

УДК 550.345

ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ ЦУНАМИ ДЛЯ ПОБЕРЕЖЬЯ ОКТЯБРЬСКОЙ КОСЫ (ЗАПАДНАЯ КАМЧАТКА) ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2024 г. В. К. Гусяков^{a, *}, С. А. Бейзель^{b, **}, О. И. Гусев^{b, ***}, А. В. Ландерс^{c, ****},
Д. В. Чебров^{d, *****}, Л. Б. Чубаров^{b, *****}

^aИнститут вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
просп. Лаврентьева, 6, Новосибирск, 630090 Россия

^bФедеральный исследовательский центр информационных и вычислительных технологий,
просп. Лаврентьева, 6, Новосибирск, 630090 Россия

^cИнститут теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
ул. Профсоюзная, 84/32, Москва, 117997 Россия

^dКамчатский 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 18.03.2024 г.

После доработки 17.04.2024 г.

Принята к публикации 27.06.2024 г.

Рассматривается задача оценки цунамиопасности участка западного побережья Камчатки в районе Октябрьской косы, возникшая в связи с проблемой обеспечения транспортной доступности поселка Октябрьский и расположенных на косе рыбообрабатывающих предприятий. Для получения этих оценок использовалась методика “наихудшего случая” (worst case). По результатам анализа сейсмичности и исторических данных о проявлениях цунами в Охотском море были выделены две цунамигенные зоны, угрожающие побережью в районе Октябрьской косы, и для каждой из них определен набор модельных цунамигенных землетрясений. Для этого набора моделей было выполнено численное моделирование возбуждения и распространения цунами, по результатам которого выбраны наиболее опасные для исследуемого участка побережья модельные источники. На следующем этапе для этих источников были проведены уточняющие расчеты с использованием последовательности вложенных расчетных сеток, определившие параметры воздействия цунами на побережье. Основными результатами работы являются выявление наиболее опасных по отношению к побережью Октябрьской косы цунамигенных зон, выбор модельных цунамигенных источников в них и оценки параметров экстремальных волн цунами, угрожающих этому участку побережья.

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

DOI: 10.31857/S0203030624050033, **EDN:** HNKUGF

ВВЕДЕНИЕ

Уровень цунамиопасности западного побережья Камчатки, выражаемый через максимально

возможные величины заплесков и их повторяемости, значительно ниже, чем для ее восточного побережья. Это связано в первую очередь с отсутствием вблизи западного побережья

активной сейсмогенной зоны, имеющей потенциал для возникновения сильных цунами-генных землетрясений. В то же время он не является пренебрежимо малым в силу 1) наличия в Охотском море собственных сейсмогенных зон, обладающих определенным цунами-генным потенциалом, 2) возможности сильных цунами Курило-Камчатской зоны проникать в Охотское море через цепочку курильских проливов и 3) способности сильнейших транс-океанских цунами из удаленных цунами-генных зон Тихого океана создавать продолжительные по времени (до 2–3 суток) и опасные колебания уровня окраинных морей. В частности, наиболее значительные колебания уровня, с амплитудой до 2.2 м, зарегистрированные инструментально на северо-западном побережье Охотского моря, (в порту Магадана) были вызваны именно удаленным цунами, возникшим в Тихом океане при Чилийском землетрясении 22 мая 1960 г. [Соловьев, 1978].

Оценка цунамиопасности побережий окраинных морей типа Охотского представляет определенные трудности в силу недостатка данных исторических наблюдений, отсутствия (как правило) палеоданных и сложности применения вероятностных методов оценки цунамиопасности, например, в рамках методики РТНА (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment). Последнее вытекает из необходимости анализа источников из различных очаговых зон (локальных, региональных и удаленных), обладающих существенно различными магнитудными порогами для возбуждения цунами и повторяемостями сильнейших землетрясений. Следует также учесть, что для практического использования полученных результатов требуются не только оценки экстремальных высот волн на урезе, но также и оценки дальности и глубины заливания суши, для чего необходимо выполнение существенно более затратных расчетов наката цунами на сухой берег.

Настоящее исследование было выполнено с целью получения оценок цунамиопасности участка западного побережья Камчатки в районе Октябрьской косы, обеспечивающей транспортную доступность поселка Октябрьский и расположенных на этой косе рыбообрабатывающих предприятий (рис. 1).

Поселок и находящиеся рядом с ним предприятия расположены в средней, наиболее широкой части песчано-галечной косы общей длиной около 35 км, отшнуровывающей устье реки Большой от акватории Охотского моря. Средняя ширина косы около 100–150 м при средней высоте над уровнем моря 3–4 м. В месте расположения поселка ширина косы возрастает до 300–350 м при высоте 5–6 м. Единственная дорога, связывающая поселок с полуостровом, а также питающая этот поселок линия электропередачи проходят также через косу и периодически подвергаются с охотоморской стороны заливанию штормовыми волнами, высота которых в период сильных зимних штормов может достигать 7–8 м [Ветровое волнение..., 1998]. В такие периоды приход даже небольшого по высоте (в пределах 1 м) цунами может полностью отрезать поселок от полуострова и при отсутствии безопасных мест для эвакуации поставить под угрозу жизни людей. Поэтому задача оценки цунамиопасности этого участка охотоморского побережья Камчатки является весьма актуальной.

Представленные в статье результаты оценки цунамиопасности для Октябрьской косы были получены в рамках сценарного подхода с использованием методики “наихудшего случая” (worst case) и сопровождались получением оценок повторяемости расчетных экстремальных высот.

Реализуя сценарный подход, авторы выполнили несколько последовательных этапов работ. На первом из них проводится анализ сейсмичности зон, в которых могут располагаться потенциально цунамигенные источники. На следующем этапе оцениваются параметры максимально возможных землетрясений в пределах выделенных зон и определяется их наиболее опасное (по отношению к защищаемому побережью) положение. Для выбранных моделей очагов определяются их повторяемости на основе инструментальных, исторических или палеоданных. Наконец, на третьем этапе производятся расчеты распространения цунами на последовательности вложенных сеток (на наиболее детальной из них — с учетом наката) и определяются требуемые параметры цунамиопасности.

Такой подход ранее использовался авторами в ряде работ по исследованию воздействия

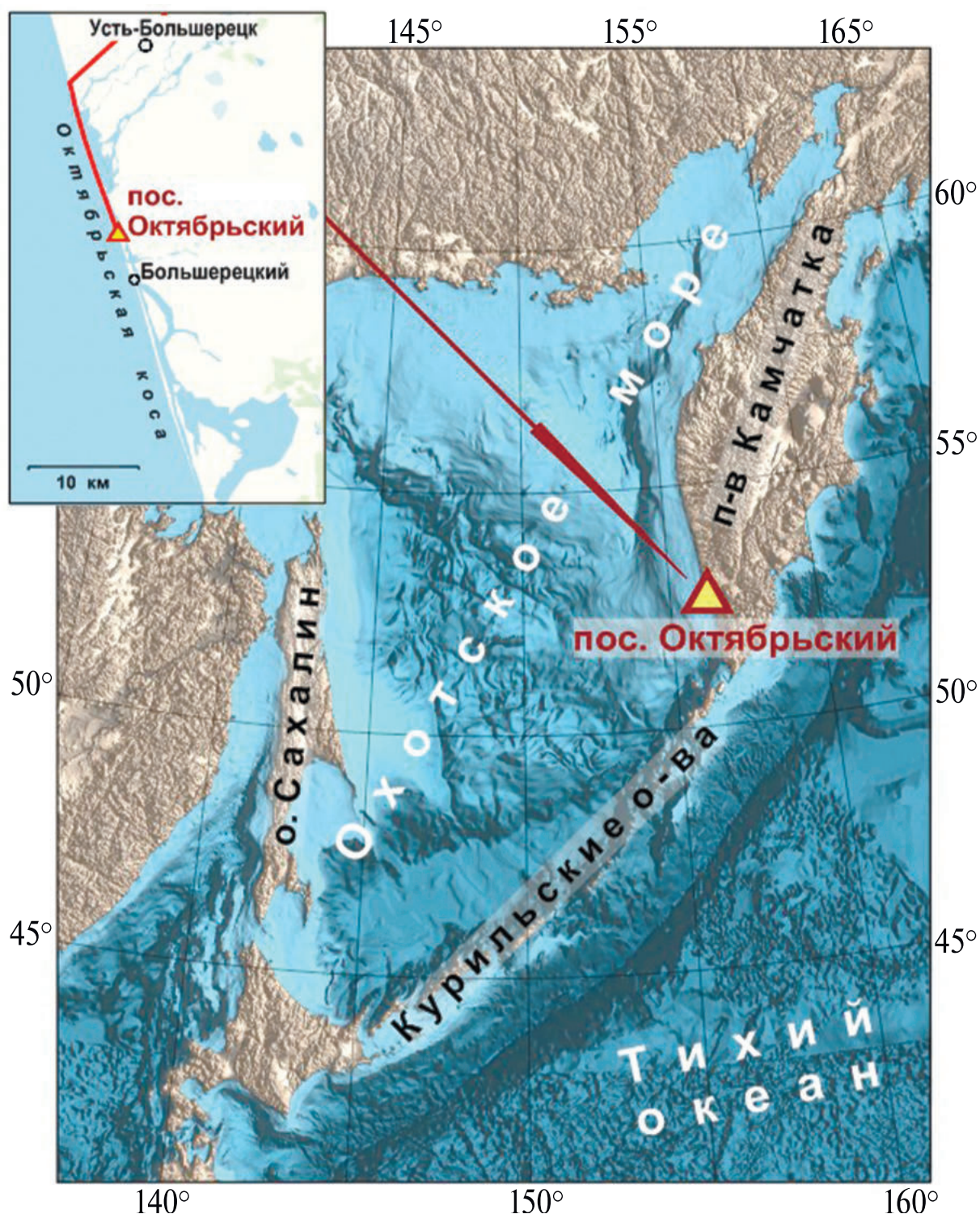


Рис. 1. Местоположение пос. Октябрьский на карте района исследований. На врезке красной линией показана дорога, ведущая по косе в пос. Октябрьский.

