

Построение обзорных карт цунамирайонирования дальневосточного побережья РФ в рамках методики РТНА*

В. К. Гусяков¹, В. А. Кихтенко², Л. Б. ЧУБАРОВ^{2,†}, Ю. И. ШОКИН²

¹Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Новосибирск, Россия

²Институт вычислительных технологий СО РАН, Новосибирск, Россия

[†]Контактный e-mail: chubarov@ict.nsc.ru

В работе идет речь о реализации методики вероятностного цунамирайонирования побережья, известной под названием РТНА (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment), для создания обзорных карт цунамиопасности дальневосточного побережья России. Обсуждаются методологические основы такого подхода, проблемы построения сеймотектонических моделей основных цунамигенных зон, численные методики получения расчетных каталогов высот волн на побережье. Приведены примеры обзорных карт для различных повторяемостей, построенных с применением методики РТНА и представленных с помощью созданного веб-приложения WTMар. Упомянуты также некоторые проблемы применения методики РТНА, связанные как с недостаточностью данных наблюдений, так и со сложностью выполнения большого объема сценарного численного моделирования.

Ключевые слова: цунамиопасность, цунамигенная зона, сеймотектоническая модель, районирование, повторяемость, вероятностная оценка, РТНА, метод Монте-Карло, сценарное моделирование.

Библиографическая ссылка: Гусяков В.К., Кихтенко В.А., Чубаров Л.Б., Шоккин Ю.И. Построение обзорных карт цунамирайонирования дальневосточного побережья РФ в рамках методики РТНА // Вычислительные технологии. 2019. Т. 24, № 1. С. 55–72. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.1.005.

Введение

Обеспечение безопасности населения и хозяйственного освоения прибрежных территорий в цунамиопасных районах, к которым относится большая часть Дальневосточного региона РФ, требует наличия карт цунамирайонирования побережья, показывающих уровень цунамиопасности для различных его участков. Предварительное цунамирайонирование побережья — это получение и картирование долгосрочных оценок максимальных ожидаемых высот цунами или других характеристик катастрофического

*Title translation and abstract in English can be found on page 72.

© ИВТ СО РАН, 2019.

воздействия этих волн на побережье и их повторяемости. Долгосрочные оценки опасности цунами необходимы:

- 1) для обеспечения безопасной и рациональной жизнедеятельности на угрожаемой территории;
- 2) перспективного планирования ее развития;
- 3) выполнения оперативных мероприятий по защите населения при угрозе цунами (выбор безопасных убежищ и маршрутов эвакуации).

Задача оценки долгосрочной цунамиопасности во многом аналогична задаче оценки сейсмоопасности. Последняя во всех странах решается сегодня на основе методики PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment), положенной также в основу проекта создания карты общего сейсмического районирования территории России ОСР-2016 [1]. При выполнении этого проекта такое последствие подводного землетрясения как вызванная им волна цунами, к сожалению, не принималось во внимание, хотя оно является основной опасностью для Дальневосточного региона, где происходит 90 % всех сильных землетрясений на территории России. Однако результаты большой работы, выполненной в рамках проекта ОСР-2016, по уточнению каталогов исторических землетрясений, изучению строения их очагов, картированию зон возникновения землетрясений (зон ВОЗ) в цунамиопасных районах могут и должны быть использованы для оценки цунамиопасности дальневосточного и других побережий России.

К настоящему времени для вероятностной оценки цунамиопасности создана и вполне детально разработана методика РТНА (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment) [2–4], также во многом аналогичная методике PSHA. Она широко используется в США, Канаде, Австралии, Новой Зеландии, Западной Европе как для обзорного цунамирайонирования протяженных участков побережий, так и для расчета детальных карт цунамиопасности отдельных населенных пунктов, гаваней и портов. Для получения вероятностной оценки цунамиопасности в рамках этой методики строится вероятностная сеймотектоническая модель основных цунамигенных зон, угрожающих защищаемому побережью, и применяются численные модели возбуждения и распространения цунами для расчета ожидаемых высот цунами в конкретных береговых пунктах. Методика РТНА позволяет оценить зависимость между количественной характеристикой опасности цунами (например, высотой волны на урезе) и вероятностью ее реализации в течение заданного промежутка времени.

Основными проблемами применения методики РТНА являются недостаточность данных для определения структурных, энергетических и вероятностных характеристик моделей источников цунами, а также существенно более высокая, по сравнению с методикой PSHA, вычислительная трудоемкость, связанная с проведением массовых сценарных расчетов. В то время как при оценке сейсмической опасности используются инженерные формулы связи “магнитуда землетрясения — балл сотрясаемости”, базирующиеся на некоторых эмпирических гипотезах и соотношениях, получение оценок цунамиопасности требует численного решения нелинейных уравнений в частных производных, используемых для моделирования распространения цунами от очага до выхода на берег.

