ВУЛКАНОЛОГИЯ И СЕЙСМОЛОГИЯ, 2025, № 3, с. 80–104

УДК 550.345

ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ЦУНАМИ ДЛЯ ПОБЕРЕЖЬЯ ЗАЛИВА КОРФА (БЕРИНГОВО МОРЕ) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2025 г. В. К. Гусяков[a], *, С. А. Бейзель[b], **, О. И. Гусев[b], *, А. В. Ландер[c], ****, Д. В. Чебров[d], *****, Л. Б. Чубаров[b], ******

[a]*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, просп. Лаврентьева, 6, Новосибирск, 630090 Россия*
[b]*Федеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий, просп. Лаврентьева, 6, Новосибирск, 630090 Россия*
[c]*Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 117997 Россия*
[d]*Камчатский филиал ФИЦ "Единая геофизическая служба РАН", бульвар Пийпа, 9, Петропавловск-Камчатский, 683006 Россия*
**e-mail: gvk@sscc.ru*
***e-mail: beisels@gmail.com*
****e-mail: gusev_oleg_igor@mail.ru*
*****e-mail: land@mitp.ru*
******e-mail: danila@emsd.ru*
*******e-mail: chubarov@ict.nsc.ru*

Поступила в редакцию 24.07.2024 г.
После доработки 04.02.2025 г.
Принята к публикации 18.02.2025 г.

В работе обсуждаются результаты решения задачи об оценке цунамиопасности участка северо-восточного побережья Камчатки в районе поселка Корф, расположенного на песчаной косе в северо-западной части одноименного залива. Для получения этих оценок использовалась методика "наихудшего случая" (worst case). По результатам анализа сейсмичности и исторических данных о проявлениях цунами в западной части Берингова моря были выделены три цунамигенные зоны – ближняя (беринговоморская), региональная (алеутская) и дальняя (чилийская), создающие наибольшую угрозу цунами для исследуемого участка северо-восточного побережья Камчатки. По результатам анализа сейсмичности и тектонических особенностей очаговых зон были определены наборы модельных цунамигенных землетрясений, типичных для каждой из них. Для этих наборов было выполнено численное моделирование возбуждения и распространения цунами, по результатам которого определены наиболее опасные модельные источники. Создаваемые этими источниками максимальные превышения уровня моря для района пос. Корф составили 1.3 м для очагов из ближней (беринговоморской) зоны, 2.4 м для региональной (алеутской) и 2.5 м для дальней (чилийской) зоны. На следующем этапе для таких источников были проведены уточняющие расчеты на последовательностях вложенных расчетных сеток, определившие характеристики воздействия цунами на побережье. Основными результатами работы являются выявление наиболее опасных по отношению к Корфской косе цунамигенных зон, выбор для них модельных источников и оценки экстремальных высот волн цунами, угрожающих этому участку побережья.

Ключевые слова: волны цунами, защищаемое побережье, оценка цунамиопасности, сейсмичность, цунамигенное землетрясение, математическое моделирование

DOI: 10.31857/S0203030625030061, **EDN:** PZJGPZ

ВВЕДЕНИЕ

Восточное побережье Камчатки является одной из самых цунамиопасных зон Дальневосточного побережья России. В непосредственной близости от него проходит Курило-Камчатская сейсмоактивная зона, в пределах которой произошло 93 из 108 цунамигенных событий, имевших документированные проявления на дальневосточном побережье РФ [Гусяков, 2016; NTL/GHTB ..., 2025], в том числе оба наиболее масштабных и разрушительных цунами 1737 и 1952 гг., возникших после сильнейших субдукционных мега-землетрясений магнитуды 9. Помимо этого, восточное побережье Камчатки открыто воздействию цунами из большинства других сейсмоактивных зон Тихого океана, в пределах которого происходит свыше 75% всех цунамигенных событий [Gusiakov et al., 2019].

Протяженность восточного побережья Камчатки составляет около 1800 км, и в отношении цунамиопасности оно делится на две части (южную, тихоокеанскую и северную, беринговоморскую), разделенные Алеутской дугой (рис. 1).

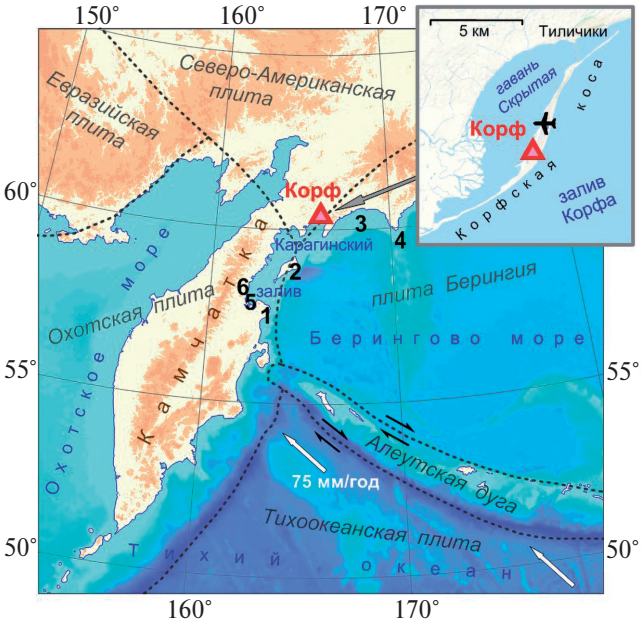


Рис. 1. Местоположение пос. Корф на карте региона. Пунктиром показаны границы литосферных плит. Белые стрелки – направления движения Тихоокеанской плиты относительно Северной Америки, черные стрелки – движения на границах Алеутской дуги. Цифрами помечены упоминаемые в тексте п-ов Озерной (**1**), о. Карагинский (**2**), Олюторский залив (**3**), Олюторский мыс (**4**), Укинская губа (**5**), пос. Хайлюля (**6**).

Если тихоокеанская часть восточного побережья обладает весьма высоким уровнем опасности, то беринговоморское побережье Камчатки в течение длительного времени считалось цунамибезопасным. В первых схемах цунамирайонирования Дальнего Востока (см., например, [Атлас ..., 1978; Пелиновский, Плинк, 1980], беринговоморское побережье Камчатки не рассматривалось совсем. Однако сильнейшее в XX веке Чилийское трансокеанское цунами 22 мая 1960 г. проявилось на всем его протяжении с высотами до 5–6 м и нанесло значительный материальный ущерб. Возникновение Озерновского цунами 22 ноября 1969 г. с заплесками до 10–15 м на ближайшем участке побережья вообще оказалось неожиданным [Федотов и др., 1973]. После этого события стало ясно, что схемы сейсмо- и цунамирайонирования беринговоморского побережья Камчатки нуждаются в пересмотре. Уже на карте ОСР-97 появилась 9-балльная (для повторяемости 500 лет) зона, протягивающаяся на север от п-ова Озерной через о. Карагинский до залива Корфа [Комплект карт ..., 1999]. 9–10-балльное Олюторское землетрясение 2006 г. (магнитуда $M_w = 7.6$) подтвердило высокую сейсмоопасность этой зоны [Ландер и др., 2010; Иванова и др., 2010]. Значительная часть этой 9-балльной зоны возможных очагов землетрясений (ВОЗ) на территории северо-восточной части Камчатки находится под дном океана, что определяет потенциальную цунамиопасность западной части беринговоморского побережья.

О реальности угрозы цунами для побережья Карагинского залива свидетельствует также обнаружение геологических следов палеоцунами в торфяных отложениях прибрежных болот и маршей Укинской губы, острова Карагинский и на северном побережье Олюторского залива (см. рис. 1). В результате полевых работ на о. Карагинском были выявлены три доисторических цунами с датировками около 720, 820 и 940 гг. н.э. [Мелекесцев, Курбатов, 1997]. В районе пос. Хайлюля были найдены прослои торфа, содержащего цунамигенный песчаный слой, возраст которого был определен в интервале 1500–1550 гг. н.э.

Настоящее исследование было выполнено с целью получения оценок цунамиопасности пос. Корф, расположенного в северо-западной части одноименного залива (см. рис. 1, врезка).

Этот поселок, входящий в состав Олюторского района Камчатского края, находится на узкой песчано-галечной косе, общей протяженностью около 15 км, протягивающейся в северо-восточном направлении вдоль западного берега залива Корфа, который, в свою очередь, является частью обширного Карагинского залива, подверженного воздействию цунами практически из любой цунамигенной зоны Тихого океана. Ширина песчаной косы в районе расположения поселка достигает 500–600 м, при этом ее максимальная высота над уровнем моря не превышает 4–5 м, что при отсутствии безопасных путей и мест для эвакуации делает поселок уязвимым даже при умеренных цунами. Вторым важным объектом, также находящимся на косе, является аэропорт, взлетно-посадочная полоса которого длиной 1.6 км принимает регулярные рейсы из Петропавловска-Камчатского.

В тектоническом плане пос. Корф располагается в районе сочленения трех крупнейших литосферных плит: Тихоокеанской, Северо-Американской и Евразийской, относительные движения которых определяют происходящие здесь деформации и сейсмичность. В этом районе Северо-Американская и Тихоокеанская плиты непосредственно не соприкасаются, а взаимодействуют через серию пограничных плит и блоков меньшего размера (см. рис. 1). Крупнейшие из пограничных блоков – плита Берингия, занимающая практически всю акваторию Берингова моря [Ландер и др., 1994; Гордеев и др., 2015], и Охотская плита [Баранов, 1982; Seno et al., 1996]. Границы между плитами иногда выражены линейными зонами землетрясений, но в регионе широко развиты и области рассеянной сейсмичности.

Оценка цунамиопасности пос. Корф выполнялась в рамках сценарного подхода с использованием методики “наихудшего случая” (worst case) и сопровождалась получением оценок повторяемости экстремальных расчетных высот.

Сценарный подход реализуется в несколько последовательных этапов. На первом из них проводится анализ сейсмичности зон, в которых могут располагаться потенциально цунамигенные источники. На следующем этапе оцениваются параметры возможных максимально сильных землетрясений в пределах выделенных зон и определяется их наиболее опасное (по отношению к защищаемому побережью) положение. Для выбранных моделей очагов по доступным инструментальным, историческим или палеоданным определяются их повторяемости. Наконец, на третьем этапе проводятся расчеты распространения цунами на последовательности вложенных сеток (на наиболее детальной из них – с учетом наката) и определяются требуемые характеристики цунамиопасности.

Подобный подход к изучению цунамиопасности побережья всего Берингова моря использовался, например, в работе [Medvedeva et al., 2023], в которой были получены оценки высот в ряде ключевых пунктов его побережья для нескольких сильнейших тихоокеанских цунами XX столетия, включая Чилийское цунами 22 мая 1960 г. Этот же район изучался в работе [Петухин и др., 2015], в которой на результатах численного моделирования показано, что отложения палеоцунами с заплесками до 8–10 м в районе п-ова Озерной, описанные в работе [Pinegina, Bourgeois, 2001], могут быть следами воздействия цунами от местных и региональных подводных землетрясений.

При исследовании цунамиопасности пос. Корф необходимо рассматривать три группы потенциально опасных сейсмических очагов. К первой относятся “локальные” очаги, расположенные вдоль западной окраины Берингова моря. Ко второй группе относятся “региональные” очаги, расположенные в западном и центральном сегментах Алеутской сейсмической зоны, которые имеют историю возникновения сильных цунамигенных землетрясений [Соловьев, Го, 1975]. Наконец, к третьей группе относятся “удаленные” очаги, расположенные в других сейсмоактивных зонах Тихого океана, в первую очередь, в южно-чилийской зоне, представляющей, как показано в работе [Бейзель и др., 2014а], главную опасность для всего восточного побережья Камчатки.

СЕЙСМИЧНОСТЬ И ЦУНАМИГЕННЫЕ ОЧАГИ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БЕРИНГОВА МОРЯ

Взаимодействие Берингии, Охотской и Северо-Американской плит в рассматриваемом регионе порождает область рассеяной сейсмичности (рис. 2), в восточной части которой выделяется

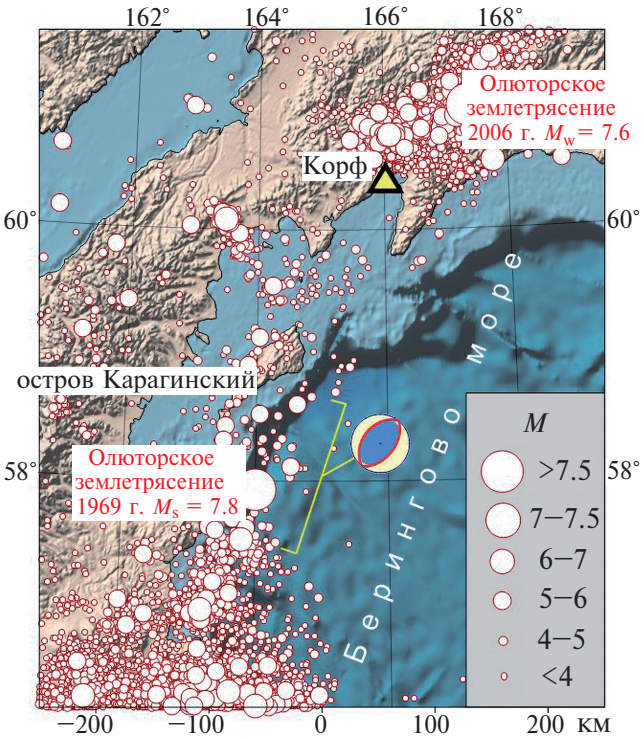


Рис. 2. Карта сейсмичности южной части Корякского сейсмического пояса по данным Каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов [Каталог..., 1962–2024].
Для интервала, отмеченного на карте желтой линией, приведена диаграмма среднего тензора для землетрясений 1976–2022 гг., построенная по данным каталога CMT [Global CMT Catalog, 2024].