региональных и удаленных цунами на Дальневосточное побережье России [Beisel et al., 2014; Гусяков и др., 2019; Shokin et al., 2019; Chubarov et al., 2022]. В указанных публикациях приведена обширная библиография по исследованию

цунамиопасности побережий, по анализу сейсмотектоники изучаемых регионов и по методикам численного моделирования, используемых в решении соответствующих гидродинамических задач.

ИСТОРИЧЕСКИЕ ЦУНАМИ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО РЕГИОНА

Полный исторический каталог цунами на Дальневосточном побережье Российской Федерации (РФ), суммирующий сведения из ранее опубликованных каталогов [Соловьев, Ферчев, 1961; Соловьев, 1978; Заякин, 1996], а также из двух глобальных баз данных, поддерживаемых NCEI/NOAA [NCEI/WDS, 2024] и лабораторией цунами ИВМиМГ СО РАН [NTL/ICMMG SB RAS, 2024], содержит 108 региональных и 5 удаленных цунамигенных событий, наблюдавшихся в регионе за период с 1737 г. по 2023 г. Расположение очагов 108 цунамигенных событий, имевших проявление на Дальневосточном побережье РФ, показано на рис. 2. Анализ содержания каталога показывает, что основную угрозу дальневосточному побережью несут подводные землетрясения, происходящие в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне. В ней происходит свыше 90% всех цунамигенных землетрясений, угрожающих российскому побережью, в том числе все сильнейшие землетрясения с моментной магнитудой $M_w \sim 8.5-9.0$ [Гусяков, 2016]. Распределение событий по типу источников демонстрирует, что подавляющее большинство цунами (103 из 113) имело сейсмогенную природу, в 3 случаях волны цунами были вызваны вулканическими взрывами, в 2 — береговыми обвалами, 3 события имели метеорологическую природу, для 2 случаев природа источника остается неизвестной. Такое распределение показывает, что оценки, полученные для сейсмических источников, достаточно полно отражают общий уровень цунамиопасности дальневосточного побережья.

В опубликованных каталогах и имеющихся базах данных сведения о проявлениях цунами на западном побережье Камчатки практически полностью отсутствуют. Единственным исключением является информация о колебаниях уровня моря в пос. Озерной, достигавших высоты 5 м во время Камчатского цунами 4 ноября 1952 г. [Исторические сведения..., 1998]. Расстояние между пос. Озерной и пос. Октябрьский вдоль западного побережья составляет 135 км. Поскольку результаты численного моделирования этого события демонстрируют возможность проникновения значительной части волновой энергии в акваторию Охотского моря

[Бейзель и др., 2014], можно с уверенностью предполагать, что какое-то воздействие цунами на косу в районе пос. Октябрьский в 1952 г. было, однако документальных свидетельств этого найти не удалось.

СЕЙСМИЧНОСТЬ ОХОТОМОРСКОГО И КУРИЛО-КАМЧАТСКОГО РЕГИОНОВ

В регионе Охотского моря сходятся границы трех крупнейших литосферных плит (Тихоокеанской, Североамериканской и Азиатской), которые зажимают между собой относительно небольшую и практически асейсмичную Охотскую плиту. Основная масса охотоморских землетрясений происходит именно на этих границах.

С юго-востока под Охотскую плиту быстро (со скоростью 8–9 см/год [Argus et al., 2011]) пододвигается Тихоокеанская плита, образуя Курило-Камчатскую сейсмофокальную зону, в которой происходит большинство сильнейших землетрясений региона (рис. 3). Очаги цунамигенных землетрясений располагаются здесь в широкой полосе, протягивающейся вдоль Курило-Камчатского побережья и соответствующей пологому участку зоны субдукции. За примерно 120 лет инструментальных наблюдений в ней зарегистрировано около 70 мелкофокусных (с глубинами менее 70 км) событий с магнитудой 7 и выше. Из них 9 землетрясений имели магнитуду более 8 и одно (Камчатское землетрясение 4 ноября 1952 г.) имело магнитуду близкую к 9 [The ISC-GEM..., 2023]. Оно вызвало разрушительное цунами на юге Камчатки и на северных Курилах, породило трансокеанское цунами во всем бассейне Тихого океана. Данные о проявлении этого цунами на побережье Охотского моря [Соловьев, 1978; Исторические сведения..., 1998; Святловский, 1958] носят ограниченный и отрывочный характер, поскольку специального обследования последствий цунами на охотоморском побережье, в отличие от тихоокеанского, не проводилось.

В задуговой (охотоморской) части островной дуги также имеется область мелкофокусной сейсмичности, где теоретически возможно возникновение цунамигенных землетрясений. За время инструментальных наблюдений здесь

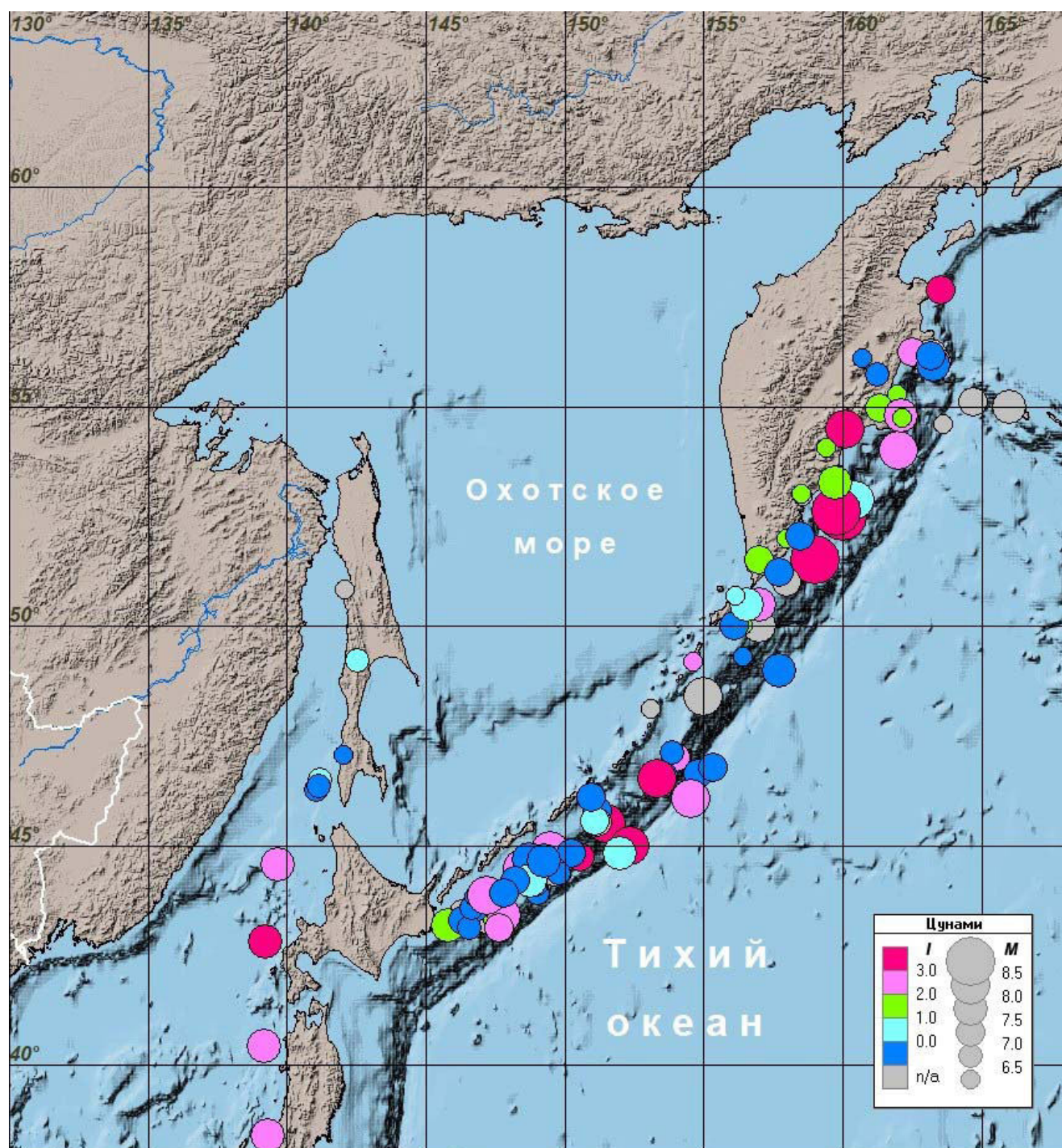


Рис. 2. Карта очагов цунамигенных событий, имевших проявление на Дальневосточном побережье РФ с 1737 г. по 2023 г. Размер кружков пропорционален magnitude землетрясения). Цветом показана интенсивность цунами по шкале Соловьева–Имамуры.

Примечание. В силу большого временного интервала (более 280 лет), покрываемого каталогом дальневосточных цунами, в нем в качестве величины magnitude цунамигенного землетрясения M принимается максимальное из трех возможных значений magnitude — макросейсмической M , magnitude по поверхностным волнам M_s и моментной magnitude M_w . В других случаях (например, при анализе сейсмических каталогов) тип magnitude оговаривается особо.

