

Волны цунами у юго-восточного побережья о. Сахалин, вызванные извержением вулкана Хунга–Тонга–Хунга–Хаапай 15 января 2022 года по наблюдениям донными волнографами

Д. П. Ковалев,¹ П. Д. Ковалев^{1, *}

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН
Россия, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки 16

(Поступила в редакцию 19.02.2024; после доработки 26.03.2024; подписана в печать 02.04.2024)

Проведено наблюдение за волнением (колебаниями уровня моря) в прибрежной акватории юго-восточного побережья о. Сахалин с ноября 2021 г. по май 2022 г. с использованием донных высокоточных измерителей АРВ-14К с секундной дискретностью. Анализ полученных временных рядов выявил наличие аномальных волн в диапазоне периодов волн цунами в январе 2022 г. Показано, что обнаруженные 15 января 2022 г. волны с периодами 15 мин–4 ч, значительно выделяющиеся над фоном, связаны с вулканогенными волнами цунами. Спектральный анализ временных рядов показал, что обнаруженный после извержения вулкана максимум в спектрах колебаний уровня моря близок к периоду первой моды шельфовой сейши. Это указывает на то, что приходящие волны цунами возбуждают в прибрежной зоне шельфовые сейши, а также способствуют генерации продольных и поперечных сейш в зал. Мордвина. Анализ временных рядов позволил установить, что спектральная плотность колебаний уровня моря для интервала времени начала извержения вулкана Хунга–Тонга–Хунга–Хаапай с 21 декабря 2021 г. до 11 января 2022 г. значительно отличается от спектральной плотности для времени плинианского извержения вулкана. Анализ статистических характеристик колебаний уровня моря, выполненный по двухсуточным рядам в диапазоне периодов 1 мин–4 ч для фонового волнения и цунами, показал увеличение среднеквадратичного отклонения в 3.5 раза для временного ряда содержащего волны цунами. Установлено, что для временных рядов фона и содержащих волны цунами коэффициенты асимметрии и эксцесса мало отличаются от «гауссовых» значений. Это указывает на то, что приход волн цунами от далеких источников не нарушает существенно стационарность волнового поля в районе наблюдений.

PACS: 91.30.Nw. УДК: 551.466.62.

Ключевые слова: колебания уровня моря (волнение), извержение вулкана, цунами, статистические характеристики, спектральный анализ.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.79.2430901](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2430901)

ВВЕДЕНИЕ

Причиной возникновения волн цунами является смещение значительного объема воды или возмущение моря [1, 2]. Обычно вытеснение большого объема воды вызывается землетрясениями, но может быть связано и с другими явлениями: оползнями, извержениями вулканов, отхождением ледников. Вулканы могут генерировать волны в результате погружения в воду пирокластического потока, обрушения кальдеры или подводных взрывов [3]. Зачастую цунами, вызванные вулканическими извержениями, имеют большую магнитуду как например, при извержении вулкана Кракатау в 1883 г. По оценкам исследователей [4], более 20% всех погибших за последние 250 лет при извержении вулканов произошли в результате вулканогенных цунами.

15 января 2022 г. приборы сети DONET и S-net обнаружили аномальные волны пришедшие к восточному побережью Японии [5, 6]. Как показали авто-

ры статьи [7], эти волны вызваны извержением вулкана Хунга–Тонга–Хунга–Хаапай, расположенного в южной части Тихого океана в архипелаге Тонга с координатами $20^{\circ}32'36''$ ю.ш. и $175^{\circ}23'33''$ з.д. Это часть высокоактивной зоны субдукции Кермадек–Тонга и связанной с ней вулканической дуги, которая простирается от Новой Зеландии на северо-северо-восток. Извержение 15 января 2022 г. было наиболее сильным и сопровождалось мощным взрывом, в результате чего образовался огромный шлейф, атмосферные волны и океанские волны, которые пересекли Тихий океан.

Отметим, что DONET — это плотная сетевая система на океанском дне, предназначенная для регистрации землетрясений и цунами, расположенная с восточной стороны Японских островов. S-net — это сеть наблюдения за землетрясениями и цунами на морском дне вдоль Японского желоба, V-net — фундаментальная сеть наблюдения за вулканами [8].

Лаборатория волновой динамики и прибрежных течений ИМГиГ ДВО РАН в течение многих лет занимается изучением волн, в том числе и опасных, в прибрежной зоне о. Сахалин с использова-