Корякский сейсмический пояс, где систематически происходят землетрясения с магнитудами больше 5 [Левина и др., 2013]. Пояс протянулся от сочленения Камчатской и Алеутской дуг сначала на северо-восток преимущественно по акваторям беринговоморской окраины до залива Корфа, затем по континентальным районам Корякского нагорья и далее на Чукотку. Все землетрясения этого пояса являются мелкофокусными, два сильнейших события: Озерновское 22.11.1969 г. магнитуды $M_w = 7.7$ и Олюторское 20.04.2006 г. магнитуды $M_w = 7.6$.

Большинство землетрясений пояса с эпицентрами в морской акватории зафиксировано в южной части Корякского пояса (южнее залива Корфа). Здесь выделяются события, произошедшие под ложем Командорской котловины на глубинах моря до 3500 м у подножия крутого континентального склона Камчатки. Механизмы этих событий указывают на условия северо-западного тектонического сжатия, характерного для региона (см. рис. 2). Сильнейшее Озерновское землетрясение 22.11.1969 г., эпицентр которого находился вблизи крутого континентального склона восточнее п-ова Озерной, привело к возникновению разрушительного цунами с высотами до 10–15 м на ближайшем к очагу участке побережья полуострова. Возникновение подобного землетрясения в районе о. Карагинский или к северу от него представляет потенциальную опасность для пос. Корф. Поскольку землетрясение 1969 года является единственным достоверно известным цунамигенным событием в районе Карагинского залива, остановимся на нем несколько подробнее, следуя, в основном, работам [Заякин, 1981; Федотов и др., 1973].

Землетрясение с $M_w = 7.4$ (по каталогу ISC-GEM [The ISC-GEM ..., 2023]) произошло 22 ноября 1969 г. в 23:09:35 по Гринвичу (11:09:35 23 ноября по местному времени) в западной части Берингова моря в районе залива Озерной у северо-восточного побережья Камчатки. Оно вызвало сотрясения силой до 8 баллов в ближайших пунктах побережья и породило волны цунами с высотой до 10–15 м. Для рассматриваемого района оно оказалось самым крупным за всю историю макросейсмических и инструментальных наблюдений и самым сильным землетрясением на Камчатке за время после Шипунского землетрясения 4 мая 1959 г. $M_w = 7.9$.

Специального полевого экспедиционного обследования последствий Озерновского цунами не проводилось (такие обследования вошли в практику после 1992 г.). По имеющимся весьма ограниченным данным о высотах волн на ближайшем побережье интенсивность этого цунами по шкале Соловьева-Имамуры может быть оценена величиной 2–3. В каталог [Соловьев, 1978] оно вошло с интенсивностью 3 и на тот момент было одним из восьми сильнейших цунами Курило-Камчатского региона.

Других примеров проявления региональных цунами для беринговоморского побережья Камчатки каталоги [Соловьев, 1978; Соловьев и др., 1986; Заякин, 1996] не содержат.

Опираясь на имеющиеся материалы по сейсмичности Корякского сейсмического пояса, в частности, его подводной части, протягивающейся вдоль края беринговоморского шельфа, и с учетом четырех известных механизмов землетрясений этого района, а также модели движения плиты Берингия [Ландер и др., 1994],

были построены пять модельных очагов подводных землетрясений, которые могут вызвать цунами в Карагинском заливе, угрожающее пос. Корф. Площадки разрыва этих модельных очагов и тензорные диаграммы показаны на рис. 3, а их очаговые параметры приведены в табл. 1 (модели L1–L5). Площадки разрыва всех модельных очагов имеют прямоугольную форму, подвижки на площадках предполагаются однородными. Размеры площадок определены по магнитуде с использованием эмпирических соотношений [Papazachos et al., 2004]. Всем модельным землетрясениям L1–L5 присвоена магнитуда $M_w = 8.0$, несколько превышающая максимальное инструментально зарегистрированное значение для этого района, равное 7.8.

Модельные беринговоморские очаги располагаются вблизи крутых континентальных склонов, что соответствует положению сильнейших событий этого района, регистрируемых инструментально. Механизмы очагов L1–L3 также приблизительно соответствуют реальным землетрясениям, что можно увидеть из сравнения модельных тензорных диаграмм на рис. 3 со средним тензором на рис. 2. Простирание модельных площадок разрыва немного

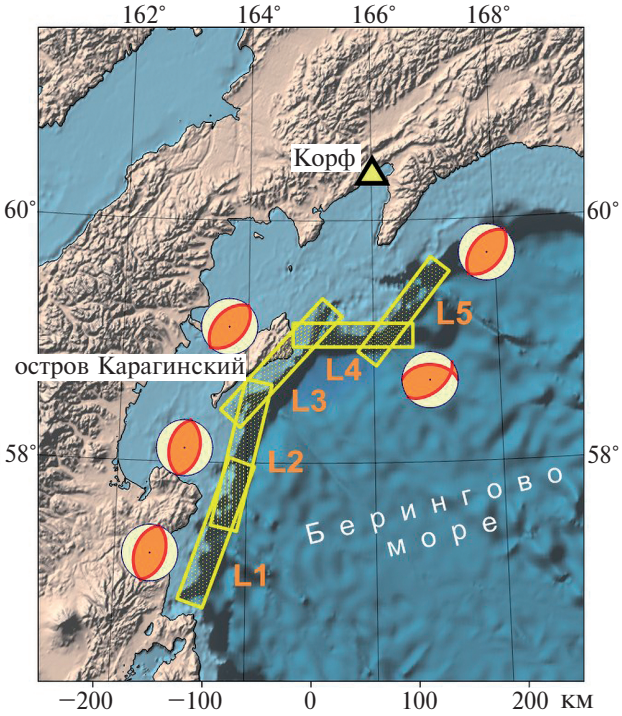


Рис. 3. Расположение модельных “беринговоморских” очагов L1–L5 в восточной части Корякского сейсмического пояса.
Желтыми прямоугольниками показаны проекции на свободную поверхность очаговых площадок разрыва. Тензорные диаграммы соответствуют модельным механизмам подвижек.

Таблица 1. Параметры использованных модельных источников

Id	Lat (N), град	Long (E), град	L, км	W, км	DIP, град	RAKE, град	STRIKE, град	D_0, м	h_0, км	M_w
L1	57.5	163.4	138	35	45	90	199	8.7	2	8.0
L2	58.1	163.7	138	35	45	90	193	8.7	2	8.0
L3	58.9	164.4	138	35	45	90	222	8.7	2	8.0
L4	59.2	165.7	110	30	45	120	271	6.3	2	7.8
L5	59.3	166.3	110	30	45	90	219	6.3	2	7.8
R1	55.5	167.4	450	150	20	170	307	11.6	5	9.0
R1b	55.5	167.4	450	150	20	135	307	11.6	5	9.0
R1c	55.5	167.4	450	150	20	110	307	11.6	5	9.0
R2	53.5	172	450	150	20	150	302	11.6	5	9.0
R3	52	177.2	450	150	20	100	285	11.6	5	9.0
R4	51.7	–177.2	450	150	20	90	264	11.6	5	9.0
R5	59.3	166.3	450	150	20	90	255	11.6	5	9.0
D1	–42	–75	800	300	20	90	7	20	10	9.5
D2	–35	–73.5	800	300	20	90	19	20	10	9.5
D3	–29	–72	800	300	20	90	9	20	10	9.5

Примечание. Id – идентификатор модели, Lat (N) – широта центра нижнего края площадки разрыва, Long (E) – долгота центра нижнего края разрыва, L – длина (км) и W – ширина (км) площадки разрыва, DIP – угол падения разрыва, RAKE – направление подвижки в плоскости разрыва, STRIKE – угол простирания плоскости разрыва, D_0 – подвижка по разрыву (м), h_0 – глубина верхнего края разрыва (км).

скорректировано, исходя из направления простирания континентального склона на конкретном участке. Модельные очаги L4 и L5 располагаются в районе, где относительно сильных землетрясений к настоящему времени не зарегистрировано. Модели этих очагов построены по аналогии с предыдущими, исходя из простирания продолжающегося на северо-восток крутого континентального склона. Механизмы моделей L1–L3 и L5 являются крутыми взбросами. В отличие от них модель L4, расположенная на субширотном участке склона, включает существенную сдвиговую составляющую, соответствующую направлению движения плиты Берингии.

Для модельных очагов L1–L5 были выполнены предварительные расчеты распространения цунами на 10 часов физического времени, с использованием расчетной сетки “Карагинская” (табл. 2) с шагом в 30 угловых секунд.

На рис. 4 приведены графики эмпирических законов повторяемости землетрясений (в кумулятивной форме) для всех трех рассматриваемых цунамигенных зон, представляющих опасность для района пос. Корф. Оценки повторяемости основаны в основном на глобальном каталоге ISC-isf [ISC-isf catalog, 2020] и максимальных из представленных в нем для каждого землетрясения магнитудах. В отдельных случаях данные добавлялись или корректировались с использованием каталогов ANSS [ANSS (USGS) catalog, 2024] и Каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов [Каталог ..., 1962–2024]. Для окончательного использования все графики были сглажены.

График повторяемости для ближней (беринговоморской) зоны на рис. 4 соответствует синей кривой 1, построенной по 1080 землетрясениям южных акваторий Корякского сейсмического пояса с магнитудами $M \geqslant 3$, сильнейшим из которых было Озерновское

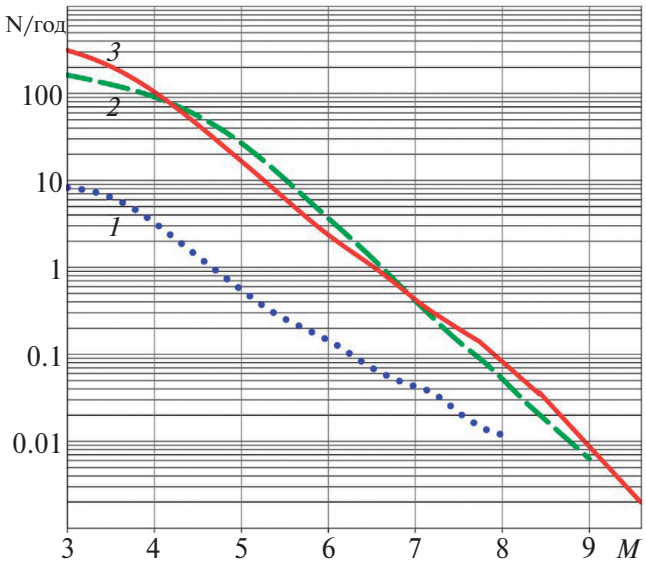


Рис. 4. Эмпирические кумулятивные графики повторяемости мелкофокусных (глубины до 70 км) землетрясений для трех цунамигенных зон, создающих наибольшую угрозу цунами для исследуемого участка северо-восточного побережья Камчатки. 1 – ближняя беринговоморская (1923–2020 гг.), 2 – региональная алеутская (1923–2022 гг.), 3 – дальняя чилийская (1923–2020 гг.). Использованы глобальные каталоги ISC-isf [ISC-isf catalog, 2020], ANSS [ANSS (USGS) catalog, 2024] и Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов [Каталог ..., 1962–2024].

землетрясение 22.11.1969 г. Путем экстраполяции кривой повторяемости в сторону больших магнитуд для ближней зоны была получена оценка среднего периода повторяемости землетрясений с M 8.0, равная 80 годам. Эта оценка принята для цунамигенных землетрясений, моделируемых очагами L1–L5.

СЕЙСМИЧНОСТЬ И ЦУНАМИГЕННЫЕ ОЧАГИ АЛЕУТСКОЙ ДУГИ

Алеутская островная дуга (включая п-ов Аляска) простирается примерно на 3000 км от одноименного залива на востоке до полуострова Камчатка на западе и относится к числу

Таблица 2. Параметры расчетных областей

Название расчетной области	Географические границы		Шаг сетки	Размерность массива
	широта	долгота		
Корф	60.2°–60.5° с.ш.	165.65°–166.45° в.д.	3"	361×961
Карагинская	57°–61° с.ш.	161.5°–168.5° в.д.	30"	481×841
Алеутская	50°–61° с.ш.	161°–177° в.д.	1'	661×961
Тихоокеанская	60° ю.ш. – 65° с.ш.	100° в.д. – 60° з.д.	2'	3751×6001

наиболее сейсмоактивных регионов мира. Эта дуга характеризуется не только высоким уровнем постоянной (фоновой) сейсмичности, но и возможностью возникновения сильнейших (с *M* более 8.5) субдукционных землетрясений, обладающих высоким цунамигенным потенциалом. Глубоководный Алеутский желоб, протянувшийся южнее дуги, маркирует границу, по которой Тихоокеанская плита погружается под Берингию, результатом чего является сейсмичность, развитие островного и подводного вулканизма.

Для приближенной оценки скоростей на большей части Алеутской границы можно использовать модели вращения Тихоокеанской и Северо-Американских плит [Argus et al., 2011; Bird, 2003]. Их относительное перемещение постепенно меняется с востока, где погружение происходит почти перпендикулярно дуге со скоростью около 60 мм/год, на запад, где плиты движутся приблизительно параллельно без погружения с относительной скоростью ~75 мм/год.