зафиксировано около 10 мелкофокусных землетрясений с magnitude больше 6.0. Сильнейшее из них произошло 07.05.1962 г. к западу от о. Итуруп и имело magnitude 6.5 [The ISC-GEM...,

2023]. Документальных свидетельств о генерации ощутимых цунами от таких землетрясений в литературе не имеется, однако теоретически их исключать нельзя. Волны цунами при этом

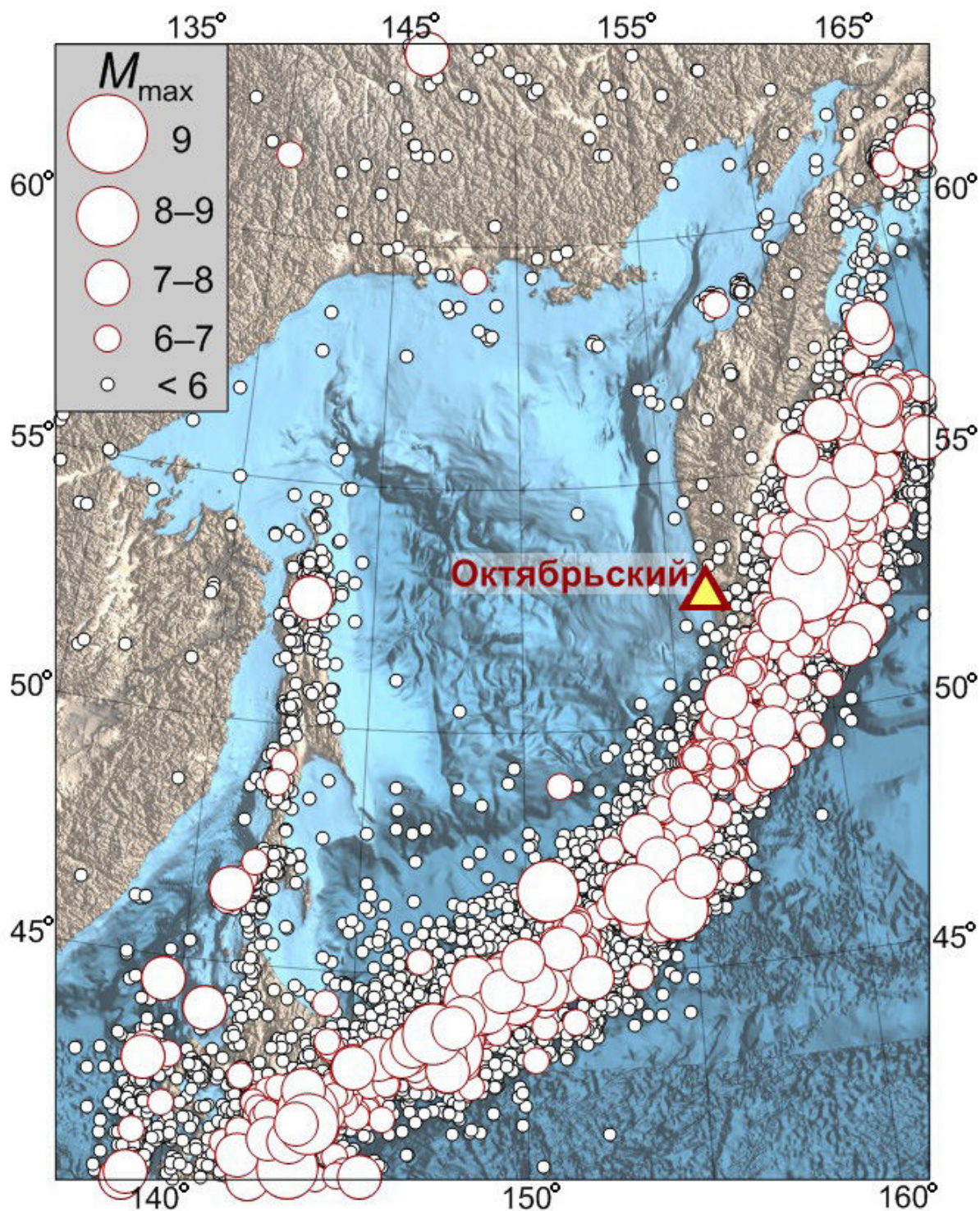


Рис. 3. Эпицентры мелкофокусных землетрясений (глубины до 70 км) Охотоморского и Курило-Камчатского регионов, зарегистрированных мировыми сетями за период инструментальных наблюдений 1904–2022 гг. по данным каталога ANSS [ANSS, 2024].

могут усиливаться за счет генерации подводных оползней, типичных для окраинных морей.

Западная и северная границы Охотской плиты образованы континентальными сейсмическими

поясами, на них реализуются медленные тектонические движения, отсутствуют глубоководные землетрясения и в целом уровень сейсмичности значительно ниже. Однако и в континентальных

Таблица 1. Параметры очагов модельных землетрясений, рассмотренных в серии сценарных расчетов

	lat (с.ш.)	long (в.д.)	L	W	DIP	RAKE	STRIKE	D ₀	H _{top}
1	53.35°	145.04°	138.00	35.00	45.00°	90.00°	182.00°	8.71	4.00
2	53.35°	145.12°	87.00	27.00	45.00°	90.00°	182.00°	4.49	4.00
3	53.30°	143.32°	138.00	35.00	45.00°	90.00°	180.00°	8.71	4.00
4	51.58°	158.03°	800.00	100.00	20.00°	90.00°	216.00°	10.00	4.00
5	48.13°	153.98°	800.00	100.00	20.00°	90.00°	221.00°	10.00	4.00
6	45.36°	149.64°	450.00	100.00	20.00°	90.00°	230.00°	10.00	4.00
7	51.71°	157.76°	450.00	150.00	20.00°	90.00°	216.00°	10.60	4.00
8	49.83°	155.52°	450.00	150.00	20.00°	90.00°	220.00°	10.60	4.00
9	49.52°	155.13°	450.00	150.00	20.00°	90.00°	220.00°	10.60	4.00
10	49.17°	154.68°	450.00	150.00	20.00°	90.00°	220.00°	10.60	4.00
11	48.81°	154.24°	450.00	150.00	20.00°	90.00°	220.00°	10.60	4.00
12	48.43°	153.82°	450.00	150.00	20.00°	90.00°	220.00°	10.60	4.00
13	50.18°	155.94°	450.00	150.00	20.00°	90.00°	221.00°	10.60	4.00
14	49.12°	155.89°	450.00	75.00	20.00°	90.00°	220.00°	21.20	4.00
15	49.12°	155.89°	450.00	75.00	20.00°	90.00°	220.00°	10.60	4.00
16	49.49°	155.19°	450.00	150.00	25.00°	90.00°	220.00°	10.60	4.00

Примечание. Здесь lat — широта центра нижнего края площадки разрыва, long — 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, D₀ — подвижка по разрыву (м), H_{top} — глубина верхнего края разрыва (км).

поясах зарегистрированы отдельные сильные землетрясения с магнитудами 7.0–7.5. Начиная с 1960-х гг. (время надежного определения гипоцентральных параметров), в пределах акватории Охотского моря (кроме областей, прилегающих к Курило-Камчатской дуге) зарегистрировано более 20 землетрясений с магнитудами ≥ 5 . Сильнейшие землетрясения на шельфе Охотского моря произошли в заливе Шелихова 7 июля 1996 г. ($M = 6.4$) и у северного побережья примерно в 150 км западнее Магадана 15 июля 1931 г. ($M = 6.25$). Внутренние же области акватории Охотского моря являются значительно менее сейсмоактивными, чем прилегающие к ним побережья Сахалина, Магаданской области, западной Камчатки и Курильских островов.

Сейсмичность Сахалина определяется проходящей по острову субмеридиональной границей между Охотской и Амурской плитами. Севернее острова она поворачивает на запад, переходит на Азиатский континент и продолжается в сторону Станового хребта. Северо-западная часть Охотского моря, севернее Сахалина, практически асейсмична. Кроме того, под остров продолжается нижняя часть

Курильской зоны субдукции. Однако относящиеся к ней события происходят на глубинах в несколько сотен километров и не могут порождать цунами.

Основной Сахалинский сейсмический пояс образован мелкофокусными землетрясениями, приуроченными к зоне контакта Охотской и Амурской плит. Он протягивается вдоль оси острова, и подавляющее большинство землетрясений происходит в его пределах (рис. 4). Отдельные события, однако, возникают и в прилегающих акваториях — на охотоморском шельфе Сахалина и в Татарском проливе. За период инструментальных наблюдений (с середины 1920-х гг. до настоящего времени) в этом поясе зарегистрировано два события с максимальными опубликованными магнитудами $M = 7.7$, еще одно с $M \geq 7.0$, 18 — с $M \in (6-7)$, около 200 с $M \in (5-6)$ и многие тысячи событий с меньшими магнитудами [ISC-isf, 2020]. Сильнейшее зарегистрированное землетрясение ($M_w = 7.0$, $M_s = 7.7$) в северной части острова произошло 27 мая 1995 г. вблизи г. Нефтегорска и вызвало слабое (с высотами до 0.2 м) цунами на северо-восточном побережье Сахалина.