* E-mail: kovalev_pd@outlook.com

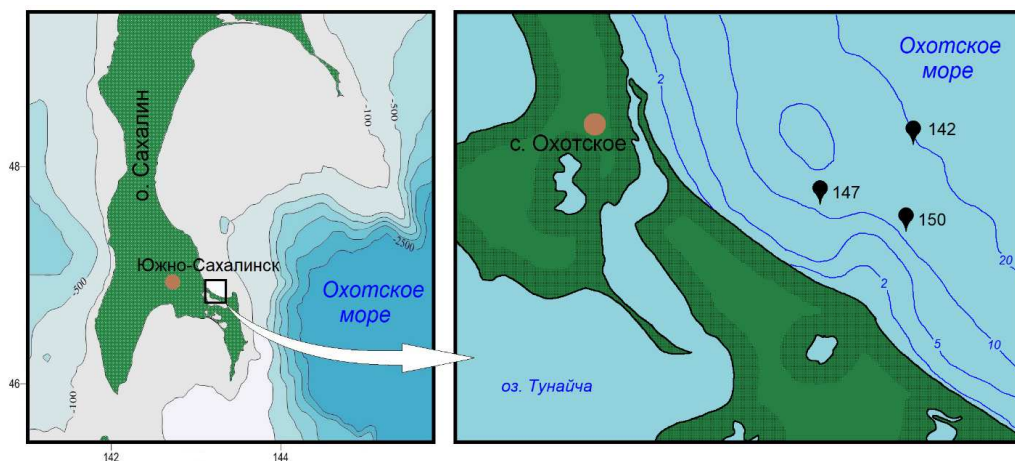


Рис. 1. Схема постановки приборов

нием данных натуральных наблюдений, полученных с помощью автономных донных регистраторов волнения (колебаний уровня моря). Такие приборы устанавливались и в море в районе юго-восточного побережья острова на годовую регистрацию 2021–2022 гг. Проверка временных рядов показала, что волны, вызванные извержением вулкана Хунга–Тонга–Хунга–Хаапай, зарегистрированы нашими измерителями волнения. Поэтому решено было провести изучение этих волн.

Отметим, что анализу морских и атмосферных волн Лэмба, вызванных извержением вулкана Хунга–Тонга–Хунга–Хаапай, посвящен ряд статей зарубежных и отечественных исследователей. К ним относятся такие, как например, [7, 9–11]. В то же время высокоточные данные наблюдений за колебаниями уровня с высокой дискретностью, зарегистрированные нашей лабораторией, позволяют детально исследовать приходящие к побережью о. Сахалин волны.

1. НАБЛЮДЕНИЯ И АНАЛИЗ ДАННЫХ

Изучение волнения в море в эксперименте 2021–2022 гг. проводилось с использованием донных регистраторов волнения, которые были установлены в прибрежной зоне Охотского моря, как показано на рис. 1. Три автономных регистратора волнения были установлены в октябре 2021 года. При этом прибор 147 (заводской номер) был установлен на 11-метровой глубине и расстоянии от берега около 1 км, а прибор 142 — на удалении около 2 км от берега и глубине 19 м. Третий прибор 150 располагался в юго-восточном направлении от прибора 147 на глубине около 11.3 м.

Используемые для измерения колебаний уровня моря приборы АРВ–14К изготавливаются в СКТБ «ЭлПА», г. Углич [12]. Основная приведенная погрешность измерений придонного давления, которое для анализа пересчитывается в вариации уровня моря (волнение) с учетом ослабления ко-

ротких волн с глубиной, составляет 0.06% от верхнего предела измерения, разрешающая способность $\pm 0.0008\%$ также от верхнего предела измерения. Дискретность измерений уровня моря и температуры 1 с.

В результате проведенных с октября 2021 г. по июнь 2022 г. наблюдений были получены синхронные записи колебаний уровня и температуры воды в трех точках прибрежной зоны юго-восточного побережья острова Сахалин. Этот период включает январь 2022 г., т.е. месяц, когда наблюдалась активная деятельность вулкана Хунга–Тонга–Хунга–Хаапай и его мощный взрыв 15 января 2022 г. Образец записи прибора 142 приведен на рис. 2, а. Временные ряды приборов 147 и 150 имеют схожий характер.

Как видно на рис. 2, а по сильному ослаблению ветрового волнения, с 7 января море было покрыто льдом, который фильтрует ветровые волны. Но после сильного шторма 11 января лед был поломан и ослабленное ветровое волнение наблюдалось вплоть до 16 января. Учитывая это обстоятельство, а также известный диапазон волн цунами — от 2 мин до 2 ч, для выделения пришедших аномальных волн было выполнено вычитание из исходных записей предвычисленного прилива с целью удаления короткопериодных приливных гармоник, и полосовая фильтрация с полосой 1 мин–4 ч. Однако в период с 11 по 16 января остался большой фоновый уровень, связанный предположительно с генерацией инфрагравитационных волн, хотя приход волн цунами 15 января выделялся. Поэтому, учитывая активное проявление волн цунами в полосе периодов от примерно 15 мин до 150 мин (рис. 4), была применена фильтрация более узкой полосой 15 мин–4 ч. Фрагменты временного ряда прибора 142 после вычитания прилива и полосовой фильтрации 15 мин–4 ч для разных временных масштабов приведены на рис. 2, б, в. Фильтрация и последующий спектральный и взаимно-спектральный анализ флуктуаций уровня моря проводился с использованием программы комплексной обработки