Алеутскую дугу можно разделить на три сегмента: восточный, центральный и западный. Восточный сегмент простирается от п-ова Аляска до Лисьих островов. Движение на нем характеризуется почти ортогональной субдукцией Тихоокеанской плиты под мощную континентальную литосферу. На этом сегменте проявляется интенсивная вулканическая активность, и он известен возникновением предельно сильных ($M \geqslant 9$) субдукционных мега-землетрясений с надвиговым типом механизма (рис. 5). Сильнейшее землетрясение этого сегмента, зарегистрированное инструментально, произошло 1 апреля 1946 г. и вызвало разрушительное цунами, распространившееся по всему Тихому океану. Это землетрясение относится к типу “медленных”, так называемых “цунами-землетрясений” [Kanamori, 1972]. В доинструментальный период в этом же сегменте произошло еще одно сильное землетрясение, породившее Санах-Кадьякское цунами 11 июля 1788 г., которое проявилось в огромной области

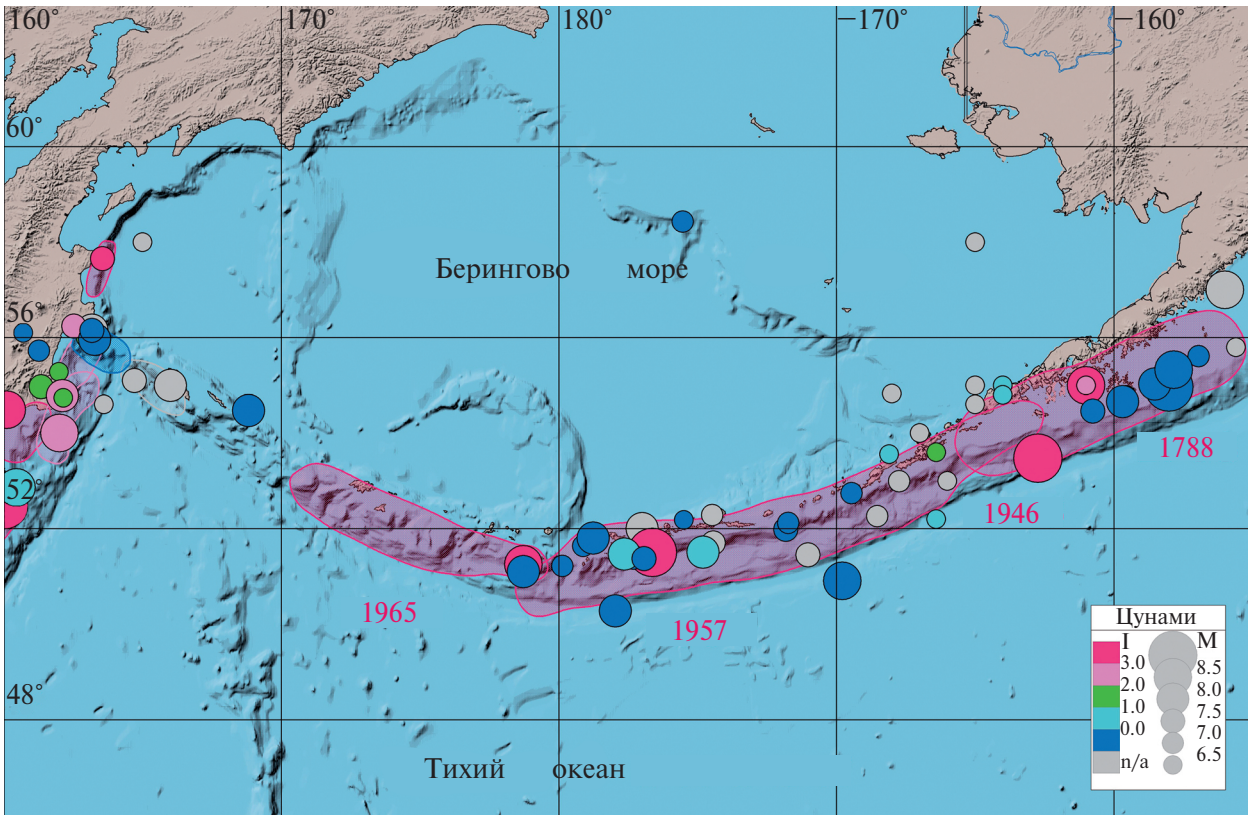


Рис. 5. Карта эпицентров алеутских цунамигенных землетрясений.
Размер кружков пропорционален магнитуде землетрясения, цвет соответствует интенсивности цунами по шкале Соловьева-Имамуры. Очаги мега-землетрясений 1788, 1946, 1957 и 1965 гг. показаны в виде площадных фигур с красной заливкой.

протяженностью не менее 700 км со средними высотами 5 м и максимальными заплесками, достигавшими на островах Унга и Санах в несколько десятков метров [Соловьев, 1968].

Центральный сегмент Алеутской дуги простирается от Андреановских островов на востоке до Крысьих островов на западе. Движение этого сегмента дуги характеризуется увеличивающейся в западном направлении сдвиговой составляющей, которая накладывается на общую субдукцию Тихоокеанской плиты под более тонкую океаническую кору. Несмотря на увеличивающуюся касательную составляющую конвергенции плит, на этом сегменте также присутствует активный вулканизм и возникают сильнейшие землетрясения с преимущественно надвиговым типом механизма. Сильнейшими событиями на этом сегменте были цунамигенные землетрясения 9 июля 1957 г. (M_w = 8.6) и 7 мая 1986 г. (M_w = 8.0).

Западный сегмент Алеутской дуги, простирающийся от западной оконечности Крысьих островов до Командор, существенно отличается от двух предыдущих. В его восточной части заканчивается наклонная погруженная сейсмофокальная зона и западнее преобладают трансформные перемещения вдоль дуги. В пределах западного сегмента отсутствует современный вулканизм, а западнее долготы ~172.5° сейсмичность представлена в основном мелкофокусными событиями с глубинами менее 70 км.

За весь инструментальный период наблюдений на западном сегменте Алеутской дуги не было зарегистрировано событий с $M > 7.7$ (землетрясение 17 июля 2017 г. на тыловом разломе Беринга). При этом на подошве сегмента в зоне его сцепления с Тихоокеанской плитой наблюдались в основном землетрясения с магнитудой, не превышающей 7 (максимальное – 6 ноября 1990 г. M_w = 7.1). Таким образом, на западном сегменте дуги, в отличие от остальных, не известны современные сильнейшие землетрясения.

Поэтому весь западный сегмент Алеутской дуги еще в 1971 г. [Sykes, 1971] был идентифицирован как долгоживущая сейсмическая брешь, создающая угрозу всему восточному побережью Камчатки и северных Курил [Лобковский и др., 2014]. Суматранское мега-землетрясение 26 декабря 2004 г., которое произошло в сходной геодинамической ситуации, дало еще один аргумент в пользу такой интерпретации, и в настоящее время многие сейсмологи [Wesson et al., 2008; Лобковский и др., 2014] рассматривают западный сегмент Алеутской дуги как потенциально опасную сейсмическую брешь, способную сработать в любой момент, в том числе путем возникновения здесь мега-землетрясения магнитуды 8.5 и более с образованием разрушительного цунами. Это дает основание для рассмотрения западного участка Алеутской дуги как потенциально цунамиопасного для пос. Корф.

Вследствие изогнутости и большой протяженности Алеутской дуги для разных ее частей характерны различные механизмы сильных (с $M > 7$) землетрясений. В соответствии с направлением погружения взаимодействующих литосферных плит, в пределах дуги происходит наблюдаемое закономерное изменение преобладающих типов тензоров сейсмического момента: от надвигов на востоке до сдвигов на западе. Кроме того, непосредственно на поверхности субдукции (главной литосферной границе раздела в зонах островных дуг) на западе дуги возникает особая ситуация. Если на востоке Тихоокеанская плита погружается под Северо-Американскую плиту приблизительно ортогонально их границе, то на западе она движется под дугой параллельно простиранию последней без заметного дальнейшего погружения. В результате на западе в осевой части дуги также наблюдаются механизмы пологих надвигов, но, в отличие от востока, с подвижками, постепенно разворачивающимися к направлению простирания.

На рис. 6а показаны эпицентры всех инструментально зарегистрированных сильных ($M > 7$) мелкофокусных (глубины менее 70 км) землетрясений, включая события внешнего океанического вала, иногда порождающие цунами. Также на этом рисунке для различных участков дуги приведены диаграммы типичных тензоров сейсмического момента землетрясений. Соответствующие каждому участку тензоры вычислены как средние по выборке мелкофокусных событий из каталога CMT [Global CMT Catalog, 2024]. Рисунок с очевидностью демонстрирует отмеченную выше закономерность

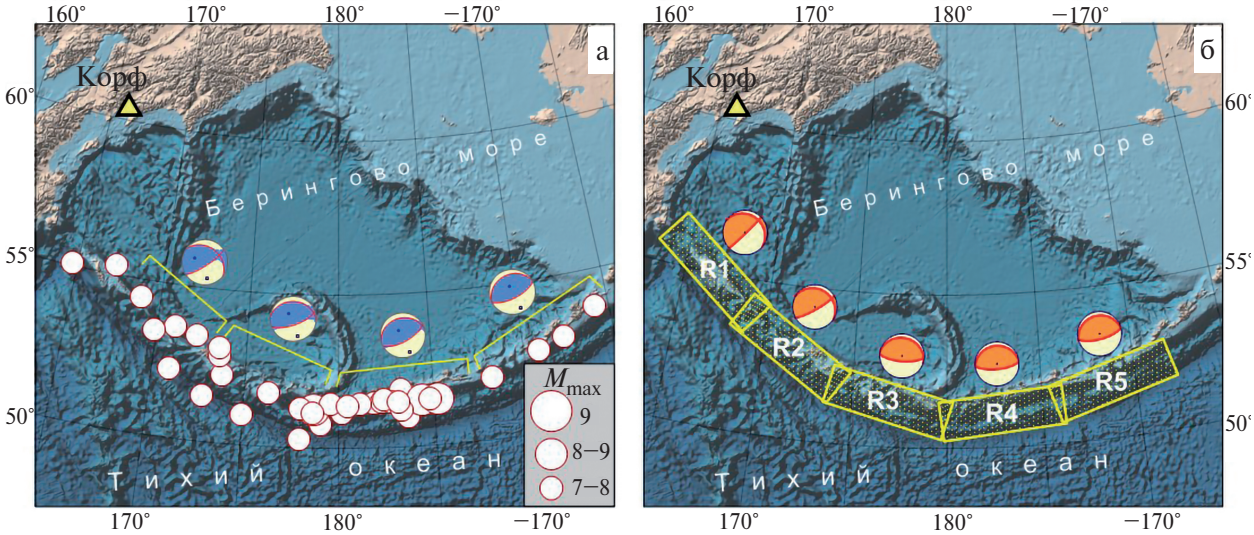


Рис. 6. Характеристики сейсмической активности Алеутской сейсмогенной зоны.
(а) – карта эпицентров сильных ($M \geqslant 7.0$) субдукционных землетрясений с глубинами очагов до 70 км за весь период инструментальных наблюдений (1900–2022 гг.) и типичные (средние) механизмы очагов для различных ее частей, желтыми линиями отмечены отрезки Алеутской дуги, по которым проводилось осреднение тензоров сейсмического момента из каталога CMT [Global CMT Catalog, 2024]; (б) – площадки очагов модельных землетрясений магнитуды 9.0 в западном и центральном сегментах Алеутской сейсмогенной зоны, построенные для расчетов волн цунами от региональных источников, угрожающих пос. Корф, для каждой из площадок показаны соответствующие им тензоры сейсмического момента. Параметры модельных очагов приведены в табл. 1.

изменения типичных механизмов сильных землетрясений Алеутской островной дуги.

Исходя из этих особенностей Алеутского сейсмического пояса и расстояний до рассматриваемого участка камчатского побережья (Корфская коса), был произведен выбор площадок, механизмов и магнитуд модельных очагов, создающих для него потенциальную угрозу (см. табл. 1, модели R1–R5). На рис. 6б показаны расположения площадок разрыва для этих модельных очагов, с параметрами, соответствующими землетрясениям с магнитудой $M_w = 9.0$. Нужно отметить, что максимальной для алеутских землетрясений за весь период инструментальных наблюдений была магнитуда $M_w = 8.7$ (землетрясение 04.02.1965 г. на западном сегменте дуги). Площадки разрыва всех модельных очагов R1–R5 имеют плоскую прямоугольную форму с размерами 450 км на 150 км, подвижки на площадках предполагаются однородными и равными 11.6 м, что определяет сейсмический момент $M_0 = 3.7 \cdot 10^{22}$ н×м, который соответствует моментной магнитуде $M_w = 9.0$. Верхние кромки площадок модельных очагов R1–R5 параллельны местному простиранию глубоководного желоба, соответствующему в табл. 1 углу STRIKE. Угол падения (DIP) плоскости разрыва и направление подвижки (RAKE) соответствуют типичным для этого участка дуги механизмам землетрясений, представленным на рис. 6.

Были также рассмотрены два дополнительных варианта R1b и R1c модельного очага R1, отличающиеся от исходного уменьшенным углом подвижки по разлому (угол RAKE) до 135° и 110° соответственно. Основанием для такого дополнения стала упомянутая выше аналогия сейсмотектонической обстановки на самом крайнем западе Алеутской дуги с сейсмотектоникой в районе возникновения Суматранского землетрясения 26.12.2004 г., происшедшего в зоне контакта Индийской плиты и плиты Сунда. Как известно, при общем латеральном движении плит относительно друг друга, механизм основного события оказался близким к надвигу (угол RAKE = 110°).

Для модельных очагов R1–R5 были выполнены предварительные расчеты распространения цунами на 10 ч физического времени, с использованием расчетной сетки “Алеутская” (см. табл. 2) с шагом в 1 угловую минуту.

Оценки повторяемости цунамигенных землетрясений, моделируемых очагами R1–R5, основаны на каталогах ISC-isf [ISC-isf catalog, 2020] за период с 1923 г. по сентябрь 2020 г. и ANSS

[ANSS (USGS) catalog, 2024] для периода с октября 2020 г. по 2022 г. Выборка землетрясений пространственно соответствует верхней пологой части Алеутской зоны субдукции, а по простиранию дуги покрывает область, занимаемую модельными очагами R1–R5. Построенный по данным этих каталогов кумулятивный график повторяемости показан на рис. 4 (зеленая кривая 2). Для получения оценок повторяемости модельных очагов R1–R5 эмпирический график был сглажен и продолжен в область магнитуд 9.0. По этой кривой было определено среднее значение повторяемости для предельно сильных цунамигенных землетрясений в центральном и западном сегментах Алеутской дуги в 150 лет.

