06:45-08:54 G27 11:36.1</p> <p>05:45-12:14 G27 18:02.8</p> <p>05:40-09:57</p>	<p>03:32-04:35 G26 10:44.0</p>	<p>04:32-06:41 G26 17:01.2</p> <p>05:43-07:51 G16 30:35.4 11:13.9</p>	<p>07:36-11:59 R22 17:02.0</p> <p>05:52-12:18 G27 30:26.3</p> <p>06:57-08:01 G08 17:36.6</p>

		06:31-07:37 G26 17:40.1 10:26.0			G26 17:04.5			
		06:12-07:17 G16 11:07.3			10:20-11:26 G16 17:54.4			
15	08:20-09:25 R12 39:44.7 29:35.9	07:51-10:00 R12 40:02.6	05:46-06:51 G16 39:33.0	06:39-07:44 G16 30:51.3 31:28.6		05:41-06:47 G16 29:39.2	05:43-07:51 G16 30:35.4	06:24-08:33 G27 31:31.4
	08:20-10:29 R12 41:29.9	05:12-06:17 G16 39:38.8 10:56.4						08:56-10:01 G08 31:59.1
	08:20-11:31 R12 40:44.4							
	06:48-11:05 G16 40:01.1 32:32.0							
	08:20-09:25 R12 29:35.9							

Результаты четвертой главы опубликованы в работах [A10-A13].

В **заключении** приведены основные результаты работы.

Основной средой распространения возмущений, вызванных взрывным извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 года в 04:02 UTC, являлась атмосфера.

С помощью сравнения результатов обработки записей лазерных деформографов, лазерного нанобарографа и ГНСС-данных ионосферы установлено, что зафиксированные колебания земной коры в районе МЭС «м. Шульца» были вызваны возмущениями атмосферы, приход колебаний через земную кору от вулкана не зафиксирован.

По результатам обработки данных морских уровнемерных станций установлено, что зафиксированные колебания морской поверхности не являются следствием

возникновения классического цунами, а вызваны метеоцунами, которое в свою очередь возбуждалось распространяющимся в атмосфере мощным импульсом, появившемся в результате взрывного извержения вулкана.

По результатам совместной обработки данных уровнемерных станций и ГНСС-данных ионосферы определены значения периодов и выявлен первоисточник колебаний гидросферного слоя (морской поверхности) и слоя ионосферы (в пределах конкретных областей). Первоисточником зафиксированных колебаний служат собственные колебания атмосферы.

Созданный и развиваемый атмосферно-гидросферно-литосферный комплекс позволил провести исследование состояния и взаимодействия геосфер в инфразвуковом диапазоне и получить важные научные выводы.

Цитированная литература

1. Geophysical Centre Potsdam (GFZ) [Электронный ресурс]: <https://www.gfz-potsdam.de/en/>.
2. Themens D.R., Watson C., Žagar N., Vasylykevych S., Elvidge S., McCaffrey A., Prikryl P., Reid B., Wood A., Jayachandran P.T. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption // *Geophysical Research Letters*. — 2022. — Vol. 49. DOI: 10.1002/essoar.10510350.1.
3. Zhang S.-R., Vierinen J., Aa E., Goncharenko L.P., Erickson P.J., Rideout W., Coster A.J., Spicher A. 2022 Tonga Volcanic Eruption Induced Global Propagation of Ionospheric Disturbances via Lamb Waves // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. — 2022. — Vol. 9. — Art.no. 871275. DOI:10.3389/fspas.2022.871275.
4. Chen C.-H., Zhang X., Sun Y.-Y., Wang F., Liu T.-C., Lin C.-Y., Gao Y., Lyu J., Jin X., Zhao X., Cheng X., Zhang P., Chen Q., Zhang D., Mao Z., Liu J.-Y. Individual Wave Propagations in Ionosphere and Troposphere Triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha’apai Underwater Volcano Eruption on 15 January 2022 // *Remote Sensing*. — 2022. — Vol. 14. — Iss. 2179. DOI: 10.3390/rs14092179.
5. Heki K. 2022. Ionospheric signatures of repeated passages of atmospheric waves by the 2022 Jan. 15 Hunga Tonga-Hunga Ha’apai eruption detected by QZSS-TEC observations in Japan // *Earth Planets Space*. — 2022. — Vol. 74. — Art.no. 112. DOI: 10.1186/s40623-022-01674-7.
6. Hong J., Kil H., Lee W.K., Kwak Y.-S., Choi B.-K., Paxton L.J. Detection of different properties of ionospheric perturbations in the vicinity of the Korean Peninsula after the Hunga-Tonga volcanic eruption on 15 January 2022. // *Geophysical Research Letters*. — 2022. Vol. 49 — Art.no. e2022GL099163. DOI: 10.1029/2022GL099163.