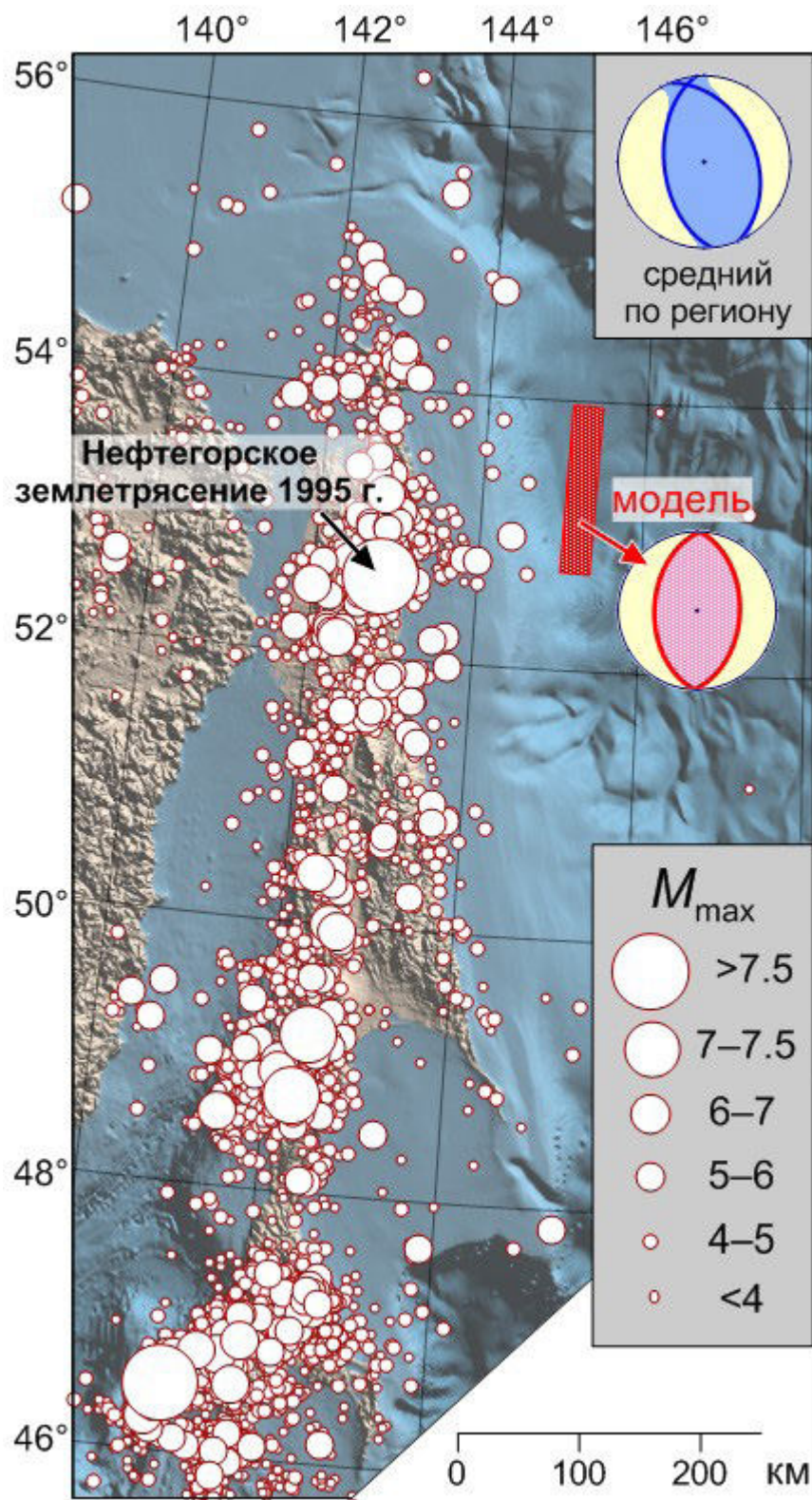


Рис. 4. Эпицентры мелкофокусных землетрясений (глубина до 70 км) Сахалина и прилегающих акваторий за период 1924–2022 гг. по данным каталогов ISC–isf и ANSS [ISC–isf, 2020; ANSS, 2024].

В правом верхнем углу рисунка приведена диаграмма тензора, среднего для данного региона.

Примечание. Красными прямоугольниками показано положение модельных цунамигенных источников (см. табл. 1, №№ 1–3). Красная стрелка указывает на диаграмму принятого для них механизма.

Отдельный небольшой сейсмический пояс протянулся в акватории вдоль западного побережья Камчатки, в частности, вблизи пос. Октябрьский. По данным Камчатской региональной сети, в нем, начиная с 1962 г., зарегистрировано более 350 событий. Из них 23 имели магнитуду $M_L \geq 5$ (здесь M_L — локальная магнитуда, измеренная по данным Камчатской региональной сети), а сильнейшее $M_L = 6.4$, что существенно ниже магнитудного порога ($M_L = 7.0$), принятого для объявления тревоги в Российской системе предупреждения о цунами. Потому этот пояс не рассматривался в качестве зоны, потенциально цунамиопасной для пос. Октябрьский.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Хотя общий уровень сейсмичности Сахалина существенно ниже, чем в Курило-Камчатской зоне, ряд обстоятельств требует особого внимания к моделированию цунами, исходящих из северо-восточной части сахалинской зоны. Во-первых, именно здесь располагался очаг крупнейшего зарегистрированного на Сахалине Нефтегорского землетрясения 27 мая 1995 г. Во-вторых, взаимное расположение северной части охотоморского шельфа Сахалина и пос. Октябрьский, ориентация площадок разрыва и типичные механизмы землетрясений этого района таковы, что при возникновении здесь сильного подводного землетрясения с большой вероятностью можно ожидать, что максимальная по амплитуде волна цунами будет распространяться именно в сторону Октябрьской косы. В-третьих, на северо-восточном шельфе острова Сахалин вблизи от сейсмоактивных областей ведутся разработки крупных газовых месторождений в рамках проектов “Сахалин-1” и “Сахалин-2”, что требует учета возможности возникновения здесь техногенных землетрясений.

Для этой зоны были рассмотрены три модельных очага цунамигенных землетрясений с моментными магнитудами 7.6 и 8.0 (табл. 1, очаги № 1–3) и одинаковым механизмом типа взброса, обладающим двумя важными для решаемой задачи свойствами. Во-первых, как видно из рис. 4, их механизм близок к типичному для Сахалина тензору сейсмического

момента, представленному средним для данного района тензором по 42 определениям из каталога CMT [Global CMT..., 2024]. Во-вторых, диаграмма направленности излучения энергии волны цунами от такого источника обладает максимумом в направлении пос. Октябрьский, что соответствует задаче поиска “наихудшего случая” для цунами, достигающего Октябрьской косы. Размеры модельных очаговых площадок разрыва и амплитуды подвижек рассчитаны согласно эмпирическим соотношениям, приведенным в работе [Papazachos et al., 2004].

Второй областью расположения очагов, создающих потенциальную угрозу цунами для пос. Октябрьский, является Курило-Камчатская сейсмогенная зона. Основная масса цунамигенных землетрясений здесь происходит в верхней пологой части зоны субдукции. Анализ исторических данных и результаты моделирования проявления цунами из этой зоны показывают, что существенную опасность для побережья Охотского моря могут создать только подводные землетрясения с предельно возможными магнитудами (9.0). В очагах таких землетрясений происходит разрыв вдоль главной границы раздела в кровле пододвигающейся океанической плиты. При этом в Курило-Камчатской зоне подвижка по разрыву в очагах таких предельно сильных землетрясений направлена примерно перпендикулярно простирацию островной дуги и не имеет существенной параллельной (сдвиговой) компоненты. В соответствии с этой основной сейсмотектонической схемой в качестве механизма модельных очагов землетрясений магнитуды 9.0 выбирался пологий надвиг с углом подвижки (rake) близким к 90° .

Для пос. Октябрьский наиболее опасной цунамигенной областью следует считать район Северных Курил, откуда волны цунами могут проникать в акваторию Охотского моря через несколько широких и достаточно глубоких проливов (Круженштерна, Севергина, Четвертый и Первый Курильские). Именно здесь располагался очаг Камчатского землетрясения 04.11.1952 г., породившего самое разрушительное цунами в Дальневосточном регионе РФ. Уровень опасности от очагов в районе центральных и южных Курил значительно ниже, поскольку энергия цунами практически

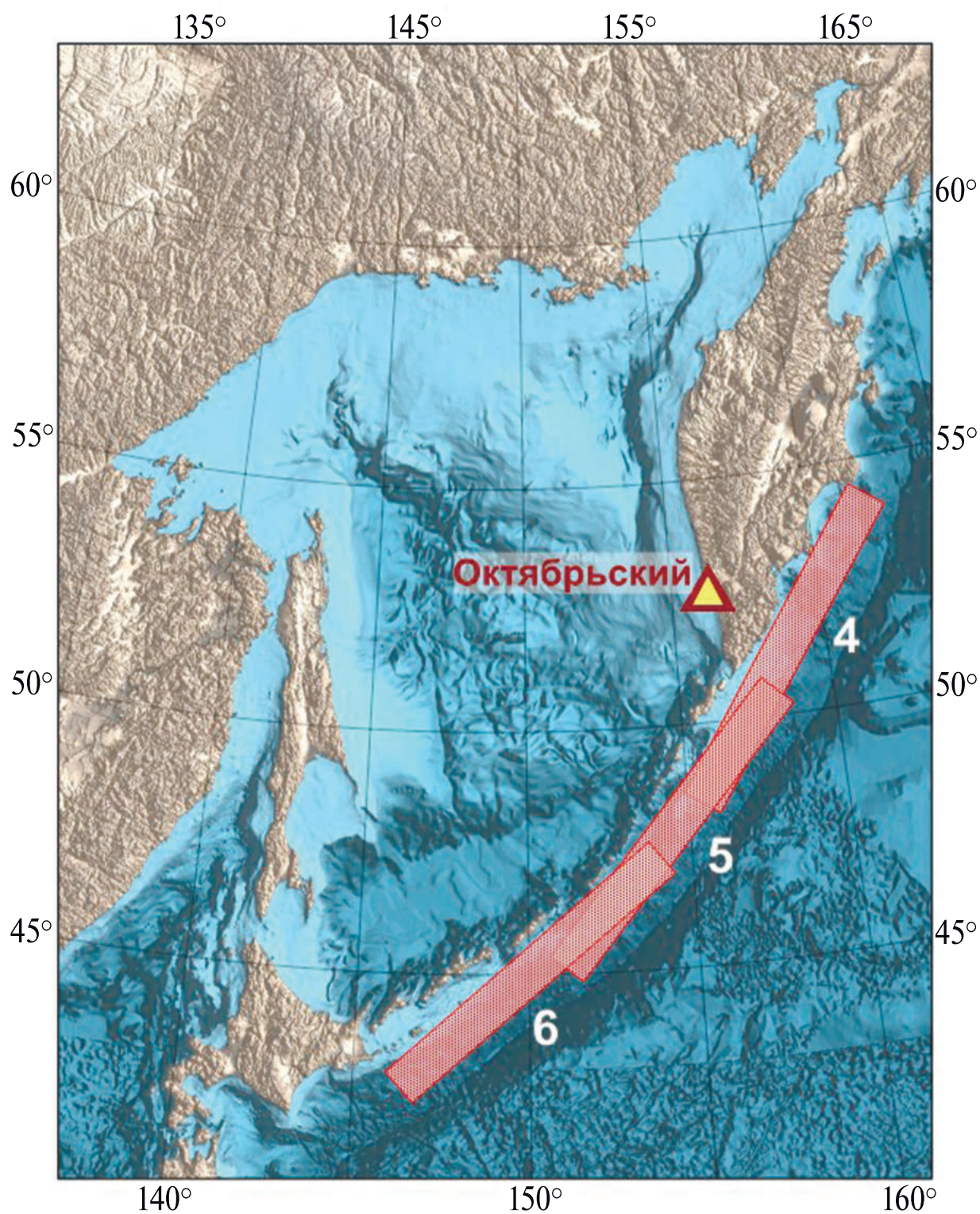


Рис. 5. Площадки очагов модельных землетрясений №№ 4–6, расположенных вдоль Курило-Камчатской дуги.