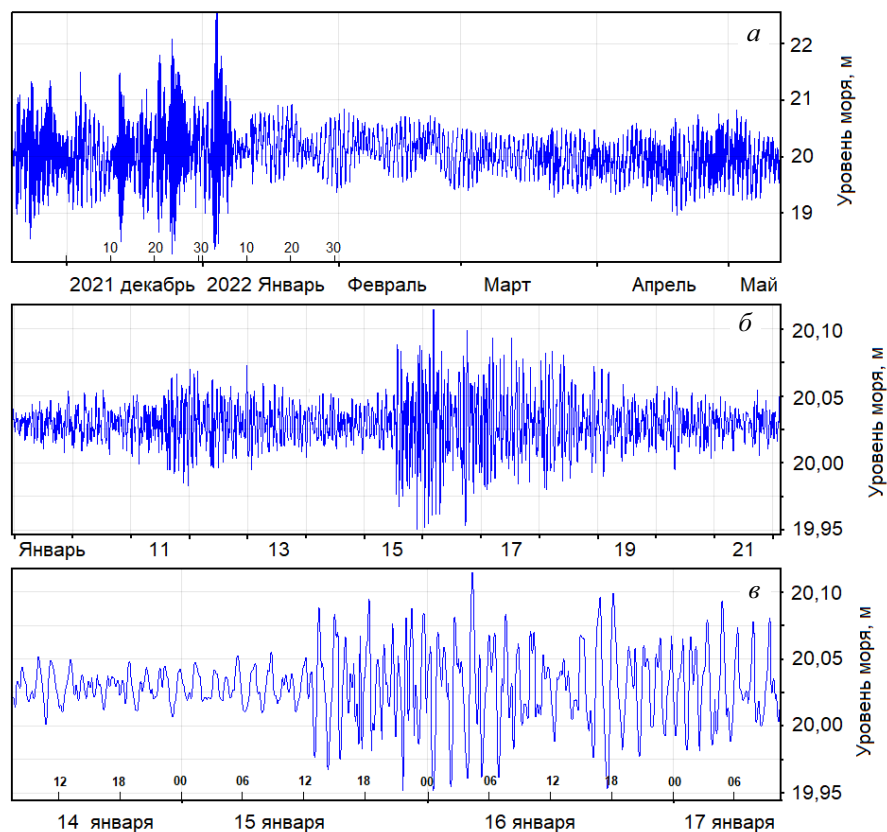


Рис. 2. Исходная запись колебаний уровня моря прибора 142 с приливом (а) и фрагменты временного ряда прибора 142 после вычитания прилива и полосовой фильтрации 15 мин⁻⁴ ч для разных временных масштабов (б, в). Время UTC+0

и анализа временных рядов данных уровня моря Кута [13].

На рис. 2, б, в хорошо виден приход волн большой амплитуды по сравнению с волновым фоном 14–15 января 2022 г. Первая волна импульсом отрицательной полярности подошла к о. Сахалин, пос. Охотское 15.01.2022 в 12:43:53, и время в пути от источника составило 8.73 ч. В то же время, по данным сайта [14], извержение началось с активизации вулкана 21 декабря 2021 г., которое продолжалось до 11 января 2022 г., затем деятельность вулкана прекратилась. После короткого затишья 14 января 2021 г. началось плингианское извержение вулкана Хунга–Тонга–Хунга–Хаапай (тип извержения вулкана, при котором имеют место мощные и продолжительные выбросы фрагментированной лавы в виде газовой-пепловой смеси под большим давлением) [14].

По временному ряду, из которого удален предвычисленный прилив и выполнена полосовая фильтрация (фрагмент этого ряда приведен на рис. 2, б) визуально не прослеживается приход волн от вулкана с 21 декабря 2021 г. по 12 января 2022 г., возможно, в связи с сильными штормами в декабре 2021 г. и первой декаде января 2022 г., которые хорошо видны по зарегистрированному ветровому волнению (рис. 2, а).

Поэтому первоначально были рассчитаны спектральные плотности колебаний уровня моря для трех приборов и интервала времени 15–20 января 2022 г., приведенные на рис. 3, с целью выявления периода приходящих от вулкана волн. Там же приведена спектральная плотность колебаний уровня моря для интервала времени 21 декабря 2021 г.–11 января 2022 г. для прибора 142, т.е. времени, когда извержение вулкана началось. Видно, что графики спектральных плотностей трех приборов для периода времени плингианского извержения вулкана практически совпадают, что и следовало ожидать для длинноволновых процессов с периодами более 20 мин. Главные максимумы в этих спектральных плотностях расположены на периодах 1.53 ч и 0.77 ч (46.4 мин).

По данным работы [7], периоды первых приходящих волн лежали в диапазоне 0.28–0.83 ч (1000–3000 с), т.е. были примерно в два раза короче волн, подошедших к о. Сахалин. Отметим, что, по данным наших исследований, например [15], период приходящих в пункты наблюдения волн цунами от одного источника зависит от батиметрических особенностей побережья. Исходя из величины периода было сделано предположение, что в рассматриваемом случае приходящие волны могут возбуждать шельфовые сейши. Были рассчитаны периоды