СЕЙСМИЧНОСТЬ И ЦУНАМИГЕННЫЕ ОЧАГИ В ДАЛЬНЕЙ ЗОНЕ

Западное побережье Южной Америки является, возможно, самым сейсмически активным регионом мира, известным высоким уровнем постоянной (фоновой) сейсмичности и возможностью возникновения предельно сильных землетрясений. Именно здесь 22 мая 1960 г. произошло сильнейшее из инструментально зарегистрированных субдукционных землетрясений, моментная магнитуда которого сейчас оценивается величиной 9.6. Оно вызвало самое сильное из известных трансокеанское цунами с высотами заплеска на ближайшем чилийском побережье достигавшими 12–15 м, на Гавайях – до 9 м и на тихоокеанском побережье Японии – 4–6 м. Благодаря наличию многочисленных письменных источников периода испанской колонизации Южной Америки, исторический каталог землетрясений этого региона, покрывающий почти 500 лет, содержит 235 событий и является третьим по величине среди региональных каталогов (после средиземноморского и японского).

За инструментальный период (с 1900 г.) в чилийской зоне произошло около 30 землетрясений с магнитудой более 8, в том числе 20 на глубинах менее 60 км (рис. 7). Все они оказались цунамигенными, даже несмотря на то, что некоторые очаги находились вблизи берега или даже располагались полностью под континентом. Впервые на эту особенность

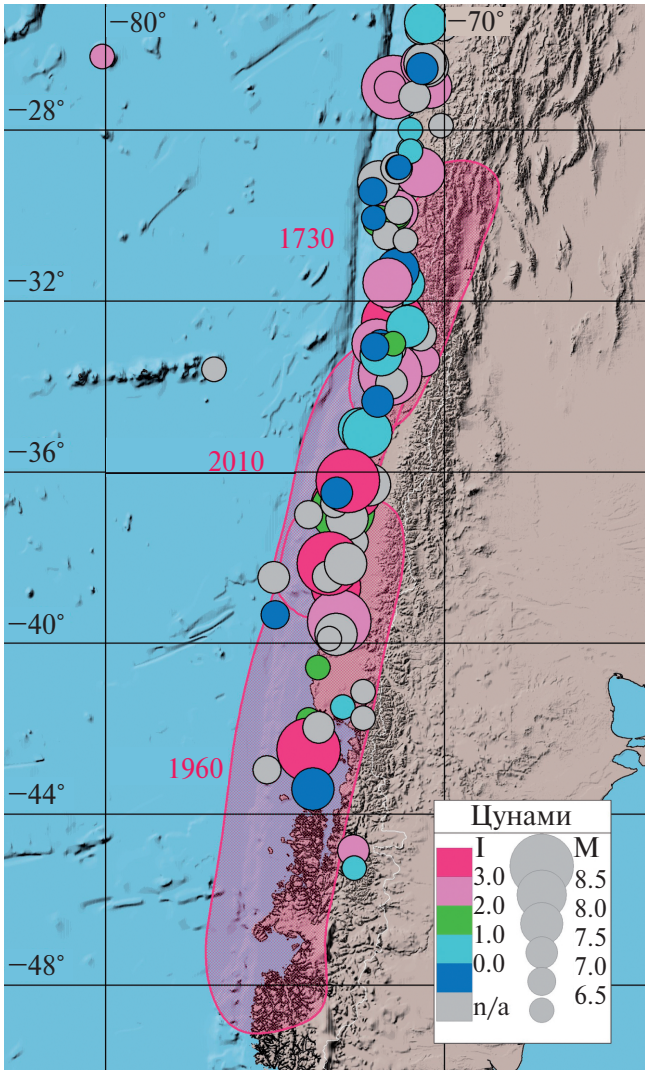


Рис. 7. Карта эпицентров цунамигенных землетрясений района Южного Чили.
Размер кружков пропорционален магнитуде землетрясения, цвет соответствует интенсивности цунами по шкале Соловьева-Имамуры. Очаги сильнейших землетрясений 1730, 1960 и 2010 гг., породивших трансокеанские цунами, показаны в виде площадных фигур с красной заливкой.

южно-американских землетрясений обратил внимание Б. Гутенберг в работе [Gutenberg, 1939]. Изучая чилийские землетрясения 9 мая 1877 г. и 11 ноября 1922 г., очаги которых целиком располагались в пределах суши и которые, тем не менее, вызвали ощутимые цунами, он пришел к выводу, что причиной генерации этих цунами могли быть подводные оползни, порожденные землетрясениями на крутом континентальном склоне Южной Америки.

В выборе области удаленных модельных очагов, опасных для района исследований (залив

Корфа), авторы опирались на результаты анализа, выполненного ими в 2014 г. по материалам численного моделирования трансокеанского распространения цунами от землетрясений магнитуды 9.0, очаги которых располагались по периферии Тихого океана вдоль всех основных субдукционных зон [Бейзель и др., 2014а]. В этой работе было показано, что наиболее опасными для Дальневосточного побережья России являются очаги, расположенные в районе южно-чилийского побережья. В силу специфики взаимного расположения источника и области воздействия (дистанция распространения в 180 угловых градусов приводит к заметной конвергенции фронта цунами при распространении на сфере), сильнейшие цунамигенные землетрясения из этой зоны оказывают наибольшее воздействие на побережье Курильских островов и Камчатки. Дополнительным фактором усиления, сравнительно с другими цунамигенными зонами Тихого океана, является также наличие обрывистого побережья и крутого континентального склона у берегов Южной Америки, которые служат весьма эффективными отражателями энергии цунами.

Результаты расчетов подтверждаются данными наблюдений во многих пунктах Дальневосточного побережья во время Чилийского цунами 22 мая 1960 г. Согласно каталогу С.Л. Соловьева [Соловьев, 1978], максимальные заплески на восточном побережье Камчатки при этом цунами достигали 5–7 м (бухты Вилючинская и Моржовая), высоты волн на о. Беринга составляли 3–3.5 м, на участке корякского побережья вблизи пос. Оссора – 2.5 м.

Исходя из результатов, изложенных в упомянутой статье [Бейзель и др. 2014а], а также имеющихся наблюденных данных и сейсмотектонических особенностей региона, были выбраны три модельных очага в южной части чилийской цунамигенной зоны (рис. 8). Размеры площадок разрыва и величины подвижки по ним были подобраны таким образом, чтобы обеспечить моментную магнитуду 9.5 как предельно возможную для южно-американских субдукционных землетрясений. Полный набор параметров модельных удаленных “чилийских” очагов D1–D3 приведен в табл. 1. Для этих очагов были выполнены предварительные расчеты трансокеанского распространения цунами

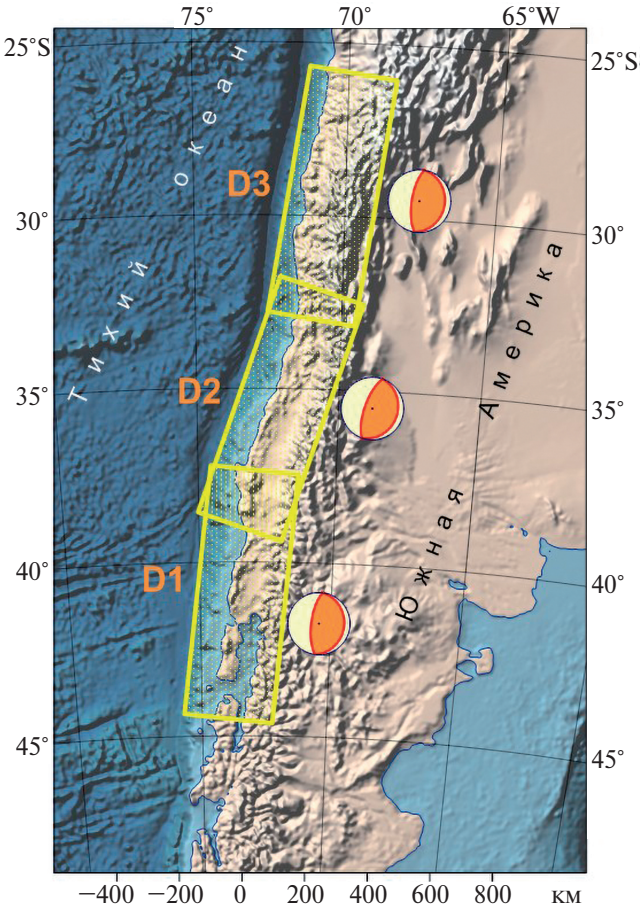


Рис. 8. Площадки очагов модельных землетрясений магнитуды 9.5 в южной части Чилийской сейсмогенной зоны, построенные для расчета волн цунами от удаленных источников в районе пос. Корф. Параметры модельных очагов приведены в табл. 1. Для каждой из площадок показаны соответствующие им тензоры сейсмического момента.

на 36 часов физического времени, с использованием расчетной сетки “Тихоокеанская” (см. табл. 2) с шагом в 2 угловые минуты.

Для оценки повторяемости таких модельных землетрясений был использован тот же подход, что и в случае региональных и локальных модельных очагов, т.е. построение эмпирического графика повторяемости на основе имеющихся глобальных каталогов, его аппроксимация (сглаживание) и продление в область максимальных магнитуд (в этом случае, 9.5). Такого рода график для южно-чилийской зоны представлен на рис. 4 непрерывной красной линией 3. Из него следует, что средний период повторяемости предельно сильных субдукционных землетрясений здесь составляет около 400 лет.

Такая оценка повторяемости согласуется с данными геологических исследований следов палеоцунами для этого района. В работе [Cisternas et al., 2005] показано, что предшественником Чилийского мега-землетрясения 1960 г. было известное по историческим хроникам землетрясение 1575 г., с очагом в том же районе. Более того, в разрезе на берегу крупной реки Маулин, впадающей в Тихий океан в 20 км к северу от о. Чилое, на удалении около 5 км от береговой линии, были найдены отложения еще двух крупных цунамигенных событий, датируемых интервалами 1280–1390 гг. и 1020–1180 гг. Отсюда авторы заключают, что в этом регионе на протяжении последних 1100–1200 лет произошло 4 мега-землетрясения с магнитудами 9+, и все они вызывали разрушительные цунами. Тем самым, для среднего периода повторяемости сильнейших субдукционных землетрясений на юге Чили получается оценка в 300 лет.

Таким образом, в качестве интегральной оценки повторяемости предельно сильных землетрясений магнитуды 9.5 в районе Южного Чили можно принять оценку в 300–400 лет.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И РАСЧЕТНЫЕ АЛГОРИТМЫ

Для моделирования процесса генерации цунами сейсмического происхождения в работе использовалась общепринятая “поршневая” модель, в рамках которой движения дна бассейна в очаговой области подводного землетрясения ассоциируются с вертикальными косейсмическими (остаточными) смещениями поверхности однородного упругого полупространства под действием внутреннего пространственного источника дислокационного типа [Подъяпольский, 1968; Гусяков, 1978; Okada, 1985].

Моделирование распространения цунами от очаговой зоны до побережья проводилось с использованием программной системы MGC [Чубаров и др., 2011], реализующей явную двухшаговую схему типа МакКормака [MacCormack, 1969] второго порядка аппроксимации по пространству для классической нелинейной модели мелкой воды, с учетом кривизны земной поверхности, влияния силы Кориолиса и донного трения. Применение этой системы для расчетов цунами подробно описано в работе [Shokin et al., 2008].

Для обеспечения необходимой точности результатов вблизи целевого участка побережья использовалась методика расчетов на последовательности вложенных сеток, детальность которых увеличивается по мере уменьшения глубины акватории. Таких вложений может быть несколько, если того требует задача. Подробное описание используемых методов расчетов на вложенных сетках и верификации их результатов изложены в работах [Бейзель и др., 2014б; Гусев, Чубаров, 2018].

На последнем уровне вложения выполнялось моделирование наката волн цунами на побережье с учетом рельефа прилегающих участков суши. Нелинейные уравнения теории мелкой воды численно решались здесь методом крупных частиц [Белоцерковский, Давыдов, 1982] при использовании явной разностной схемы первого порядка аппроксимации. Поскольку адекватное моделирование процесса наката требует использования детальных расчетных сеток, применение схемы первого порядка точности, обладающей к тому же монотонными свойствами, вполне оправдано. Общее описание алгоритма, его программной реализации в программном комплексе MGC и результаты верификации расчетных методик представлены в работах [Рычков и др., 2013; Шокин и др., 2015].

Как отмечалось выше, оценка опасности цунами для побережья Карагинского залива в рамках методики “наихудшего случая” требует учета очагов, расположенных в трех различных цунамигенных зонах – локальной (беринговоморской), региональной (алеутской) и удаленной (чилийской). Большие различия в размерах этих зон и в степени их удаленности от рассматриваемого участка побережья требуют применения различных расчетных областей и различных разностных сеток для моделирования распространения цунами. Всего в настоящем исследовании использовалось четыре расчетных области, в которых для реализации конечно-разностных алгоритмов были построены равномерные прямоугольные сетки различной детальности, их параметры приведены в табл. 2, а соответствующие географическое положение и размеры показаны на рис. 9.