не способна распространяться вдоль береговой зоны в силу выраженной направленности (в сторону берега) ее излучения очагом типичного субдукционного землетрясения и

эффектов рефракции на мелководье [Гусяков, Чубаров, 1987]. Кроме того, для этих районов неизвестны исторические случаи возникновения предельно сильных ($M \sim 9$) подводных

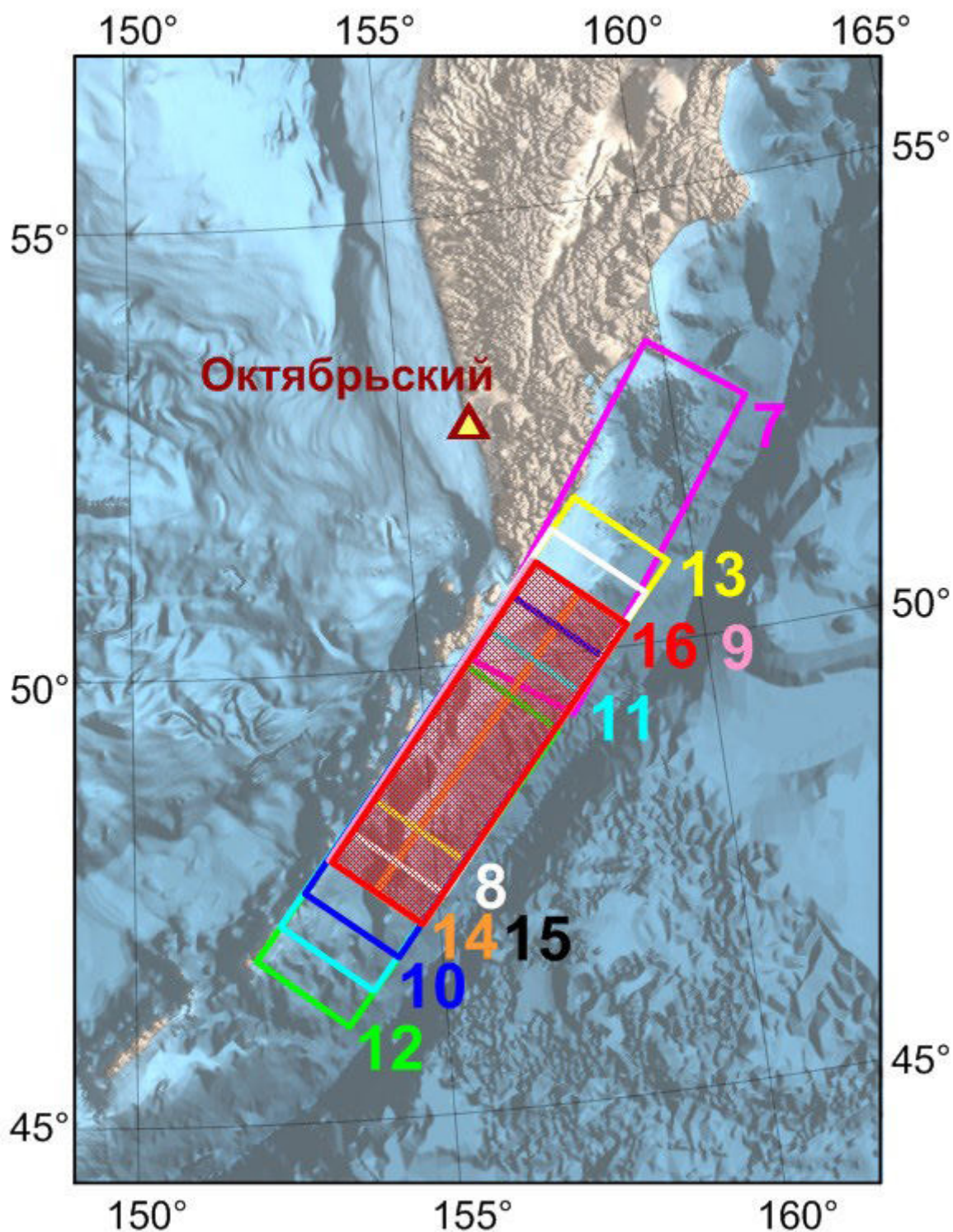


Рис. 6. Площадки очагов модельных землетрясений №№ 7–16, расположенных в зоне северных и центральных Курил.

землетрясений, хотя последние работы по изучению следов палеоземлетрясений на островах Итуруп и Симушир [Разжигаева и др., 2023] не исключают такую возможность.

Изучение влияния курило-камчатских очагов на исследуемый участок Охотского побережья в районе Октябрьской косы проводилось в два этапа. На первом из всей сейсмогенной зоны

протяженностью около 1500 км выделялся ее наиболее опасный сегмент. Для этого были построены три модельных очага №№ 4–6 (рис. 5), в совокупности перекрывающих основные предполагаемые цунамиопасные районы Курильской дуги. Расчеты распространения цунами от этих очагов, как и ожидалось, показали, что наиболее опасной для Октябрьской косы является ближайшая к ней часть дуги. Из трех рассмотренных очагов максимальные высоты цунами создавал источник № 5, очаг № 4 частично прикрыт полуостровом Камчатка, а очаг № 6 находится на существенно большем удалении от исследуемого района.

На втором этапе для определения более точного положения и параметров наиболее опасного для Октябрьской косы очага было рассмотрено 10 модельных источников (№№ 7–16), площадки которых показаны на рис. 6. Все модельные очаги, за исключением очагов № 14 и № 15, имели одинаковые размеры и механизмы, соответствующие модели субдукционного землетрясения магнитуды 9. Очаги № 14 и № 15 были рассмотрены в качестве модели так называемого “цунами-землетрясения” [Kanamori, 1972]. Для них была определена более узкая площадка разрыва (с шириной 75 км), смещенная в сторону глубоководной впадины, что дополнительно обеспечило повышение цунами-эффективности, за счет увеличения глубины воды в очаговой области. Для очага № 14 с целью сохранения общего сейсмического момента подвижка по разлому D_0 была увеличена в два раза. До сих пор такого рода “цунами-землетрясения” в диапазоне магнитуд 8.5–9.0 не были известны, но теоретически они возможны. Очаг № 7 может рассматриваться как модель Камчатского мега-землетрясения 4 ноября 1952 г.

В табл. 1 приведены основные параметры рассмотренных модельных очагов из обеих цунамигенных зон, угрожающих рассматриваемому участку западного побережья Камчатки. Процедура выбора из представленного набора очагов, “наиболее опасных” для исследуемого побережья, изложена в следующих разделах.

ПОВТОРЯЕМОСТЬ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ КУРИЛО-КАМЧАТСКОЙ И САХАЛИНСКОЙ ЗОН

Оценка повторяемостей рассматриваемых сценарных событий является одним из наиболее сложных составляющих такого рода

исследований. Основной причиной сложности является то, что методика “наихудшего случая” предполагает выбор в качестве сценарных событий наиболее сильных землетрясений, допустимых по сеймотектоническим условиям очаговых зон. Повторяемость событий такой предельной магнитуды обычно превышает продолжительность временного интервала доступных инструментальных наблюдений, если они и присутствуют в каталогах, то, как правило, в единичном числе (пример — Камчатское землетрясение 4 ноября 1952 г.). Поэтому для получения повторяемостей предельно сильных событий графики повторяемости приходится экстраполировать в область больших магнитуд с привлечением данных об исторических землетрясениях, имеющих только макросейсмические оценки магнитуд, либо данных о палеоземлетрясениях, оценки магнитуд которых еще более проблематичны.

В настоящей работе использовались все доступные для Курило-Камчатской зоны источники данных. Для северо-восточного побережья Сахалина построение графика повторяемости выполнялось с помощью процедуры экстраполяции данных, так как в этой зоне сведения об исторических землетрясениях доинструментального периода практически отсутствуют, а систематических исследований палеосейсмичности до сих пор не проводилось.

Графики повторяемости инструментально зарегистрированных землетрясений, построенные по данным каталогов ANSS и ISC-isf [ISC-isf, 2020; ANSS, 2024] в обеих потенциально опасных для пос. Октябрьский цунамигенных зонах приведены на рис. 7. При их построении учитывались только мелкофокусные землетрясения с глубинами до 70 км. Эти графики для каждой магнитуды M определяют “кумулятивные” значения, соответствующие числу наблюдавшихся событий с магнитудой $\geq M$, в среднем на единицу времени (год). Учитывая специфику методики поиска “наихудшего случая”, в качестве аргумента функции повторяемости выбиралась величина магнитуды $M_{\max}$ — максимальное опубликованное для события значение. При построении графиков применялись также процедуры сглаживания исходных эмпирических данных скользящими окнами шириной примерно 0.3 единицы магнитуды.