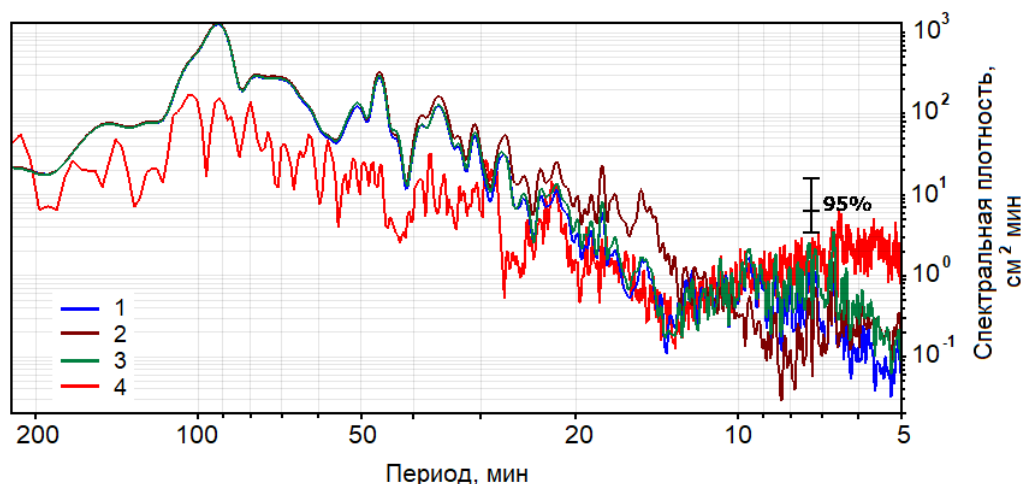


Рис. 3. Спектральные плотности колебаний уровня моря для интервала времени 15–20 января 2022 г.: 1 — прибор 142, 2 — прибор 150, 3 — прибор 147. 4 — спектральная плотность колебаний уровня моря для интервала времени 21 декабря 2021 г.–11 января 2022 г., прибор 142

шельфовых сейш в районе пос. Охотское для наклона дна $\alpha = 0.025$ и ширины шельфа $L=115$ км по приведенной в работах [16, 17] формуле:

$$T = 8\sqrt{L}/(n\sqrt{g\alpha}),$$

где $n = 1, 3, 5, \dots$, — номер моды. Расчет показал, что первая мода шельфовой сейши имеет период 1.52 ч, который близок к максимуму в спектральных плотностях на периоде 1.53 ч. Энергетический пик на этом периоде проявляется для всех точек наблюдения для интервала времени 15–20 января 2022 г. (рис. 3). То есть приходящие от вулкана волны возбуждают в прибрежной зоне о. Сахалин шельфовые сейши. И, учитывая все вышеизложенное, обнаруженные волны можно отнести к волнам цунами, вызванным извержением вулкана Хунга–Тонга–Хунга–Хаапай.

Второй по величине энергии пик с периодом 46.4 мин проявляется в спектрах уровня при подходе волн цунами. Было сделано предположение, что колебания с этим периодом являются сейшми акватории от м. Сима до м. Свободный протяженностью 41.07 км и средней глубиной 40 м. Выполненный расчет периодов собственных колебаний этой акватории с использованием формулы для продольных сейш открытого с одного конца бассейна по формуле, приведенной в работе [16]:

$$T_n = \frac{4L}{(2n+1)\sqrt{gH}}, \quad (1)$$

где H — глубина, L — длина бассейна, g — ускорение силы тяжести, а $n = 0, 1, 2, \dots$ — номер моды, показал для размеров залива, определенных по карте на открытом сайте [17], величину периода первой моды 46.1 мин, что близко к периоду наблюдаемого в спектрах пика.

Расчет по формуле (1) также показал период нулевой моды Гельмгольца 2.30 ч. Близкий к это-

му значению период пика в спектрах соответствует 2.43 ч, отличается от расчетного всего на 5.3%. Для залива Мордвинова рассчитанный период собственных колебаний нулевой моды 1.78 ч, наблюдаемый пик на периоде 1.72 ч почти скрыт основным максимумом в спектре на периоде 1.53 ч. Период первой моды для этого залива 35.6 мин, а наблюдаемого в спектрах пика — 35.9 мин.

Учитывая, что периоды рассчитанных пиков собственных колебаний акваторий близки к периодам обнаруженных спектральных пиков и энергия колебаний уровня на них возрастает при подходе к побережью острова волны цунами, можно сделать заключение о передаче энергии волны цунами сейшам.

Рассмотрим временной ход колебаний уровня моря и спектрограмму, приведенные на рис. 4. На рис. 4, б хорошо виден значительный подъем энергии 15 января 2022 г. в диапазоне периодов волн от 46 мин до 2.37 ч (142.25 мин). Отметим, что такие подъемы энергии наблюдаются не для всех случаев увеличения амплитуд колебаний уровня моря, видных на рис. 4, а. Так, в конце декабря 2021 г. и первой декаде января 2022 г. во время штормов существенно возрастает энергия волновых процессов, но только в диапазоне периодов 1.33–2.37 ч (79.87–142.25 мин). Можно сделать вывод, что эти подъемы энергии не связаны с приходящими волнами типа цунами, а генерируются исключительно в результате воздействия атмосферных возмущений, которые возбуждают шельфовые сейши и другие типы волн в прибрежной зоне о. Сахалин. Это подтверждает и постоянное присутствие в спектрах волновых процессов с разной энергией с периодами 79.87, 91.13 и 142.25 мин.

Отметим, что случаи увеличения энергии колебаний уровня моря, похожие на подъем энергии 15 января 2022 г., наблюдаются в периоды времени с 6 по 10 ноября 2021 г. и с 30 ноября по 3 декабря 2021 г.