Наиболее детальной являлась локальная сетка в области “Корф” с разрешением 3" (см. рис. 9Г), использованная для расчета распространения

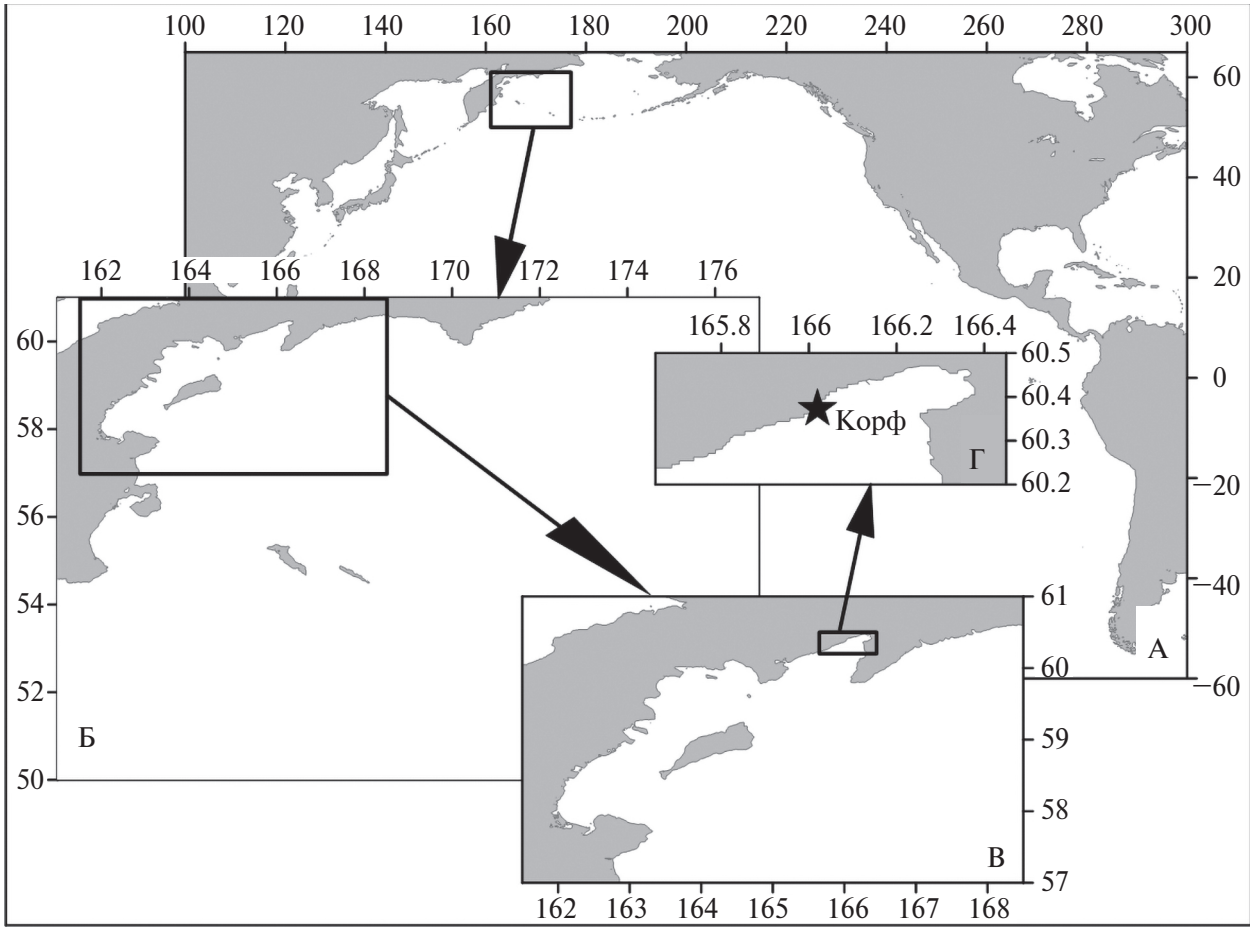


Рис. 9. Расчетные области, использованные при численном моделировании волн цунами.
А – “Тихоокеанская”, Б – “Алеутская”, В – “Карагинская”, Г – “Корф”. Параметры этих областей и использованных для них расчетных сеток приведены в табл. 2.

цунами в мелководной области и наката на берег. Она была получена при помощи кусочно-билинейной интерполяции данных оцифровки батиметрической карты из набора карт C-MAP ООО “Компания “Век Камчатка Плюс” M-AN-C013.12 Kamchatka peninsula and Kuril. Цифровая модель прилегающих участков суши была извлечена из массива GEBCO-2019 с разрешением 15".

В расчетной области “Карагинская” использовалась сетка с разрешением 30" (см. рис. 9В), на которой производились расчеты распространения цунами от локальных источников L1–L5 беринговоморской зоны. Эта сетка была получена из цифрового массива GEBCO-2009 с разрешением 1' на основе кусочно-билинейной интерполяции.

Расчеты распространения цунами от системы региональных очагов R1–R5 выполнялись в “Алеутской” расчетной области на сетке с разрешением 1' (см. рис. 9Б), полученной из цифрового массива GEBCO-2009.

Наконец, расчеты трансокеанского распространения цунами от южно-чилийских очагов D1–D3 выполнялись в “Тихоокеанской” расчетной области, покрывающей весь океанический бассейн, в которой также на основе цифрового массива GEBCO-2009 была построена сетка с разрешением 2' (см. рис. 9А).

“Тихоокеанская”, “Алеутская” и “Карагинская” области на разных этапах исследования выполняли различные функции. Область “Корф” использовалась только в роли “внутренней” на заключительном этапе работ для определения характеристик наката волн цунами на побережье Корфской косы. Такие расчеты проводились для наиболее опасных очагов из каждой цунамигенной зоны. При этом значения высот рельефа на Корфской косе, полученные путем оцифровки упомянутой выше

карты, меньшие 2 м, были повышены до 2 м с тем, чтобы привести их в соответствие с данными о современной морфологии косы.

Предварительные расчеты для нахождения этих наиболее опасных очагов выполнялись без учета наката и методики вложенных сеток. Граничное условие отражения (“стенка”) ставилось в точках, аппроксимирующих неподвижную линию уреза. Моделирование распространения удаленных цунами от южно-чилийских очагов D1–D3 выполнялось в “Тихоокеанской” расчетной области, региональных очагов R1–R5, R1b и R1c – в “Алеутской” расчетной области, локальных очагов L1–L5 – в “Карагинской” расчетной области.

Детальные расчеты высот волн от выбранных экстремальных событий каждой зоны выполнялись на вложенных сетках с учетом на последнем этапе наката на берег. При этом в расчетах распространения от локальных очагов использовалось двухуровневое вложение, с использованием “Карагинской” области в качестве внешней, а области “Корф” – в качестве внутренней, а при расчетах. распространения цунами от региональных и удаленных очагов использовались трехуровневое вложение. Так, например, сетка в “Карагинской” области, являясь внешней при расчетах распространения от локальных (беринговоморских) очагов, использовалась как промежуточная при расчетах распространения от региональных (алеутских) очагов. Точно так же, сетка в “Алеутской” области, являясь внешней при расчетах распространения цунами от региональных очагов, использовалась как промежуточная при расчетах распространения волн от удаленных (чилийских) очагов.

По каждому расчетному сценарию формировались представительные наборы расчетных данных, включавших в себя мареограммы в заданных береговых точках, распределения максимальных высот вдоль целевого участка побережья и карты свечений, показывающих максимальные (за все время моделирования) положительные и отрицательные смещения свободной поверхности в каждом узле расчетной области, а также осредненные по глубине горизонтальные компоненты скорости течений. По расчетам наката формировались массивы высот заплеска и глубин отката, максимальных дальностей заплеска и отката, а также массивы глубин и продолжительностей заливания суши.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Целью первого этапа расчетов было определение наиболее опасных для побережья Корфской косы модельных очагов из каждой цунамигенной зоны. Степень опасности конкретного модельного очага оценивалась по вдольбереговому распределению максимальных амплитуд цунами, определенных для района расположения пос. Корф в результате предварительных расчетов на грубых (внешних) сетках. Такого рода распределения приведены на рис. 10 для очагов из локальной (беринговоморской), региональной (алеутской) и удаленной (чилийской) цунамигенной зон.

Из результатов этих предварительных расчетов следует, что наибольшие повышения уровня в районе пос. Корф создаются локальным очагом L4 из беринговоморской зоны, региональным очагом R1c из алеутской зоны и удаленным очагом D1 из чилийской очаговой зоны. Карты свечений, создаваемых этими очагами, приведены на рис. 11.

На втором этапе для этих очагов были проведены уточняющие расчеты с использованием методики вложенных сеток и моделей наката на сухой берег. В этих расчетах мелководная (с глубинами 1–3 м) область, лежащая между песчаной косой и западным берегом залива Корфа к югу от пос. Тиличики (см. рис. 1, на врезке − гавань “Скрытая”), была искусственно “засыпана” (т.е. трансформирована в сушу высотой 1 м), с тем чтобы иметь возможность расчета заплеска волн, переливающихся через Корфскую косу.

В результате этих расчетов были получены диаграммы свечения (рис. 12), определены максимальные модули скорости течений, границы максимального затопления (дальности заплеска) и осушения (рис. 13), распределения максимальной глубины заливания суши, распределения максимальных понижений водной поверхности. Для определения динамики свободной поверхности вблизи пос. Корф были установлены виртуальные мареографы: l1, l2, l3 – в узлах “Карагинской” области; r1, r2, r3 – в узлах “Алеутской” области; d1, d2, d3 – в узлах

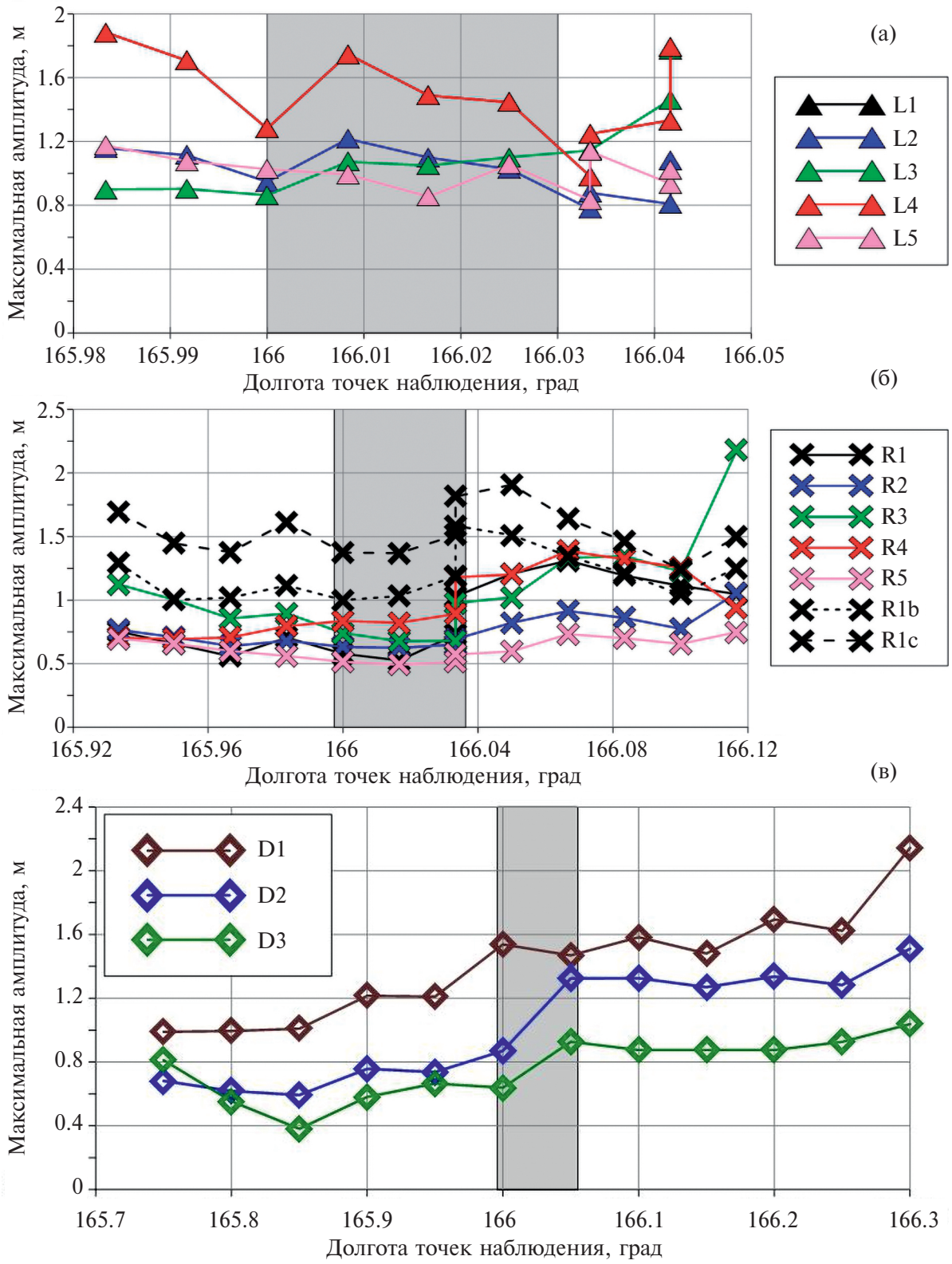


Рис. 10. Вдольбереговые распределения максимальных положительных смещений уровня водной поверхности, полученные в предварительных расчетах на грубых (внешних) сетках без учета наката волн на берег для всех рассмотренных модельных очагов: L1–L5 – в “беринговоморской” (а), R1–R5, R0a, R0b, R1b, R1c – в “алеутской” (б) и D1–D3 – в “южно-чилийской” (в) зонах. Серый прямоугольник показывает положение пос. Корф на косе.