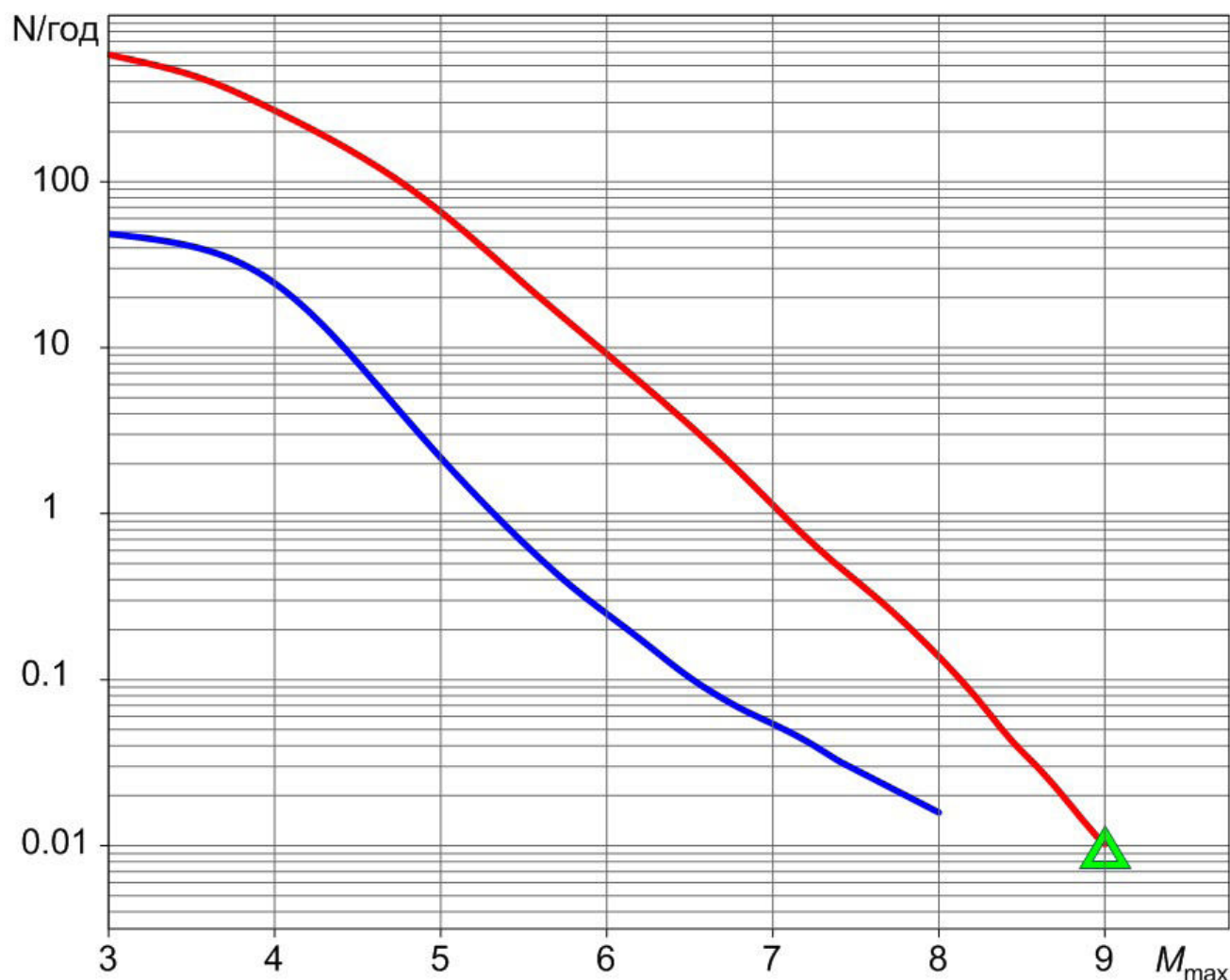


Рис. 7. Эмпирические кумулятивные законы повторяемости мелкофокусных землетрясений Курило-Камчатской дуги (красный, за период 1900–2020 гг.) и Сахалина (синий, 1924–2022) по данным каталогов ISC-isf и ANSS [ISC-isf, 2020; ANSS, 2024].
Примечание. Значение, отмеченное зеленым треугольником, получено с учетом палеоданных [Pinegina et al., 2018].

В результате многолетних полевых исследований береговых отложений Восточной Камчатки идентифицированы 30 событий цунами, относящихся к последним 5000 лет и вызвавших значительные (с высотами более 5–6 м) заплески на берегу. Для четырех землетрясений последних 1200 лет предложены оценки магнитуд, основанные на измеренных амплитудах быстрых опусканий (погребенных уступов в разрезах береговых террас). В отношении этих событий с высокой степенью вероятности можно предполагать, что они были вызваны близкими (региональными) землетрясениями с магнитудами в диапазоне 8.5–9.0. Таким образом, можно получить грубую оценку периода повторяемости сильнейших землетрясений

района Восточной Камчатки и Северных Курил в 300–400 лет, которая для мега-землетрясений $M \sim 9$ вполне согласуется с данными о повторяемости сильнейших землетрясений в других субдукционных зонах Тихого океана: Тохоку (500–600 лет) [Minoura et al., 2001], Каскадия (350–400 лет) [Atwater, 2007], Чили (около 400 лет) [Cisternas et al., 2005], а также в субдукционной зоне, протягивающейся вдоль западного побережья о. Суматра (около 450 лет) [Jankaew et al., 2008].

График повторяемости для зоны Курило-Камчатской дуги (см. рис. 7, красная кривая) построен по 70835 мелкофокусным землетрясениям региона с $M_{\max} \geq 3$, включенным в глобальные каталоги [ISC-isf, 2020; ANSS, 2024] за

период 1900–2020 гг. За это время в пределах Курило-Камчатской сейсмогенной зоны зафиксировано лишь одно землетрясение с магнитудой $M \sim 9$ (событие 4 ноября 1952 г.), что не позволяет статистически обоснованно продолжить региональный график повторяемости до этого максимального значения. Экстраполяция графика в область больших магнитуд, представляющих наибольший интерес с точки зрения цунамиопасности, была выполнена с привлечением данных об исторических и палеоземлетрясениях, полученных при изучении береговых отложений восточного побережья Камчатки [Pinegina et al., 2018].

График повторяемости для Сахалинского сейсмического пояса (см. рис. 7, синяя кривая) построен по данным о 4874 мелкофокусных землетрясениях региона с $M_{\max} \geq 3$, включенных в глобальные каталоги за период 1924–2022 гг. Экстраполяция этих данных в сторону больших магнитуд и учет размеров области северо-восточного шельфа, на котором были расположены модельные очаги, позволяют принять для них оценку повторяемости землетрясений примерно в 100 лет.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ АЛГОРИТМЫ

В качестве модели генерации цунами очагом подводного землетрясения использовалась общепринятая “поршневая” модель, в рамках которой движения дна в очаговой области подводного землетрясения ассоциируются с вертикальными ко-сейсмическими (остаточными) смещениями поверхности однородного упругого полупространства, возникающими под действием внутреннего пространственного источника дислокационного типа [Подъяпольский, 1968; Гусяков, 1978; Okada, 1985].

Расчеты характеристик трансформации волн цунами проводились с использованием программной системы MGC [Чубаров и др., 2011], основанной на явной двухшаговой схеме типа МакКормака второго порядка аппроксимации [MacCormack, 1969] для классической модели мелкой воды, учитывающей нелинейность волнового процесса, кривизну земной поверхности, силу Кориолиса, а также шероховатость дна [Shokin et al., 2008]. Для обеспечения

необходимой точности результатов использовалась методика телескопически вложенных сеток (nested grid), детальность которых увеличивается по мере приближения к исследуемому участку побережья [Гусев, Чубаров, 2018].

На последнем уровне вложения выполнялось моделирование наката волн цунами на побережье со сложным рельефом прибрежной суши. Нелинейные уравнения теории мелкой воды здесь численно решались методом крупных частиц [Белоцерковский, Давыдов, 1982]. В этом методе используется обладающая свойством монотонности явная разностная схема первого порядка аппроксимации, обеспечивающая приемлемую точность результатов расчета вблизи берега на сетках высокого разрешения. Описание метода и его реализации в программном комплексе MGC, а также результаты валидации и верификации используемых моделей и численных алгоритмов приведены в работах [Рычков и др., 2013; Шокин и др., 2015а, 2015б, 2015в].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчеты распространения цунами от набора модельных очагов выполнялись на последовательности вложенных сеток, показанных на рис. 8.

По результатам предварительного численного моделирования выбирались наиболее опасные для Октябрьской косы модельные источники из табл. 1. Эти расчеты выполнялись на “региональной” сетке размерностью 2113×2293 с шагом 30 угловых секунд, покрывающей область 42.4° – 60.0° с.ш., 142.4° – 161.5° в.д. Для уточнения расчетов распространения волн от источника к рассматриваемому побережью и для повышения точности пересчета искомых волновых характеристик от “региональной” области к “локальной” использовалась “промежуточная” сетка размерностью 1837×2233 с шагом 10 угловых секунд, покрывающая область 49.2° – 54.3° с.ш., 151.4° – 157.6° в.д. Эти две сетки были построены с использованием данных из массива GEBCO-2009 (шаг 1 угловая минута) посредством кусочно-билинейной интерполяции.

Наконец, в качестве “локальной” использовалась сетка размерностью 631×991 с шагом

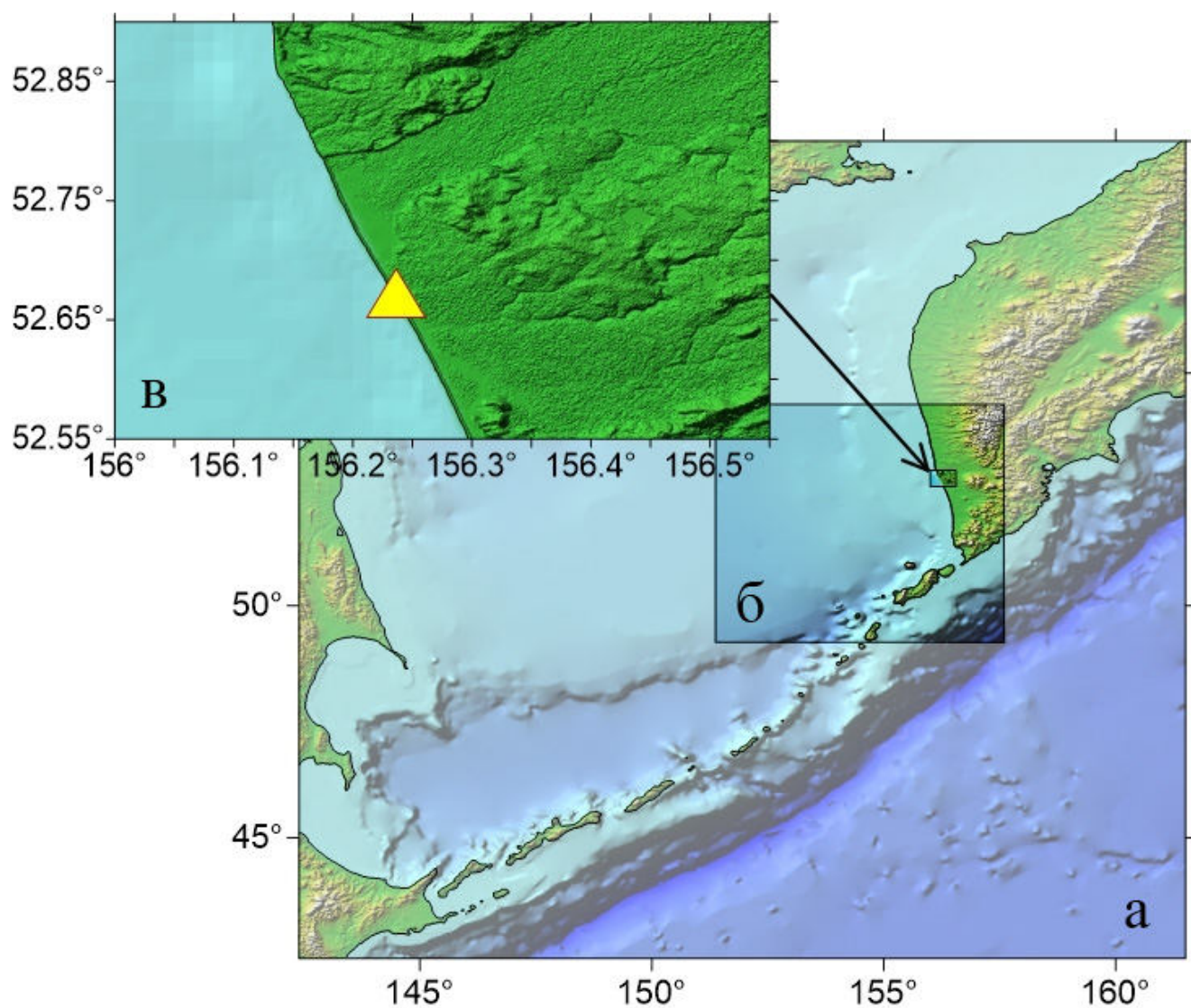


Рис. 8. “Региональная” (а), “промежуточная” (б) и “локальная” (в) расчетные области.