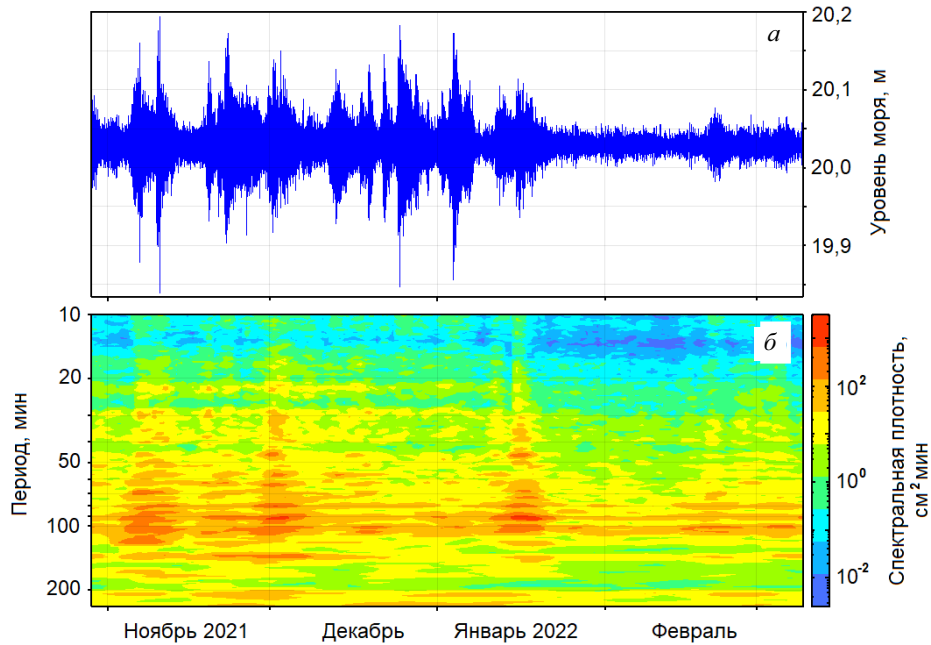


Рис. 4. Временной ход колебаний уровня моря прибора 142 с вычтенным предвычисленным приливом и после полосовой фильтрации 1 мин–4 ч (а) и его спектрограмма (б)

Проверка по каталогу [19] показала, что в Тихом океане наблюдалось землетрясение 6 ноября 2021 г. в 14:37 UTC+0 с магнитудой 6.0 в районе Горонтало, Индонезия. Но землетрясения, которое могло бы вызвать увеличение энергии морских волн, 30 ноября 2021 г. не отмечено, и этот подъем энергии, возможно, связан с метеоусловиями или слабым, но близким землетрясением. Возможно, с учетом времени прихода вызванные землетрясением 6 ноября 2021 г. волн явились причиной увеличения энергии волн в прибрежной акватории о. Сахалин. Однако это событие не является предметом обсуждения в данной статье.

На рис. 3 видно, что спектральная плотность для интервала времени 21 декабря 2021 г.–11 января 2022 г., т.е. когда извержение вулкана Хунга–Тонга–Хунга–Хаапай уже началось, но было не сильным, существенно отличается от спектральной плотности для времени плинианского извержения вулкана. Энергия колебаний на периодах больше 20 мин после взрыва вулкана почти на 1/2 порядка больше. В то же время короткопериодные волны имеют большую энергию, что, очевидно, связано со штормовым волнением, которое хорошо видно на рис. 2, а. Кроме того, на периодах от 70 до 150 минут выделяются три максимума, что, как показано выше, связано с воздействием атмосферных возмущений. И весь график спектральной плотности для временного ряда 21 декабря 2021 г.–11 января 2022 г. представляет комбинацию волн разных периодов и больше похож на спектр фоновых колебаний уровня моря.

Представляет интерес, являются ли волны цунами от удаленного источника аномальными и отли-

чаются ли их статистические характеристики от фонового волнения. Для этого воспользуемся методикой выделения аномальных волн, описанной в работе [20], и применим ее к временным отрезкам данных натурных наблюдений до прихода волн от землетрясения и после их прихода. Из временного ряда подвергнутого полосовой фильтрации 1 мин–4 ч выбраны двухсуточные отрезки до прихода волн цунами 8–9 января 2022 г. и после прихода с 15 января (12:30)–16 января (12:30), и по ним рассчитывались среднее значение уровня в двухсуточном интервале и среднеквадратичное отклонение по формуле:

$$\langle z \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i, \dots \sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (z_i - \langle z \rangle)^2},$$

где N — число измерений (около 2880); z_i — значение уровня моря, отсчитываемое от дна по гидростатической формуле для давления; $\langle z \rangle$ — среднее значение уровня моря в двухсуточном интервале.

Статистический характер волнового процесса может быть оценен по коэффициентам асимметрии и эксцесса, рассчитанным по формуле:

$$S_k = \frac{1}{N\sigma^3} \sum_{i=1}^N (z_i - \langle z \rangle)^3,$$

$$K_u = \frac{1}{N\sigma^4} \sum_{i=1}^N (z_i - \langle z \rangle)^4.$$

Данные расчетов по двухсуточным временным рядам для среднего значения, среднеквадратично-

Таблица. Среднее значение, среднеквадратичное отклонение, значительная амплитуда волнения, аномальная амплитуда, коэффициенты асимметрии и эксцесса для фонового волнения и волновых процессов после прихода цунами

Даты двухсуточного ряда	$\langle z \rangle$, см	σ , см	A_s , см	$2A_s$, см	S_k	K_u
8–9 января	2002.9	0.847	1.69	3.39	0.012	3.09
15–16 января	2002.92	2.947	5.89	11.79	-0.093	2.74

го отклонения, коэффициентов асимметрии и эксцесса приведены в таблице.