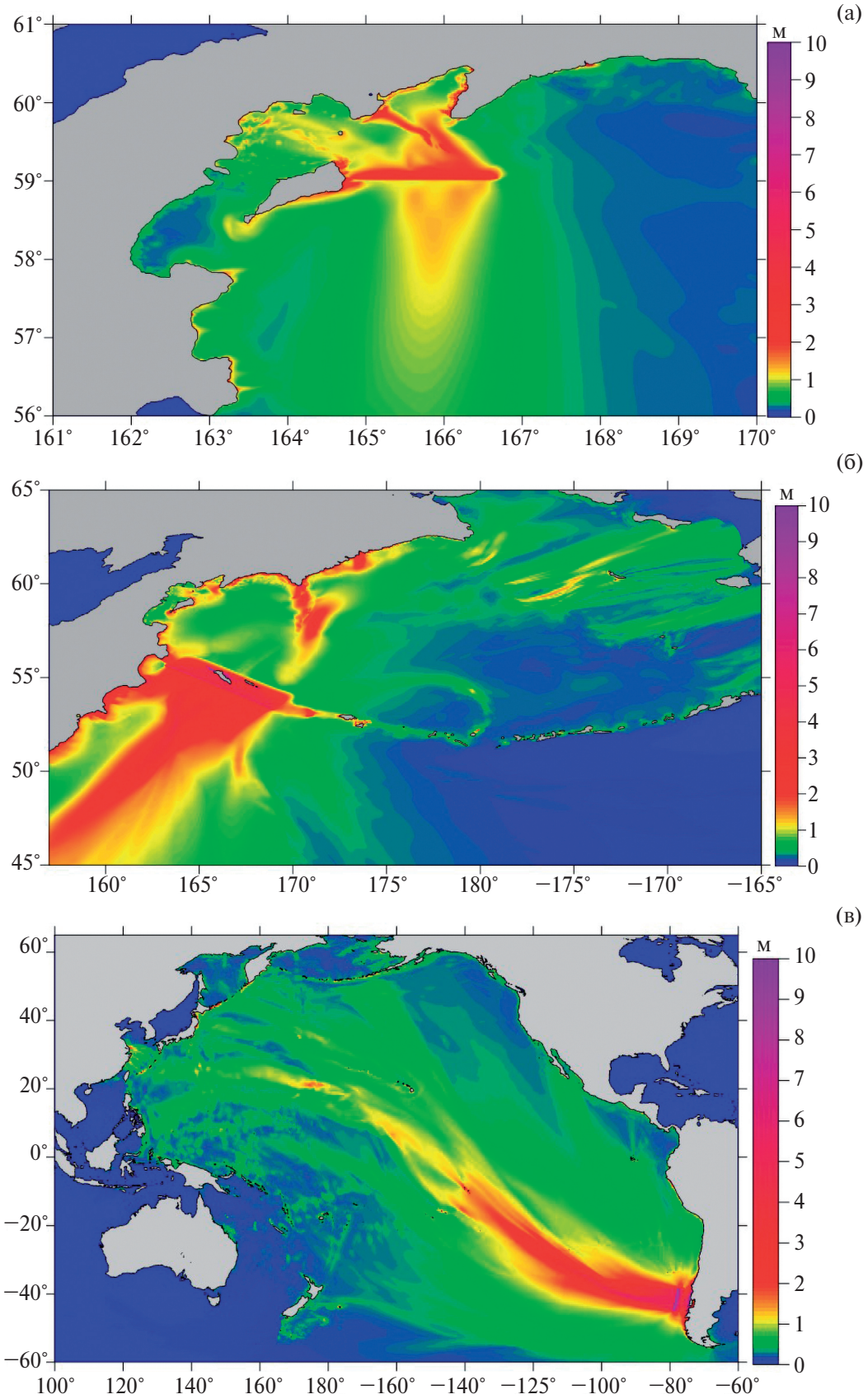


Рис. 11. Распределения максимальных за все время расчета амплитуд волн для экстремальных источников: L4 – в “беринговоморской” зоне (а), R1c – в “алеутской” зоне (б), D1 – в “южно-чилийской” зоне (в).

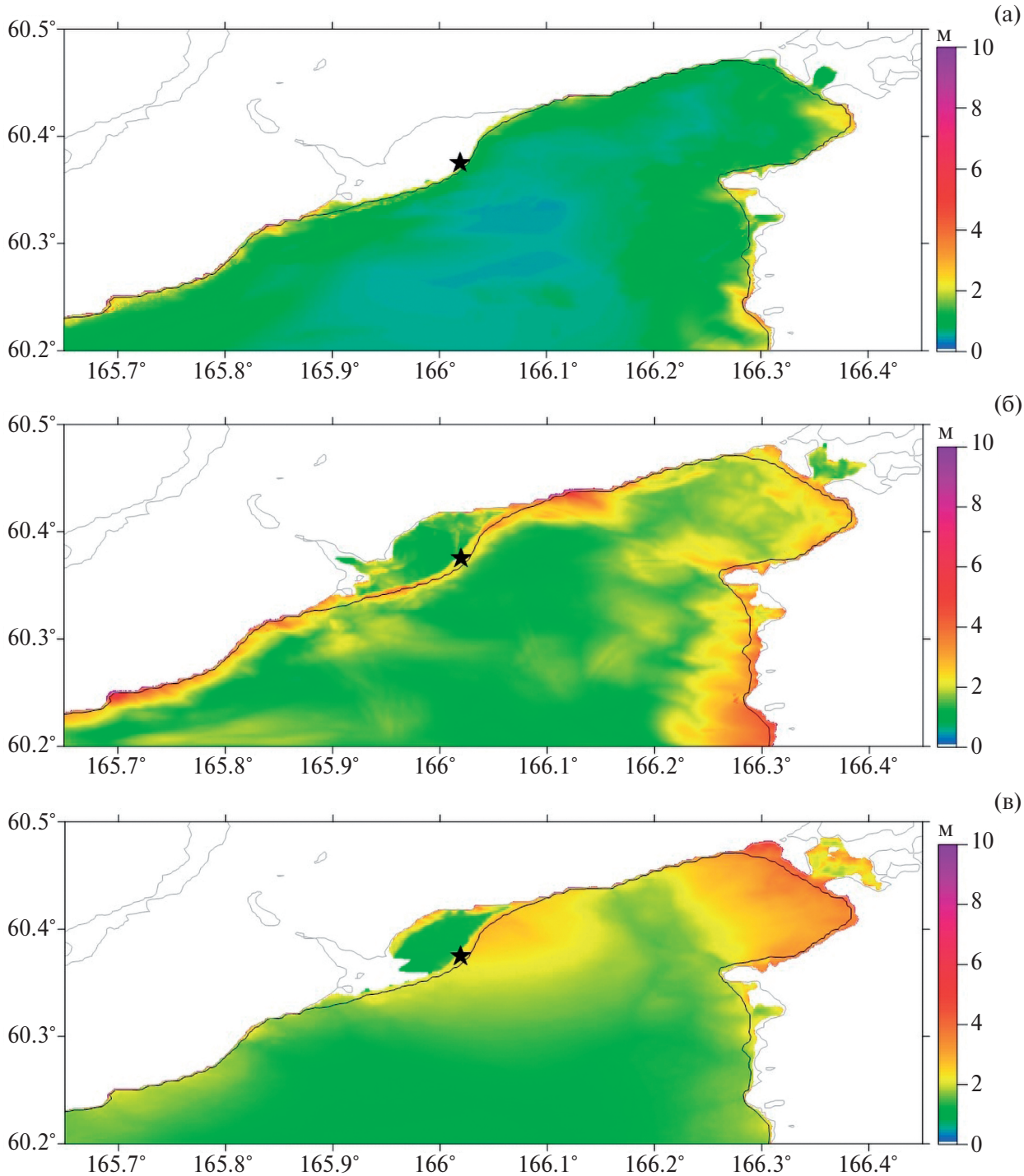


Рис. 12. Распределения по локальной расчетной области “Корф” максимальных за все время расчета амплитуд волн для наиболее опасных источников: L4 – в “беринговоморской” зоне (а), R1c – в “алеутской” зоне (б), D1 – в “южно-чилийской” зоне (в). Звездочкой показано положение пос. Корф.

“Тихоокеанской” расчетной области. Расчетные мареограммы, а также схемы размещения мареографов приведены на рис. 14. В табл. 3 представлены координаты и значения глубин в точках их установки, а также экстремальные значения смещений свободной поверхности, полученные в результате моделирования наката волн на берег с учетом рельефа суши.

На рис. 15 приведены графики вдольбереговых распределений максимальных положительных смещений уровня водной поверхности, рассчитанных с учетом наката волн на берег в 126 точках

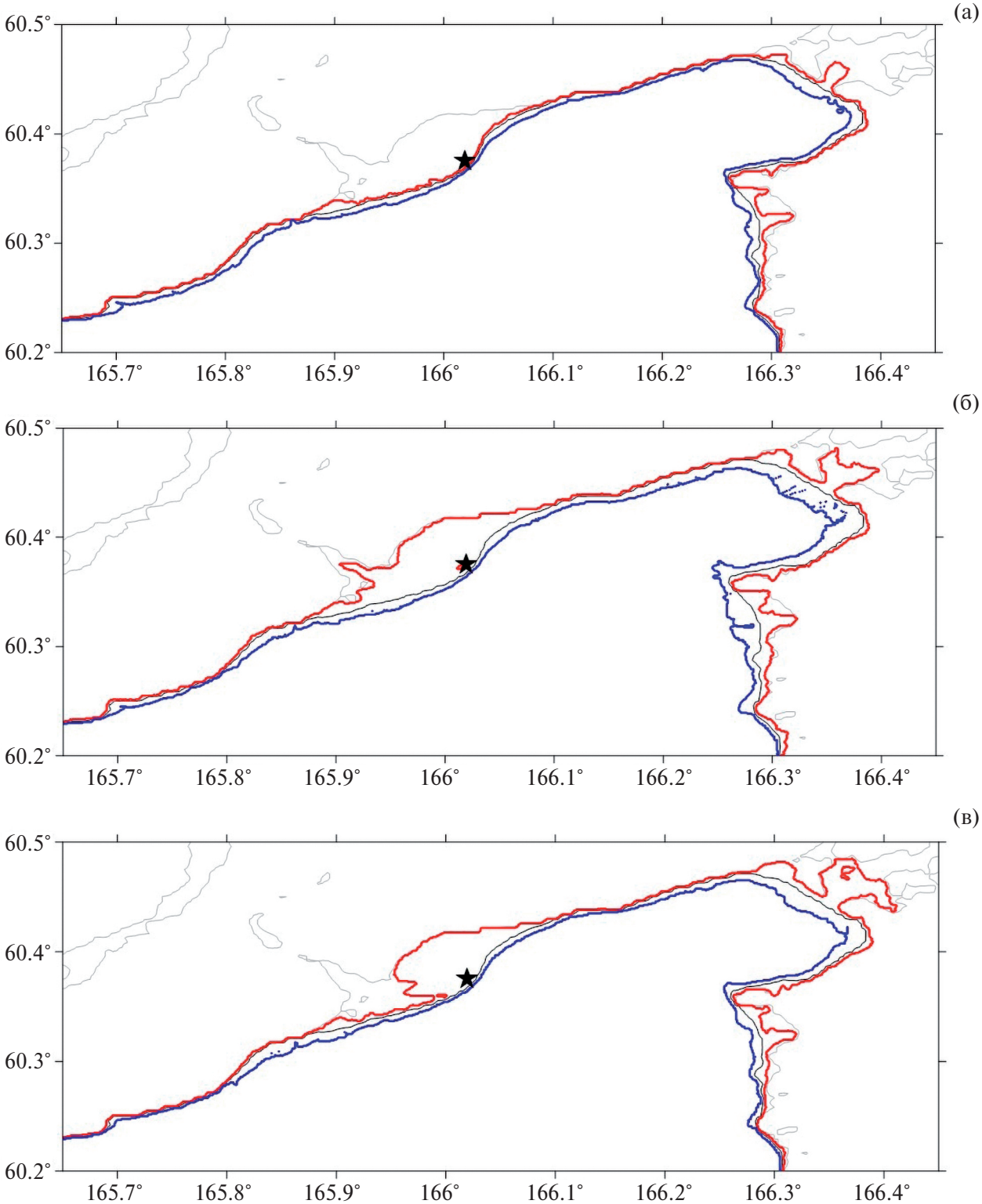


Рис. 13. Границы максимального затопления (красная линия) и осушения (синяя линия) в локальной области “Корф” для наиболее опасных источников: L4 – в “беринговоморской” зоне (а), R1c – в “алеутской” зоне (б), D1 – в “южно-чилийской” зоне (в). Звездочкой показано положение пос. Корф.

локальной сетки, расположенных вдоль линии уреза у Корфской косы. Показанные распределения соответствуют наиболее опасным источникам для каждой из цунамигенных зон, угрожающих пос. Корф: L4 – Беринговоморская зона, R1c – Алеутская зона, D1 – Чилийская зона.