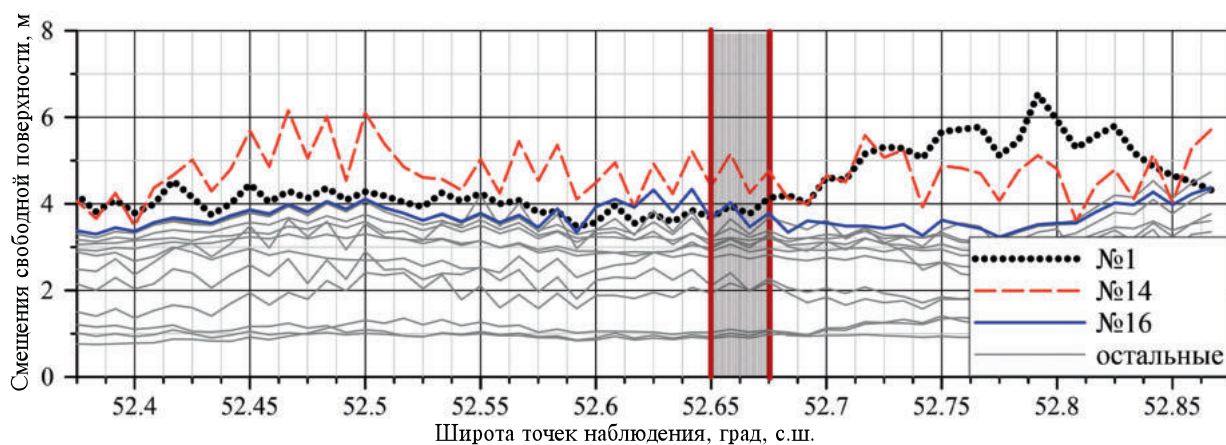


Рис. 9. Вдольбереговое распределение максимальных положительных смещений уровня свободной поверхности, полученное в расчетах на “региональной” сетке для источников №№ 1–16.

Примечание. Серый прямоугольник показывает положение поселка на Октябрьской косе.

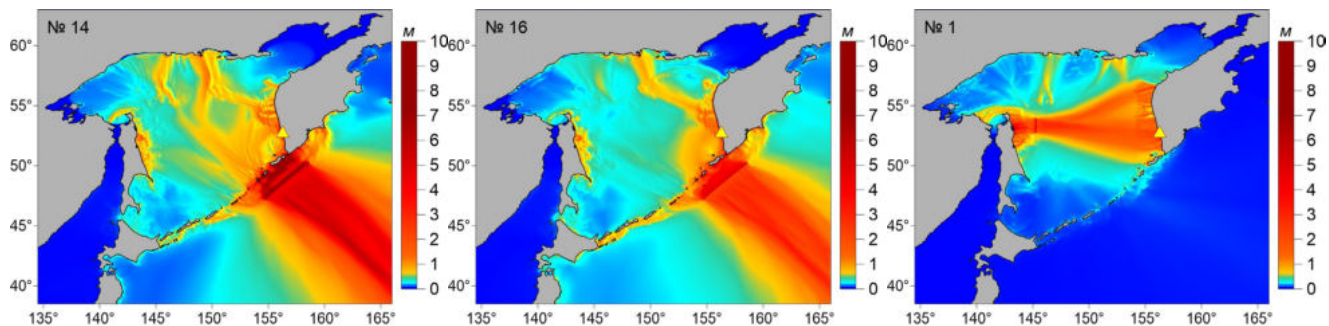


Рис. 10. Распределения максимальных за все время расчета амплитуд волн для источников № 1, № 14 и № 16.

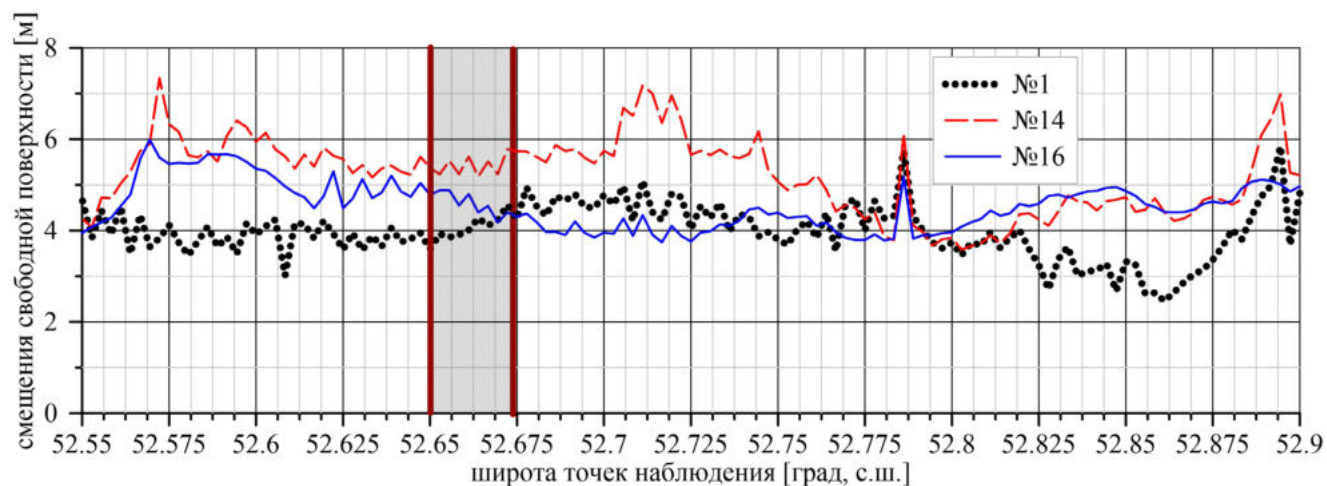


Рис. 11. Вдольбереговое распределение максимальных положительных смещений уровня свободной поверхности, полученное в расчетах с учетом наката в “локальной” области для модельных источников № 1, № 14 и № 16.

Примечание. Серый прямоугольник показывает положение поселка на Октябрьской косе.

2 угловые секунды, покрывающая область 52.55°–52.9° с.ш., 156.0°–156.55° в.д., полученная при помощи билинейной интерполяции данных массива GEBCO-2009 с дополнительным использованием массива высот суши SRTM (шаг 30 м). При этом значения высот из массива SRTM, меньшие 5 м в центральной части косы, были повышены до 5 м с тем, чтобы привести их в соответствие с результатами полевого обследования морфологии косы. В этой “локальной” области, включающей в себя Октябрьскую косу, проводился расчет характеристик наката волн на побережье.

Результаты предварительных расчетов, выполненных на “региональной” сетке для всех 16 рассмотренных модельных источников из табл. 1, показаны на рис. 9 в виде вдольберегового распределения максимальных амплитуд цунами. Из этих результатов следует, что наибольшее повышение уровня в районе пос.

Октябрьский создается очагами № 1 (Сахалинская очаговая зона) и № 14 и № 16 (Курило-Камчатская очаговая зона). Именно для них были затем выполнены детальные расчеты на “вложенных” сетках с моделированием стадии наката волны цунами на сухой берег. Диаграммы свечения (значения максимальных за все время расчета амплитуд волн в каждом узле расчетной сетки) для этих источников приведены на рис. 10. Они наглядно демонстрируют направленность излучения волновой энергии сейсмогенными очагами и фокусирующее действие рельефа дна на трассах распространения к побережью.

Основные результаты детальных расчетов представлены на рис. 11 и 12 в виде вдольбереговых распределений максимальных положительных смещений уровня свободной поверхности и зон заплеска, рассчитанных с учетом наката в “локальной” области.

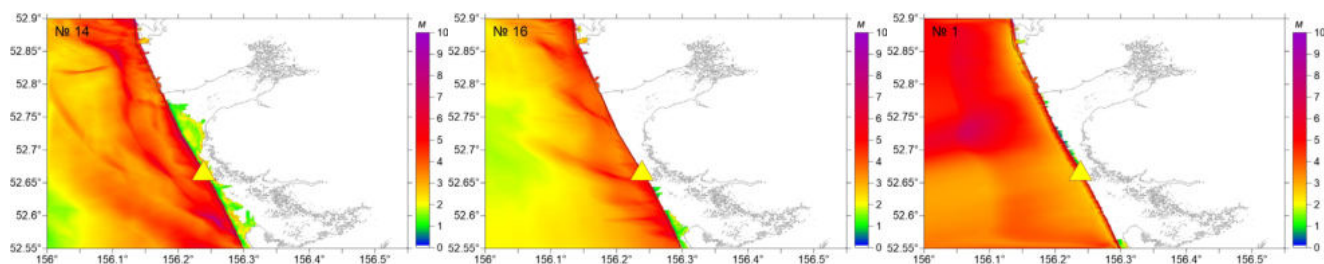


Рис. 12. Распределения максимальных за все время расчета амплитуд волн в “локальной” области для источников № 1, № 14 и № 16. *Примечание.* Сплошная черная линия соответствует положению линия уреза невозмущенной поверхности.