7. Artru J., Lognonne P., Blanc E. Normal modes modelling of post-seismic ionospheric oscillations // *Geophysical Research Letters*. — 2001. — Vol. 28, No. 4. — P. 697- 700. DOI: 10.1029/2000GL000085.
8. Astafyeva E., Heki K., Kiryushkin V., Afraimovich E., Shalimov S. Two-mode long-distance propagation of coseismic ionosphere disturbances // *Journal of Geophysical Research*. — 2009. — Vol. 104. — Iss. A10307. DOI: 10.1029/2008JA013853.
9. Saito S. Ionospheric disturbances observed over Japan following the eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha’apai on 15 January 2022 // *Earth Planets Space*. — 2022. — Vol. 74. — Art.no. 57. DOI: 10.1186/s40623-022-01619-0.
10. Долгих Г.И., Долгих С.Г., Овчаренко В.В. Атмосферно-деформационные возмущения, вызванные вулканом Хунга-Тонго-Хунга-Хаапай // *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле*. — 2022. — Т. 505, № 2. — С. 196-198. DOI: 10.31857/S2686739722080072.
11. Kulichkov S.N., Chunchuzov I.P., Popov O.E., Gorchakov G.I., Mishenin A.A., Perepelkin V.G., Bush G.A., Skorokhod A.I., Vinogradov Yu A., Semutnikova E.G. et al. Acoustic-Gravity Lamb Waves from the Eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai Volcano, Its Energy Release and Impact on Aerosol Concentrations and Tsunami // *Pure and Applied Geophysics*. — 2022. Vol. 179. — P. 1533-1548. DOI: 10.1007/s00024-022-03046-4.
12. Matoza R.S., Fee D., Assink J.D., Iezzi A.M., Green D.N., Kim K., Toney L., Lecocq T., Krishnamoorthy S., Lalande J.-M., et al. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga // *Science*. — 2022. — Vol. 377 — P. 95-100.

Список публикаций

- A1. Dolgikh G., Budrin S., Dolgikh S., Bolsunovskii M., Ivanov M. Planetary laser interferometric seismoacoustic observatory // *Sensors*. — 2025. — Vol. 25, Iss. 1. — Art.no. 48. DOI: 10.3390/s25010048.
- A2. Долгих Г.И., Болсуновский М.А., Будрин С.С. Восточная часть планетарной лазерно-интерферометрической сейсмоакустической обсерватории // *Геология и геофизика*. — 2025. — № 4. — С. 529-536. DOI: 10.15372/GIG2024173.
- A3. Долгих Г.И., Будрин С.С., Долгих С.Г., Болсуновский М.А., Иванов М.П. Создание планетарной лазерно-интерферометрической обсерватории // *Океанологические исследования: материалы XI Всерос. конф. молодых ученых с междунар. участием, 26 - 30 мая 2025 г., г. Владивосток, Россия*. — 2025. — С. 48.
- A4. Долгих Г.И., Болсуновский М.А., Будрин С.С., Долгих С.Г., Чупин В.А., Швец В.А. Межгеосферное взаимодействие в гравитационном и инфрагравитационном диапазонах // *Физика геосфер: мат докл. XIII Всерос. симпоз., В-восток, 11-15 сент. 2023*. — 2023. — С. 339-341. DOI: 10.34906/9785604968383.339.
- 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. Болсуновский М.А., Шестаков Н.В., Долгих Г.И., Перевалова Н.П., Тен А.С. Ионосферные возмущения над Приморским краем, вызванные извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г // Геодинамика и тектонофизика. — 2024. — Т. 15, № 1. — Art.no. 0738. DOI: 10.5800/GT-2024-15-1-0738.
- A7. Болсуновский М.А. Исследование ковулканических ионосферных аномалий, сгенерированных извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г., над территорией Приморского края и смежными районами // Физика геосфер: мат докл. XIII Всеросс. сипоз., В-восток, 11-15 сент. 2023. . — 2023. — С. 295-298. DOI: 10.34906/9785604968383.295.
- A8. Болсуновский М.А., Шестаков Н.В., Долгих Г.И., Перевалова Н.П. Поиск ионосферных возмущений, инициированных извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г., над территорией Приморского края // Океанологические исследования: мат. X конф. молодых уч., 24 – 28 апр. 2023 г., Владивосток, ТОИ ДВО РАН. — 2023. — С. 194-196.
- A9. Болсуновский М.А. Поиск и исследование ковулканических ионосферных возмущений, инициированных извержением вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 г., в дальней зоне (Приморский край РФ) // Конгресс молодых ученых Беларуси и России, Минск, 27-31 марта 2023 г. — Постоян. ком. Союз. государства, Нац. акад. наук Беларуси; редкол.: В. Г. Гусаков (гл. ред.) [и др.]. — Минск: Беларуская навука. 2023. — С. 133-139.
- A10. Долгих Г.И., Болсуновский М.А., Долгих С.Г., Будрин С.С. Гидросферные колебания вызванные нагружающим воздействием атмосферы, во время извержения вулкана Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай // Физика геосфер: мат докл. XIV Всеросс. сипоз., В-восток, 8-12 сент. 2025 г. — 2025. — С. 72-74.
- A11. Долгих Г.И., Болсуновский М.А. Нагружающее воздействие атмосферы на гидросферу // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2024. — Т. 516, № 2. — С. 640-648. DOI: 10.31857/S2686739724060172.
- A12. Долгих Г.И., Болсуновский М.А., Долгих С.Г. Атмосферные и инфрагравитационные возмущения Япономорского региона // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. — 2023. — Т. 511, № 1. — С. 105-111. DOI: 10.31857/S2686739723600340.
- A13. Dolgikh G.I., Bolsunovskii M.A., Dolgikh S.G. Infrasonic oscillations in ionosphere and their manifestations in hydrosphere // Physical Oceanography. — 2026. — Vol. 1.

Научное издание

Болсуновский Михаил Алексеевич

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата физико-математических наук на тему:

Геосферное взаимодействие в инфразвуковом диапазоне

Подписано в печать «20» марта 2026 г.

Формат 60 × 90 1/16. Тираж 110 экз.

Отпечатано с авторского оригинал-макета в ТОИ ДВО РАН

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