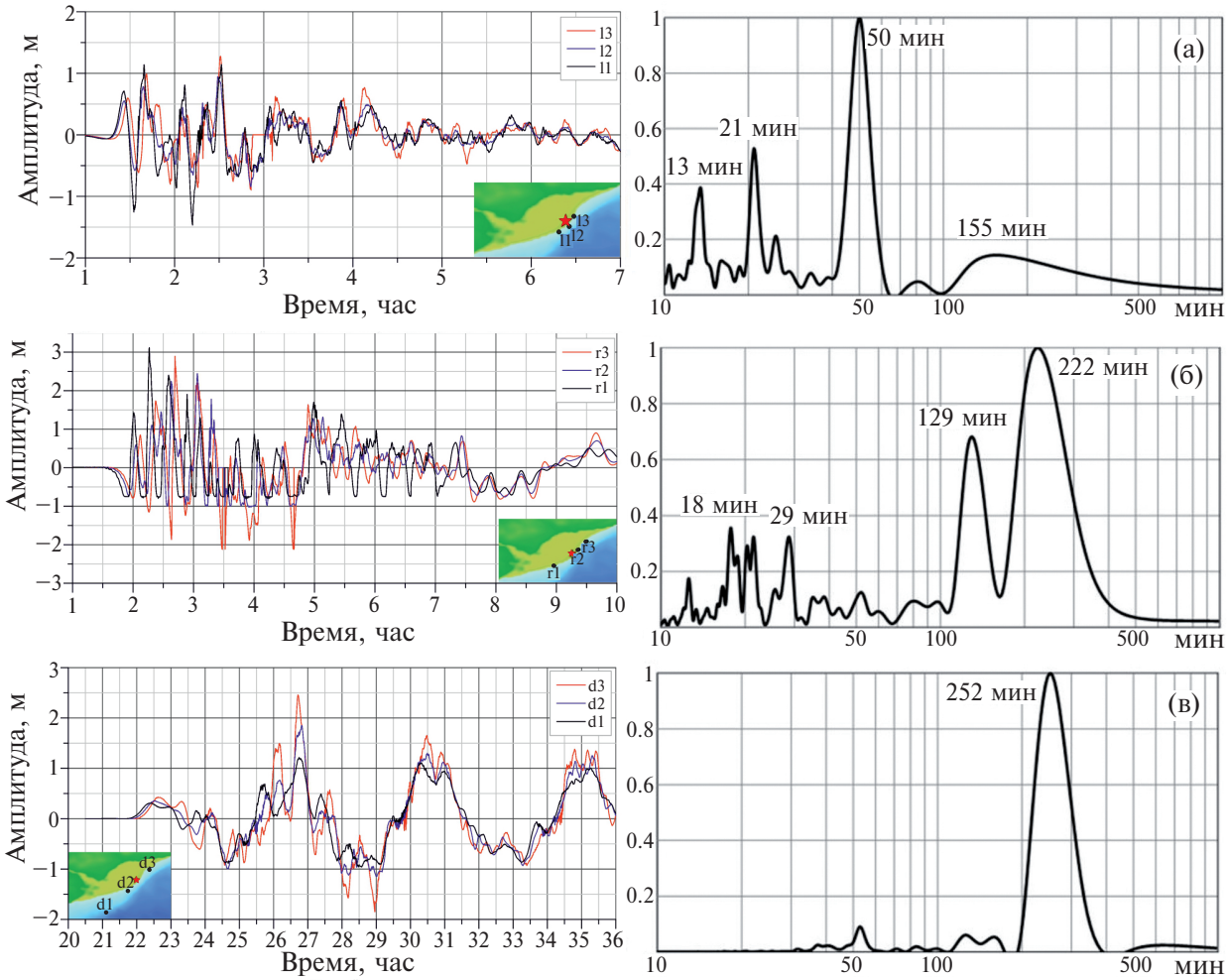


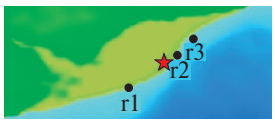
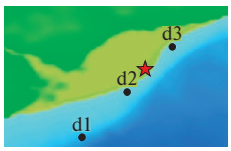
Рис. 14. Расчетные мареограммы (слева) и характерные спектры (справа) модельных волн в близких к пос. Корф точках, полученные с учетом наката волн на берег для наиболее опасных источников.
(а) – L4 (“беринговоморская” зона), (б) – R1c (“алеутская” зона), (в) – D1 (“южно-чилийская” зона). На врезках показаны схемы расположения мареографов, помещённых в узлах соответствующих расчетных областей, звездочкой отмечено положение пос. Корф на косе. Для каждого района рассчитаны энергетические спектры, осредненные по трем мареограммам. Подписаны основные значения пиковых периодов. Графики спектров построены в лог-масштабе по периоду и нормированы по амплитуде на максимальные значения.

Полученные расчетные результаты позволяют сделать вывод о том, что наиболее опасным источником для территории пос. Корф является региональный (алеутский) очаг R1c, создающий превышения уровня вблизи пос. Корф в интервале от 2 до 3 м, при котором возможен перелив через косу. Наиболее опасный очаг из ближней (беринговоморской) зоны L4 порождает превышение уровня с амплитудой менее 2 м, при котором перелива через косу не происходит. При наиболее опасном источнике из дальней (чилийской) зоны D1 превышение уровня также достигает 2 м, при котором возможно полное затопление косы в районе поселка. При этом могут возникать весьма высокие скорости потока (до 5 м/с), однако суммарное время и глубина заливания остаются небольшими (менее 10 мин и 0.5 м соответственно).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее исследование было выполнено с целью оценки уровня цунамиопасности для пос. Корф, расположенного на песчаной косе в западной части залива Корфа. Эта задача решалась в рамках сценарного подхода с использованием методики “наихудшего случая” (worst case). Необходимые оценки были получены по результатам расчетов возбуждения и распространения цунами от системы локальных,

Таблица 3. Координаты, глубины установки виртуальных мареографов и экстремальные значения уровня свободной поверхности, рассчитанные вблизи пос. Корф (60.13° с.ш., 166.06° в.д.) с учетом наката волн на берег

Расчетная область	Мареограф	Широта (в.д.), град	Долгота (с.ш.), град	Глубина, м	Максимальное повышение уровня, м	Максимальное понижение уровня, м	Максимальный размах, м
 “Карагинская”	l1	60.35833	166.00833	1.71	1.14	–1.47	2.61
	l2	60.36666	166.025	3.74	0.95	–0.84	1.79
	l3	60.38333	166.03333	1.00	1.28	–0.90	2.18
 “Алеутская”	r1	60.35	165.98333	0.75	3.12	–0.82	3.94
	r2	60.38333	166.03333	1.00	2.44	–1.03	3.47
	r3	60.4	166.05	2.12	2.89	–2.12	5.01
 “Тихоокеанская”	d1	60.3	165.95	18.75	1.22	–0.96	2.18
	d2	60.35	166.0	3.60	1.85	–1.15	3.00
	d3	60.4	166.05	2.12	2.46	–1.85	4.31

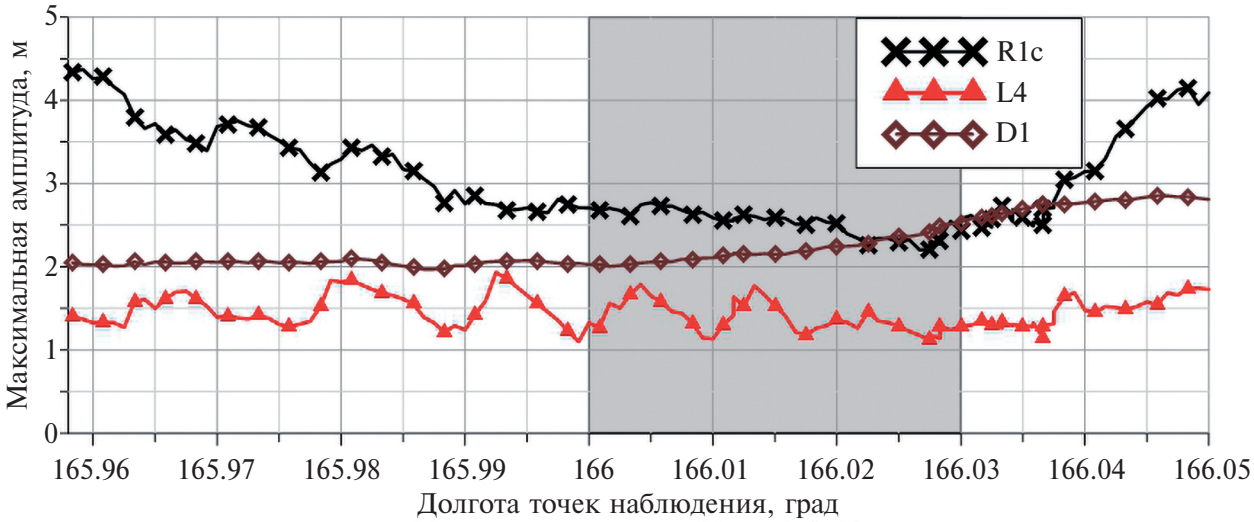


Рис. 15. Вдольбереговые распределения максимальных положительных смещений уровня водной поверхности, рассчитанные с учетом наката волн на берег в 126 точках расчетной области “Корф”.
Кривые соответствуют наиболее опасным источникам для каждой из рассмотренных цунамигенных зон: L4 – “беринговоморская” зона, R1c – “алеутская” зона, D1 – “южно-чилийская” зона. Маркерами отмечены каждое третье значение. Серый прямоугольник указывает на положение пос. Корф.

региональных и удаленных очагов. Оценки повторяемости цунамигенных событий основаны на данных инструментальных сейсмических каталогов. На основе анализа сейсмической активности, цунамигенного потенциала и проявлений исторических цунами в районе Карагинского залива были выбраны наиболее опасные для пос. Корф очаговые зоны: ближняя (беринговоморская), региональная (западно-алеутская) и удаленная (южно-чилийская).

Для каждой из этих зон была построена система модельных очагов, основанная на анализе особенностей сейсмотектонического

строения зон и данных о типичных механизмах очагов сильных землетрясений, сделан выбор предельно возможных магнитуд таких очагов и даны оценки их повторяемостей.

По результатам предварительных расчетов распространения цунами от выбранной системы модельных очагов, выполненных на равномерных сетках, содержащих внутри себя как очаговую зону, так и целевой участок побережья, были получены вдольбереговые распределения высот волн в районе расположения пос. Корф. Анализ этих распределений позволил определить наиболее опасные очаги в локальной (очаг L4), региональной (очаг R1c) и удаленной (очаг D1) цунамигенных зонах.

Расчеты наката цунами на песчано-галечную косу в районе расположения пос. Корф выполнялись с использованием технологии вложенных расчетных сеток, которые позволили определить высоты волн на системе виртуальных мареографов, расположенных вблизи береговой линии (см. рис. 14, табл. 3), а также рассчитать дальности заплеска, продолжительность заливания и другие параметры воздействия цунами на побережье.

По результатам предварительного и детального моделирования генерации, распространения и заплеска на берег волн цунами от наиболее опасных локальных, региональных и удалённых модельных источников сделаны следующие выводы:

1. Наиболее опасный источник локальной (беринговоморской) зоны (очаг L4, $M_w = 8.0$) порождает цунами на Корфской косе с амплитудой порядка полутора метров, при этом перелива через косу не происходит. Согласно оценкам, средний период повторяемости землетрясений магнитуды 8.0 в беринговоморской зоне составляет 80 лет.

2. Для наиболее опасного регионального (алеутского) источника (очаг R1c, $M_w = 9.0$) максимальные амплитуды волн вблизи пос. Корф составляют от двух до трех метров, что допускает возможность затопления поселка и перелива через Корфскую косу. Именно этот источник порождает наиболее опасную волну для территории пос. Корф практически на всем его протяжении. Согласно оценкам, средний период повторяемости для землетрясений магнитуды $M_w = 9.0$ на западном сегменте Алеутской дуги составляет около 150 лет.

3. Для наиболее опасного удаленного источника (очаг D1, $M_w = 9.5$) в южно-чилийской зоне максимальные амплитуды волн в районе пос. Корф могут достигать двух с половиной метров, возможно переливание и затопление северной, наиболее высокой части косы. Средний период повторяемости таких предельно сильных землетрясений в этой зоне составляет 300–400 лет (по графику повторяемости и имеющимся палеоданным).

4. Для очагов R1c и D1, при возможном переливании косы, суммарное время и глубина заливания остаются небольшими (менее 10 мин и 0.5 м соответственно), однако, при этом могут возникать весьма высокие скорости потока (до 5 м/с).

5. Обращает на себя внимание близость максимальных амплитуд на рассматриваемом участке побережья от наиболее опасных локальных, региональных и удаленных источников. Несмотря на большие различия в магнитудах очагов (от 8.0 до 9.5, что, формально, соответствует различию в их энергии примерно в 200 раз), создаваемые ими волны цунами имеют амплитуды в диапазоне 1.5–2.5 м. Это, конечно, является следствием большой разницы в эпицентральных расстояниях для этих трех групп модельных очагов, а также их ориентации относительно рассматриваемого участка побережья. Также можно отметить, что для трансокеанских цунами, порождаемых сильнейшими субдукционными землетрясениями магнитуды 9+, цепочки вулканических островов (в данном случае, Алеутских) не являются существенной преградой. Аналогичный вывод содержится в работе [Medvedeva et al., 2023], где коэффициент затухания (attenuation coefficient) при прохождении Алеутской гряды волнами цунами от сильнейших чилийских землетрясений был оценен величиной 0.75.

6. В противоположность близости максимальных амплитуд, периоды волн, приходящих от очагов из разных цунамигенных зон, существенно различаются (см. рис. 14). Для волн от локальных (беринговоморских) очагов характерен период около 50 мин, более короткие и длинные значения выражены слабее. Для алеутских очагов характерный период длиннее и

лежит в интервале 120–220 мин. Самые длинные периоды, 240–270 мин, возникают от чилийских очагов. Эти различия связаны, в первую очередь, с размерами очагов, а также с их удаленностью от рассматриваемого участка побережья.