Расчитанные статистические характеристики показывают значительную изменчивость. Видно существенное увеличение — в 3.5 раза — среднеквадратичного отклонения для временной серии, содержащей цунами. Для фоновых колебаний, не содержащих волну цунами, коэффициент асимметрии 0.012, эксцесса 3.09, которые мало отличаются от «гауссовых» значений ($S_k = 0$ и $K_u = 3$). Поэтому фоновое волнение в диапазоне периодов от 1 мин–4 ч является гауссовым процессом.

Для отрезка временной серии, содержащей цунами, волновой процесс также мало отличается от «гауссовых» значений, поскольку коэффициент асимметрии -0.093 , эксцесса 2.74. При этом небольшая отрицательная величина коэффициента асимметрии указывает на наличие левосторонней асимметрии, а небольшое отличие значения коэффициента эксцесса от «гауссового» указывает на то, что приход волн цунами от далеких источников не нарушает существенно стационарность волнового поля. Отметим, что некоторые типы волн в океане, например солитоноподобные волны [21] имеют распределение существенно отличающееся от «гауссова».

Далее рассмотрим, соответствуют ли пришедшие волны от землетрясения, вызванного извержением вулкана Хунга–Тонга–Хунга–Хаапай, критерию аномальных волн и не являются ли они фоновыми. Поскольку фоновое волнение, как показано выше, является гауссовым, то его значительную амплитуду можно определить по выражению, приведенному в [20]:

$$A_s = 2\sigma,$$

тогда аномальной волной будет считаться волна с амплитудой

$$A_{ab} > 2A_s = 4\sigma.$$

Приведенные в таблице результаты расчетов A_{ab} и A_s показывают, что значительная высота волн фона около 3.09 см, в то время как приходящие волны цунами имеют значительную высоту в 3.5 раза больше и могут считаться аномальными.

Есть еще одно обстоятельство, на которое авторы настоящей работы решили обратить внимание, поскольку измерители волнения регистрируют так-

же и температуру морской воды и позволяют обнаружить внутренние волны. Некоторые исследователи, например [22, 23], полагают, что длинные гравитационные волны в результате взаимодействия с островами, прибрежным рельефом и континентальным склоном, а также благодаря бароклинной неустойчивости, рассмотренной в [23], могут порождать более короткие волновые процессы, в том числе и внутренние волны.

Поскольку волны цунами также являются длинными гравитационными волнами, был выполнен анализ возможности возбуждения внутренних волн приходящими от удаленных источников волнами. Для этого была рассчитана спектрограмма колебаний температуры воды и проведено ее сравнение со спектрограммой колебаний уровня моря (рис. 5). По спектрограмме колебаний температуры воды (рис. 5, б) хорошо видно, что активность колебаний температуры с начала января 2022 г. начинает резко уменьшаться, что, очевидно, связано с появлением на морской поверхности льдин и к моменту появления устойчивого припая колебания температуры минимальны. Сравнение спектрограмм (рис. 5) показывает, что на момент прихода к побережью о. Сахалин волны цунами, вызванной взрывом вулкана 15 января 2022 г., не наблюдается существенно увеличения энергии колебаний температуры морской воды в диапазоне периодов от 10 до 200 мин.

В то же время рассчитанные спектральные плотности колебаний температуры воды в отсутствие цунами (рис. 6, кривая 2) показывают, что на периоде около 46 мин небольшой подъем энергии наблюдается. Большой подъем присутствует на кривой 1 спектральной плотности для присутствия цунами. Это означает, что сейши зал. Мордвинова с периодом 46.4 мин, сами получившие энергию от волны цунами, передают часть своей энергии внутренним волнам. И поэтому с приходом цунами наблюдается повышение энергии внутренних волн.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием временных рядов натуральных данных колебаний уровня моря, полученных высокоточными измерителями с секундной дискретностью, проведен анализ волнения в прибрежной акватории у юго-восточного побережья о. Сахалин за период декабрь 2021–январь 2022 гг.