Анализ полученных результатов позволяет сделать выводы о том, что максимальные высоты подъема воды в районе Октябрьской косы и пос. Октябрьский для источников № 1 и № 16 составляют от 4 до 5 м. Эти значения весьма близки к высоте самой косы, однако, переливания через нее практически не происходит, оно имеет место только в нескольких точках при очень небольшой толщине слоя жидкости. Для источника № 14 высоты подъема воды в районе пос. Октябрьский превышают 5 м, а чуть севернее, на участке дороги, ведущей к поселку, достигают 7 м. Переливание при этом наблюдается на большей части Октябрьской косы. Заметим, однако, что этот источник соответствует модели “цунами-землетрясения”, которое возможно теоретически, но до сих пор не наблюдалось в этом диапазоне магнитуд.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как отмечалось во Введении, основной целью настоящей работы было получение оценок цунамиопасности участка западного побережья Камчатки в районе Октябрьской косы, необходимых для оценки риска нарушения транспортной доступности поселка Октябрьский и расположенных поблизости рыбообрабатывающих предприятий вследствие воздействия на косу волн цунами.

Исследование выполнялось в рамках сценарного подхода к задаче оценки цунамиопасности с использованием методики “наихудшего случая” (worst case). Анализ сейсмичности Охотоморского региона и Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, а также исторических данных о проявлениях цунами в Охотском море позволил выделить две очаговые зоны, наиболее опасные для рассматриваемого участка побережья. Первая зона располагается

у северо-восточного побережья Сахалина, вторая — в районе северных Курил. Для этих двух зон были определены 16 наиболее опасных модельных цунамигенных землетрясений, для которых были проведены предварительные расчеты генерации и распространения волн. Результаты этих расчетов привели к выбору 3 модельных очагов (см. табл. 1, № 1, № 14, № 16), которые создают наиболее опасные волны вблизи пос. Октябрьский. Затем с использованием телескопически вложенных расчетных сеток было выполнено детальное моделирование генерации, распространения и наката волн, порожденных этими источниками.

Результаты детальных расчетов показали, что максимальные высоты подъема воды в районе пос. Октябрьский для источников № 1 (Сахалинская зона) и № 16 (Курило-Камчатская зона) составляют от 4 до 5 м. Эти значения весьма близки к высоте самой косы, однако, переливания через нее практически не происходит, оно имеет место только в нескольких точках при очень небольшой толщине слоя жидкости. Для источника № 14 высоты подъема воды в районе пос. Октябрьский превышают 5 м, а чуть севернее, на участке дороги, ведущей к поселку, достигают 7 м. При этом может возникать переливание на отдельных участках косы, обеспечивающей транспортное сообщение поселка с полуостровом. Такой источник, однако, соответствует модельному механизму “цунами-землетрясения”, которое возможно теоретически, но до сих пор не наблюдалось в диапазоне магнитуд 8.5–9.0.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Представленные в работе исследования выполнялись в рамках Государственного контракта Министерства природных ресурсов и экологии

Камчатского края № ИКЗ 22241011208944101010010 0470017112241 от 12.04.2022 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 набега цунами) и ФИЦ ЕГС РАН № 075-00682-24-01/02 (в части сбора информации о сейсмичности Камчатки).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 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. 2014. Т. 90. № 5. С. 578–590.
- Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М.* Метод крупных частиц в газовой динамике. М.: Наука, 1982. 392 с.
- Ветровое волнение. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. 343 с.
- 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”. 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., Кихтенко В.А., Чубаров Л.Б., Шокин Ю.И.* Построение обзорных карт цунами-районирования Дальневосточного побережья РФ в рамках методики РТНА // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24. № 1. С. 55–72.
- Гусяков В.К.* Цунами на Дальневосточном побережье России: историческая перспектива и современная проблематика // Геология и геофизика. 2016. № 9. С. 1601–1615.
- Гусяков В.К., Чубаров Л.Б.* Численное моделирование возбуждения и распространения цунами в прибрежной зоне // Физика Земли. 1987. № 11. С. 53–64.
- Заякин Ю.А.* Цунами на Дальнем Востоке России. Петропавловск-Камчатский: Камшат, 1996. 88 с.
- Исторические сведения о цунами в Охотском море // Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. IX. Охотское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеиздат, 1998. С. 225–226.
- Подъяпольский Г.С.* Возбуждение длинной гравитационной волны в океане сейсмическим источником в коре // Физика Земли. 1968. № 1. С. 7–24.
- Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А., Харламов А.А., Лоскутов А.В., Булгаков Р.Ф.* Геологические свидетельства проявления сильных цунами на побережье острова Итуруп (Курильские острова) за последние 3500 лет // Геосистемы переходных зон. 2023. Т. 7. № 4. С. 357–374.
- 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.
- Святловский А.Е.* Последствия цунами 4–5 ноября 1952 г. на Камчатке и Курильских островах // Бюлл. Совета по сейсмологии АН СССР. 1958. № 4. С. 15–38.
- Соловьев С.Л., Ферчев М.Д.* Сводка данных о цунами в СССР // Бюлл. Совета по сейсмологии АН СССР. 1961. № 9. С. 23–55.
- Соловьев С.Л.* Основные данные о цунами на Тихоокеанском побережье СССР, 1937–1976 гг. // Изучение цунами в открытом океане. М.: Наука, 1978. С. 61–136.
- 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. 2015а. Т. 27. № 1. С. 99–112.
- Шокин Ю.И., Рычков А.Д., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б.* О численных методах решения задач наката волн на берег. I. Сравнительный анализ численных алгоритмов для одномерных задач // Вычислительные технологии. 2015б. Т. 20. № 5. С. 214–232.
- Шокин Ю.И., Рычков А.Д., Хакимзянов Г.С., Чубаров Л.Б.* О численных методах решения задач наката волн на берег. II. Опыт решения модельных задач //

- Вычислительные технологии. 2015в. Т. 20. № 5. С. 233–250.
- ANSS (USGS) catalog. 2024. <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. Iss. 11. <https://doi.org/10.1029/2011GC003751>
- Atwater B.F.* Hunting for ancient tsunamis in the tropics // *EOS. Transactions of the American Geophysical Union* 88. 2007.
- Beisel S.A., Gusiakov V.K., Chubarov L.B., Shokin Yu.I.* Numerical Simulation of the Action of Distant Tsunamis on the Russian Far East Coast // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. V. 50. № 5. P. 508–519. ISSN 0001-4338
- Chubarov L.B., Kikhtenko V.A., Lander A.V., Gusev O.I., Beisel S.A., Pinegina T.K.* Technique of local probabilistic tsunami zonation for near-field seismic sources applied to the Bechevinskaya Cove (the Kamchatka Peninsula) // *Nat Hazards*. 2022. V. 110. № 1. P. 373–406.
- Cisternas M., Atwater B., Torrejón F., Sawai Y., Machuca G., Lagos M., Eipert A., Youlton C., Salgado I., Kamataki T., Shishikura M., Rajendran C.P., Malik J.K., 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. <https://www.globalcmt.org/CMTsearch.html>
- ISC-isf catalog. 2020. <ftp://ftp.isc.ac.uk/pub/isf/>
- Jankaew K., Atwater B., Sawai Y., Sawai Y., Choowong M., Charoentitirat T., Martin M., Prendergast A.* Medieval forewarning of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand // *Nature*. 2008. V. 455. P. 1228–1231. <https://doi.org/10.1038/nature07373>
- 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.
- Minoura K., Imamura F., Sugawara D., Kono Y., Iwashita T.* The 869 Jogan tsunami deposit and recurrence interval of large-scale tsunami on the Pacific coast of northeast Japan // *J. of Natural Disaster Science*. 2001. V. 23. P. 83–88.
- NCEI/WDS. Global historical tsunami database, 2100 BC to Present, 10.7289/V5PN93H7. 2024. https://www.ngdc.noaa.gov/hazard/tsu_db.shtml
- NTL/ICMMG SD RAS. Novosibirsk Tsunami Laboratory of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of Siberian Division of Russian Academy of Sciences. Global Tsunami Database, 2100 BC to Present. 2024. <https://tsun.sccc.ru/nh/tsunami.php>
- Okada Y.* Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // *Bull. Seism. Soc. Am.* 1985. V. 75. № 4. P. 1135–1154.
- 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 // *Bull. of the Geol. Society of Greece*. 2004. V. XXXVI. P. 1482–1489.
- Pinegina T.K., Bazanova L.I., Zelenin E.A., Bourgeois J., Kozhurin A.I., Medvedev I.P., Vydrin D.S.* Holocene Tsunamis in Avachinsky Bay, Kamchatka, Russia // *Pure and Applied Geophysics*. 2018. V. 175. № 4. P. 1485–1506.
- Shokin Yu I., Gusiakov V.K., Kikhtenko V.A., Chubarov L.B.* A Methodology for Mapping Tsunami Hazards and Its Implementation for the Far Eastern Coast of the Russian Federation // *Doklady Earth Sciences*. 2019. V. 489. Iss. 2. P. 1444–1448.
- Shokin Yu.I., Babailov V.V., Beisel S.A., Chubarov L.B., Eletsky S.V., Fedotova Z.I., Gusiakov 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.
- The ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue, 1904–2019. Version 10.0. March 21. 2023. <http://www.isc.ac.uk/iscgem/download.php>

ASSESSMENT OF TSUNAMI HAZARD FOR THE COAST OF THE OKTYABRSKY SPIT (WESTERN KAMCHATKA) BASED ON 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",
Piipa bulvar, 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 problem of assessment of the tsunami hazard for a section of the western coast of Kamchatka in the Oktyabrskaya Spit area is considered. This problem arose in connection with the task of ensuring transport accessibility of the Oktyabrsky village and fish processing factories located on the spit. 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 Sea of Okhotsk, two tsunamigenic zones were identified that threaten the coast in the Oktyabrskaya Spit, and for each of them a set of model tsunamigenic earthquakes was determined. For this set of models, numerical modeling of tsunami generation and propagation was performed, and the most dangerous (for the coastal area under study) source models were selected. At the next stage, more detailed calculations were carried out for these sources using a nested grids technique, which determined the parameters of the tsunami impact on the coast. The main results of the work are the identification of the most dangerous tsunamigenic zones threatening the coast of the Oktyabrskaya Spit, the selection of model tsunamigenic sources in them and the assessment of the parameters of extreme tsunami waves that can affect this section of the coast.

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