7. Вышеприведенные оценки максимальных высот цунами в районе залива Корфа, получены для невозмущенного (другими динамическими факторами) уровня моря. При практическом использовании полученных оценок они должны, конечно, сопоставляться с высотами экстремальных приливов и штормовых нагонов, с учетом их повторяемости и обеспеченности. Такое сопоставление должно выполняться на этапе проектирования береговых сооружений и планирования эвакуационных мероприятий при тревогах цунами. Оно требует специального исследования, поскольку имеющиеся в литературе оценки этих величин обладают значительной неопределенностью, источником которой является малоизученность региона и неполнота наблюдательных рядов. Тем не менее, опираясь на сведения, содержащиеся в X томе (Берингово море) фундаментальной серии [Гидрометеорология ..., 1999], можно привести оценочные данные для максимальных значений приливов (207 см) и экстремальных непериодических уровней (штормовых нагонов) редкой повторяемости (75–96 см, при обеспеченности 3–5%). Как видно, эти значения являются сопоставимыми, но все же меньшими возможных высот экстремальных цунами для района залива Корфа.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят министра природных ресурсов и экологии Камчатского края А.А. Кумарькова за содействие в выполнении работы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Представленные в работе исследования выполнялись в рамках Государственного контракта Министерства природных ресурсов и экологии Камчатского края № 29/22 от 17 мая 2022 г., а также в рамках государственных заданий Минобрнауки России для ИВМиМГ СО РАН № FWNM-2022-0004 (в части, касающейся сбора и анализа данных о исторических цунами Дальневосточного региона), ИТПЗ РАН № 124020900029-7 (в части, касающейся анализа сейсмичности Дальневосточного региона и оценок повторяемостей сильнейших землетрясений), ФИЦ ИВТ (в части, касающейся разработки программ расчета распространения и набегания цунами) и ФИЦ ЕГС РАН № 075-00604-25 (в части сбора информации о сейсмичности Камчатки).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Атлас максимальных заплесков цунами / Отв. ред. С.Л. Соловьев. Владивосток: МГИ АН УССР, ДВНИГМИ, 1978. 61 с.

Баранов Б.В. Тектоника плит Охотоморского региона и окраинных морей северо-западной части Тихого океана / Автореф. дисс. ... доктора геол.-мин. наук. М., 1982. 24 с.

Бейзель С.А., Гусяков В.К., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Оценка воздействия удаленных цунами на Дальневосточное побережье России на основе результатов математического моделирования // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014а. Т. 90. № 5. С. 578–590.

Бейзель С.А., Гусяков В.К., Рычков А.Д., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И. Алгоритмы и методики численного моделирования наката волн цунами на берег в приложении к оценке характеристик заплеска волн на Дальневосточное побережье России // Труды XII Всероссийской конференции “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики” (Санкт-Петербург, 27–29 мая 2014 г.). СПб.: Нестор-История, 2014б. С. 228–230.

Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982. 392 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. X. Берингово море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеоиздат, 1999. 302 с.

Гордеев Е.И., Пинегина Т.К., Ландер А.В., Кожурин А.И. Берингия: сейсмическая опасность и фундаментальные вопросы геотектоники // Физика Земли. 2015. № 4. С. 58–67.

Гусев О.И., Чубаров Л.Б. Об использовании телескопически вложенных сеток в расчетах распространения волн цунами // Труды XIV Всероссийской конференции “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики” (Санкт-Петербург, 23–25 мая 2018 г.). СПб.: ЛЕМА, 2018. С. 224–226.

Гусяков В.К. Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства // Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации

геофизических наблюдений. Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1978. С. 23–51.

Гусяков В.К. Цунами на Дальневосточном побережье России: историческая перспектива и современная проблематика // Геология и геофизика. 2016. № 9. С. 1601–1615.

Заякин Ю.А. Цунами 23 ноября 1969 г. на Камчатке и особенности его возникновения // Метеорология и гидрология. 1981. № 12. С. 77–83.

Заякин Ю.А. Цунами на Дальнем Востоке России. Петропавловск-Камчатский: Камшат, 1996. 88 с.

Иванова Е.И., Митюшкина С.В., Левина В.И. Макросейсмическая оценка последствий Олюторского землетрясения и его сильнейших афтершоков // Вулканология и сейсмология. 2010. № 2. С. 71–80.

Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов, 1962–2024.
URL: http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php

Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб: 1:8 000 000 / Главные редакторы: В.Н. Страхов, В.И. Уломов. М.: Объединенный институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, 1999. 4 л. URL: http://neotec.ginras.ru/neomaps/M080_Russia_1997_Seism-region_Komplekt-kart-osr-97-territorii-rossiyskoy-federacii.html

Ландер А.В., Букчин Б.Г., Дрознин Д.В., Кирюшин А.В. Тектоническая позиция и очаговые параметры Хаилинского (Корякского) землетрясения 8 марта 1991 года: существует ли плита Берингия? // Геодинамика и прогноз землетрясений (Вычислительная сейсмология. Вып. 26). М.: Наука, 1994. С. 104–122.

Ландер А.В., Левина В.И., Иванова Е.И. Сейсмическая история Корякского нагорья и афтершоковый процесс Олюторского землетрясения 20(21) апреля 2006 г. $M_W = 7.6$ // Вулканология и сейсмология. 2010. № 2. С. 16–30.

Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю. Сейсмичность Камчатского региона 1962–2011 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 41–64.

Лобковский Л.И., Баранов Б.В., Дозорова К.А., Мазова Р.Х., Кисельман Б.А., Баранова Н.А. Командорская сейсмическая брешь: прогноз землетрясения и расчет цунами // Океанология. 2014. Т. 54. № 4. С. 561–573.

Мелекесцев И.В., Курбатов А.В. Частота крупнейших палеосейсмических событий на северо-западном побережье и в Командорской котловине Берингова моря в позднем плейстоцене–голоцене // Вулканология и сейсмология. 1997. № 3. С. 3–11.

Пелиновский Е.Н., Плинк Н.Л. Предварительная схема цунамирайонирования побережья Курило-Камчатской зоны на основе одномерных расчетов (модельный очаг) // Препринт ИПФ АН СССР, Горький. 1980. № 5. 18 с.

Подъяпольский Г.С. Возбуждение длинной гравитационной волны в океане сейсмическим источником в коре // Физика Земли. 1968. № 1. С. 7–24.

Петухин А.Г., Пинегина Е.К., Ландер А.В. Моделирование возможных источников отложений цунами на Камчатском побережье Берингова моря // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России / Труды Пятой научно-технической конференции: к 100-летию организации инструментальных сейсмологических наблюдений на Камчатке. Петропавловск-Камчатский, 2015. С. 368–372.

Рычков А.Д., Бейзель С.А., Чубаров Л.Б. Программа для ЭВМ: Модуль расчета наката волн цунами на берег RunUp-LP // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам № 2013617980. 2013.

Соловьев С.Л. Основные данные о цунами на Тихоокеанском побережье СССР, I937–I976 гг. // Изучение цунами в открытом океане. М.: Наука, 1978. С. 61–136.

Соловьев С.Л. Санах-Кадъякское цунами 1788 г. // Проблема цунами. М.: Наука, 1968. С. 232–237.

Соловьев С.Л., Го Ч.Н. Каталог цунами на восточном побережье Тихого океана. М.: Наука, 1975. 203 с.

Соловьев С.Л., Го Ч.Н., Ким Х.С. Каталог цунами в Тихом океане, 1969–1982. М.: МГК АН СССР, 1986. 163 с.

Федотов С.А., Гусев А.А., Зобин В.М., Кондратенко А.М., Чепкунас К.Е. Озерновское землетрясение и цунами 22(23) ноября 1969 г. // Землетрясения в СССР в 1969 году. М.: Наука, 1973. С. 195–208.

Чубаров Л.Б., Бабайлов В.В., Бейзель С.А. Программа расчета характеристик волн цунами сейсмического происхождения MGC // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Федеральной службой по интеллектуальной собственности № 2011614598. 2011.

Шокин Ю.И., Бейзель С.А., Рычков А.Д., Чубаров Л.Б. Численное моделирование наката волн цунами на побережье с использованием метода крупных частиц // Математическое моделирование. 2015. Т. 27. № 1. С. 99–112.

ANSS (USGS) catalog. 2024. URL: https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/

Argus D.F., Gordon R.G., DeMets C. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2011. V. 12. № 11. 13 p. https://doi.org/10.1029/2011GC003751

Bird P. An updated digital model of plate boundaries // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2003. V. 4. № 3. P. 1027.
https://doi.org/10.1029/2001GC000252

Cisternas M., Atwater B., Torrejón F., Sawai Y., Machuca G., Lagos N., Eipert A., Youlton C., Salgado I., Kamataki T., Shishikura M., Rajendran C., Malik J., Rizal Y., Husni M. Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake // Nature. 2005. V. 437. P. 404–407.
https://doi.org/10.1038/nature03943

Global CMT Catalog. 2024. URL: https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html

Gusiakov V.K., Dunbar P., Arcos N. Twenty five years (1992–2016) of global tsunamis: statistical and analytical overview // Pure and Applied Geophysics, Topical Issue "Twenty five years of modern tsunami science". 2019. V. 176. P. 2795–2807.
https://doi.org/10.1007/s00024-019-02113-7

Gutenberg B. Tsunamis and earthquakes // Bull. Seis. Soc. Am. 1939. V. 29. № 4. P. 517–526.

International Seismological Centre. On-line Bulletin // Internatl. Seismol. Cent., Thatcham, United Kingdom, 2015. URL: http://www.isc.ac.uk

ISC-isf catalog. 2020. URL: ftp://ftp.isc.ac.uk/pub/isf/

Kanamori H. Mechanism of tsunami earthquakes // Phys. Earth Planet. Inter. 1972. V. 6. P. 346–359.

MacCormack R.W. The Effect of viscosity in hypervelocity impact cratering // AIAA Paper. 1969. P. 69–354.

Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. Seism. Soc. Am. 1985. V. 75. Iss. 4. P. 1135–1154.

Medvedeva A., Medvedev I., Fine I., Kulikov E., Yakovenko O. Local and Trans-oceanic Tsunamis in the Bering and Chukchi Seas Based on Numerical Modeling // Pure Appl. Geophys. 2023. V. 180. P. 1639–1659.
https://doi.org/10.1007/s00024-023-03251-9

NTL/GHTB Novosibirsk Tsunami Laboratory Global Historical Tsunami Database, 2000 BC to Present. URL: https://tsun.sscc.ru/nh/tsunami.php (date of application: January 31, 2025)

Papazachos B.C., Scordilis E.M., Panagiotopoulos D.G., Papazachos C.B., Karakaisis G.F. Global Relations Between Seismic Fault Parameters and Moment Magnitude of Earthquakes // Bulletin of the Geological Society of Greece. 2004. V. XXXVI. P. 1482–1489.

Pinegina T.K., Bourgeois J. Historical and paleotsunami deposits on Kamchatka, Russia: Long-term chronologies and long-distance correlations // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2001. V. 1. P. 177–185.

Seno T., Sakurai T., Stein S. Can the Okhotsk plate be discriminated from the North American plate? // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P. 11305–11315.

Shokin Yu.I., Babailov V.V., Beisel S.A., Chubarov L.B., Eletsky S.V., Fedotova Z.I., Gusyakov V.K. Mathematical modeling in application to regional tsunami warning systems operations / Eds. E. Krause et al. // Comp. Science & High Perf. Computing III, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. 2008. V. 101. P. 52–68.

Sykes L.R. Aftershock zones of great earthquakes, seismicity gaps, and earthquake prediction for Alaska and Aleutians // J. Geoph. Res. 1971. V. 76. P. 8021–8041.

The ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue, 1904–2019. Version 10.0. March 21, 2023.
URL: http://www.isc.ac.uk/iscgem/download.php

Wesson R.L, Boyd O.S., Mueller C.S., Frankel A.D. Challenges in making a seismic hazard map for Alaska and the Aleutians / Eds. J.T. Freymueller, P.J. Haeussler, R. Wesson, G. Ekstrom // Active Tectonics and Seismic Potential of Alaska. Washington: DC AGU, 2008. P. 385–397.

ASSESSMENT OF TSUNAMI HAZARD FOR THE COAST OF THE BAY OF KORF (BERING SEA) ACCORDING TO THE RESULTS OF NUMERICAL MODELING

V. K. Gusiakov[1, *], S. A. Beizel[2, **], O. I. Gusev[2, *], A. V. Lander[3, ****], D. V. Chebrov[4, *****], L. B. Chubarov[2, ******]**

[1]Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Lavrentyeva ave., 6, Novosibirsk, 630090 Russia
[2]Federal Research Center for Information and Computational Technologies, Lavrentyeva ave., 6, Novosibirsk, 630090 Russia
[3]Institute of Earthquake Forecast Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya str., 84/32, Moscow, 117997 Russia
[4]Kamchatka Branch of the Federal Research Center "Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences", bulvar Piipa, 9, Petropavlovsk-Kamchatsky, 683006 Russia
**e-mail: gvk@sscc.ru*
***e-mail: beisels@gmail.com*
****e-mail: gusev_oleg_igor@mail.ru*
*****e-mail: land@mitp.ru*
******e-mail: danila@emsd.ru*
*******e-mail: chubarov@ict.nsc.ru*

The paper discusses the results of solving the problem of assessing the tsunami hazard of a section of the north-eastern coast of Kamchatka in the area of the Korf village, located on a sandy spit in the northern part of the Korf bay of the same name. To obtain these estimates, the "worst case" methodology was used. Based on the results of an analysis of seismicity and historical data on tsunami manifestations in the western part of the Bering Sea, three tsunamigenic zones were identified – near-field (Bering Sea), regional (Western Aleutians) and far-filed (Southern Chile), which create the greatest tsunami threat for the study area (north-eastern coast of Kamchatka) Based on the results of the analysis of seismicity and tectonic features of the source zones, sets of model tsunamigenic earthquakes typical for each of them were determined. For this set of models, numerical modeling of tsunami generation and propagation was performed and the most dangerous model sources were identified. The maximum elevations created by these sources for the Korf village area were 1.3 m for sources in the near (Bering Sea) zone, 2.4 m for the regional (Aleutian) zone, and 2.5 m for the far (Chilean) zone. At the next stage, for these sources, more detailed calculations were carried out on sequences of nested computational grids, which determined the characteristics of the tsunami impact on the coast. The main results of the work are the identification of the most dangerous tsunamigenic zones in relation to the Korf Spit, the selection of model sources for them and assessments of extreme impacts of tsunami waves that threaten this section of the coast.

Keywords: tsunami waves, protected coast, tsunami hazard assessment, seismicity, tsunamigenic earthquake, mathematical modeling