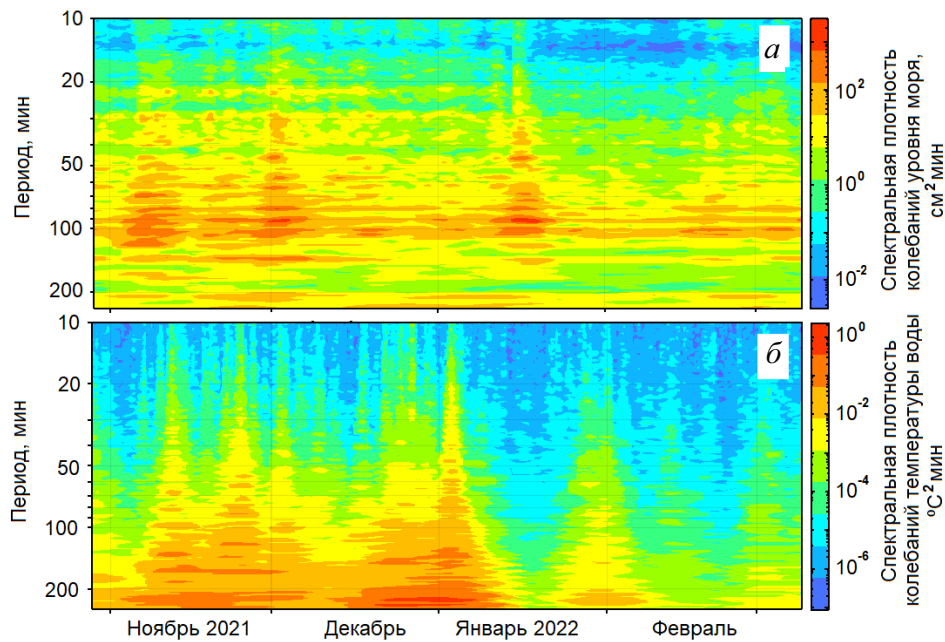


Рис. 5. Спектрограммы колебаний уровня моря (а) и температуры воды (б)

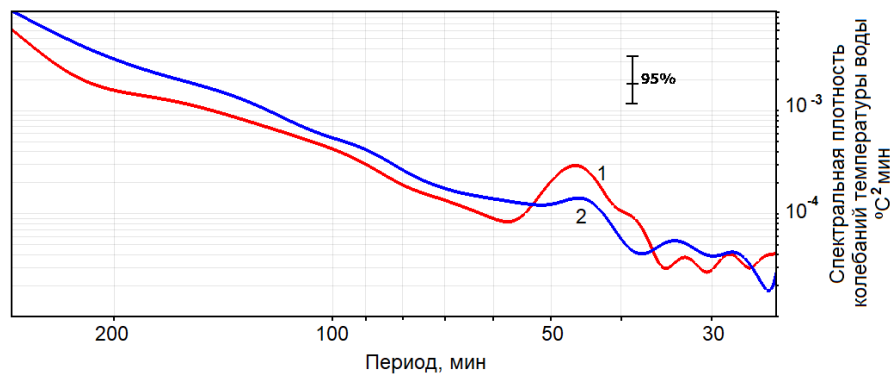


Рис. 6. Спектральные плотности колебаний температуры морской воды 15–19 января (1) и 21–25 февраля (2)

Установлено, что обнаруженные 15 января 2022 г. волновые процессы в диапазоне периодов колебаний уровня моря 15 мин–4 ч, значительно выделяющиеся над фоновыми, связаны с вулканогенным цунами, сгенерированным в результате извержения и мощного взрыва вулкана Хунга–Тонга–Хунга–Хаапай в этот день.

Спектральный анализ временных рядов показал, что обнаруженный максимум в спектрах на периоде 1.53 ч близок к периоду первой моды шельфовой сейши, который равен 1.52 ч. Энергетический пик на этом периоде проявляется для всех точек наблюдения для интервала времени 15–20 января 2022 г., и, значит, приходящие от вулкана волны цунами возбуждают в прибрежной зоне о. Сахалин шельфовые сейши. Кроме того, приходящие волны цунами способствуют генерации сейш в зал. Мордвинова, где проводились наблюдения.

Показано, что случай увеличения энергии колебаний уровня моря в период времени с 5 по 10 ноября

2021 г., аналогичный зарегистрированному при извержении вулкана 15 января 2022 г., может быть вызван землетрясением с магнитудой около 6, произошедшим в Тихом океане в районе Горонтало, Индонезия. Возможно, с учетом времени прихода, что волны, вызванные этим землетрясением, способствовали увеличению энергии колебаний уровня моря в прибрежной зоне о. Сахалин.

Установлено, что спектральная плотность колебаний уровня моря для интервала времени 21 декабря 2021 г.–11 января 2022 г., т.е. времени начала извержения вулкана Хунга–Тонга–Хунга–Хаапай когда оно еще было несильным, значительно отличается от спектральной плотности для времени плинианского извержения вулкана. После взрыва вулкана 15 января 2022 г. энергия колебаний уровня моря на периодах больше 20 мин возросла на 1/2 порядка.

С использованием двухсуточных временных рядов для диапазона периодов колебаний уровня мо-

ря 1 мин–4 ч выполнен анализ статистических характеристик для фонового волнения и цунами, который показал существенное увеличение — в 3.5 раза — среднеквадратичного отклонения для временной серии, содержащей волны цунами. При этом как для временных рядов фона, не содержащих волн цунами, так и для пришедших волн цунами,

коэффициенты асимметрии и эксцесса мало отличаются от «гауссовых» значений. Это указывает на то, что приход волн цунами от далеких источников не нарушает существенно стационарность волнового поля.

Работа выполнена в рамках темы государственно-го задания ИМГиГ ДВО РАН № FWWW-2024-0002.

- [1] Хауген К., Ловхольт Ф., Харбиц С. // *Морская и нефтяная геология*. **22**, N 1–2. 209. (2005).
- [2] Носов М.А. Введение в теорию волн цунами. Учебное пособие. М., 2019.
- [3] Парис Р. Механизмы возникновения вулканических цунами. Фил. Пер. R. Soc., 2015.
- [4] Лэттер Дж.Х. // *Вулканологический бюллетень*. **44**, N 3. 467. (1981). S2CID: 129637214
- [5] NIED 2019 NIED S-net. DOI: 10.17598/nied.000
- [6] NIED 2019 NIED DONET. DOI: 10.17598/nied.0008
- [7] Kubo H., Kubota T., Suzuki W. et all. // *Earth, Planets and Space*. **74:104**. 1. (2022).
- [8] Aoi S., Asano Y., Kiyugui T. et all. // *Earth, Planets and Space*. **72:126**. 1. (2020).
- [9] Носов М.А., Семенцов К.А., Колесов С.В., Прыдун В.В. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. № 6. 66. (2022). (Nosov M.A., Sementsov K.A., Kolesov S.V., Pryadun V.V. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **77**, N 6. 896 (2022)).
- [10] Носов М.А., Семенцов К.А., Колесов С.В., Прыдун В.В. // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. **507**, № 1. 61. (2022).
- [11] Nosov M.A., Kolesov S.V., Sementsov K.A. // *Remote Sensing*. **15**. 3071. (2023).
- [12] Автономный регистратор волнения кварцевый АРВ-К14 // <https://sktbelpa.ru/avtonomnyj-registrator-volneniya-kvartsevyj-arv-k14.html?ysclid=ln2d8gzyzx690764582>
- [13] Ковалев Д.П. // **RU 2018618773**. 19.07.2018.
- [14] Tonga eruption: Shocking images show Hunga Tonga-Hunga Ha’apai almost completely wiped out. <https://www.nzherald.co.nz/>
- [15] Шевченко Г.В., Ивельская Т.Н., Ковалев П.Д. и др. // Доклады академии наук. **438**, N 6. 823. (2011).
- [16] Рабинович А.Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. Л., 1993.
- [17] *Rabinovich A.B. Seiches and Harbor Oscillations. Handbook of Coastal and Ocean Engineering*. World scientific publishing company. Singapur., 2009.
- [18] Карты России и зарубежья http://retromap.ru/1419537_z7_46.335550,142.22351&h=0
- [19] USGS–Search Earthquake Catalog <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>
- [20] Зайцев А.И., Малащенко А.Е., Костенко И.С. и др. // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. №1(94). 33. (2012).
- [21] Сквайр В.А., Ковалев П.Д., Ковалев Д.П. // *Морской гидрофизический журнал*. **37**, № 1. 5. (2021).
- [22] Darelius E., Smedsrud L.H., Osterhus S. et all. // *Tellus Ser. A*. (2009). **61**, N 3. 446.
- [23] Zakharchuk E.A. Internal Waves in the Laptev Sea. Land–Ocean Systems in the Siberian Arctic Dynamics and History. Springer Nature, 1999. 43.

Tsunami Waves off the Southeastern Coast of Sakhalin Island Caused by the Eruption of the Hunga–Tonga–Hunga–Ha’apai Volcano on 15 January 2022 According to Observations by Bottom Devices of Waves

D. P. Kovalev, P. D. Kovalev^a

*Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS
Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russia
E-mail: ^akovalev_pd@outlook.com*

The observation of waves (sea level oscillations) in the coastal water area of the southeastern coast of Sakhalin Island was carried out from November 2021 to May 2022 using bottom-mounted high-precision ARW 14 K devices with one second discreteness. The analysis of the obtained time series revealed the presence of anomalous waves in the range of tsunami waves in January 2022. It is shown that the waves detected on 15 January 2022 with periods of 15 minutes–4 hours, significantly standing out above the background, are associated with volcanic tsunami waves. Spectral analysis of the time series showed that the maximum in the spectra of sea level oscillations found after the volcanic eruption is close to the period of the first mode of the shelf seiche. This indicates that incoming tsunami waves excite shelf seiches in the coastal zone and contribute to the generation of longshore and transverse seiches into Mordvinov Bay. Time series analysis made it possible to establish that the spectral density of sea level oscillations for the time interval of the beginning of the eruption of the Hunga–Tonga–Hunga–Ha’apai volcano from 21 December 2021 to 11 January 2022 significantly differs from the spectral density for the time of the Plinian volcanic eruption. An analysis of the statistical characteristics of sea level oscillations performed on two–day series in the range of periods 1 min–4 h for background waves and tsunamis showed an increase in the rms by 3.5 times for a time series

containing tsunami waves. It has been established that for background time series containing tsunami waves, the coefficients of asymmetry and kurtosis differ little from “Gaussia” values. This indicates that the arrival of tsunami waves from distant sources does not significantly disrupt the stationarity of the wave field in the observation area.

PACS: 91.30.Nw.

Keywords: sea level fluctuations (waves), volcanic eruption, tsunami, statistical characteristics, spectral analysis.

Received 19 February 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2024. **79**, No. . Pp. .

Сведения об авторах

1. Ковалев Дмитрий Петрович — доктор физ.-мат. наук, гл. науч. сотрудник; тел.: (4242) 791-517, e-mail: d.kovalev@imgg.ru.
2. Ковалев Петр Дмитриевич — доктор техн. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (4242) 791-517, e-mail: kovalev_pd@outlook.com.