Анализ исторических каталогов цунами показывает, что в большинстве цунамигенных регионов основной вклад в цунамиопасность вносят цунами сейсмогенного происхождения (для Дальневосточного региона РФ доля сейсмогенных цунами составляет 95 % [5]). Поэтому вероятностные оценки цунамиопасности строятся, как правило, на основе учета только сейсмогенных цунами. Вклад других типов источников (оползне-

вых, вулканических, обвальных) в силу их относительной редкости и сложности их учета здесь не рассматривается.

Поскольку изменчивость высот волн цунами вдоль берега довольно сильная, особенно для сложных изрезанных побережий, карты цунамиопасности, пригодные для практического использования, должны строиться в достаточно крупных масштабах (1:10 000–1:100 000). Как следствие, покрываемые ими территории будут весьма ограниченными (1–10 км). В этой ситуации наличие обзорных карт цунамирайонирования для протяженных участков побережья, построенных в масштабе порядка 1:2 000 000, совершенно необходимо. Такие карты позволяют количественно сравнивать различные побережья по их цунамиопасности. Более того, созданные при их построении сейсмотектонические модели цунамигенных зон могут послужить основой для разработки карт детального цунамирайонирования.

В первом разделе статьи излагается постановка задачи вероятностного цунамирайонирования, во втором — речь идет о методике решения задачи, третий раздел посвящен построению вероятностной сейсмотектонической модели — способам формирования модельного каталога цунамигенных землетрясений и определения их повторяемости. Технология построения обзорных карт цунамирайонирования и примеры ее реализации обсуждаются в четвертом и пятом разделах.

1. Постановка задачи

Предположим, что воздействие цунами заданной интенсивности на побережье представляется пуассоновским потоком событий. Такой подход является общепринятым при решении, например, задач сейсмораионирования. Несмотря на разнообразие факторов, определяющих характеристики исследуемых процессов, такая гипотеза вполне приемлема для описания сейсмических явлений, порождаемых всем многообразием реальных геологических и сейсмотектонических условий, часть из которых может быть недостаточно известной либо неизвестной совсем. Тогда вероятность возникновения события в заданный период времени T определяется соотношением

$$P(I(s) > I_{thre}, T) = 1 - \exp(-W(I(s) > I_{thre})T), \quad (1)$$

где $I(s)$ — количественная характеристика опасности цунами (здесь и далее s — высота волны на уресе) на защищаемом участке побережья; I_{thre} — пороговое значение этой характеристики; $W(I(s) > I_{thre})$ — средняя частота (повторяемость) превышения значения I_{thre} . Исследуемый поток событий полностью определяется своей средней частотой, и основной целью является вычисление зависимости этой величины от I_{thre} .

В силу аддитивности пуассоновских потоков искомая средняя частота может быть представлена как сумма частот всех возможных событий, обеспечивающих превышение порогового значения:

$$W(I(s) > I_{thre}) = \int_{\Omega} b(I(s|Q), I_{thre})w(Q)dQ. \quad (2)$$

Здесь Ω — пространство параметров очагов цунамигенных землетрясений; $Q \in \Omega$ — элемент этого пространства; $I(s|Q)$ — высота волны в защищаемом пункте при воздействии источника Q ; $b(x, y)$ — бинарная индикаторная функция, которая принимает

значение 1, если $x > y$, и 0, если иначе; $w(Q)$ — средняя частота возникновения события с источником Q . Интегрирование обусловлено непрерывностью пространства Ω , а следовательно, $w(Q)$ имеет смысл плотности потоков с соответствующими параметрами.

Для вычисления интеграла цунамиопасности прежде всего необходимо определить способ вычисления подынтегрального выражения. Величина $I(s | Q)$ находится путем численного моделирования распространения волны от источника Q . Расчет типичного регионального сценария для каждого источника Q требует десятков CPU-часов на современном процессоре. Что касается пространства источников Ω и их повторяемости $w(Q)$, то они определяются по сейсмотектонической модели рассматриваемой территории. Отметим, что именно от функции $w(Q)$ в значительной мере зависит точность окончательных оценок, но в то же время сама функция определяется с большой погрешностью из-за недостатка статистики наблюдаемых событий, особенно в области больших магнитуд.

При выборе алгоритма численного интегрирования следует учитывать ряд обстоятельств, первое из которых состоит в том, что пространство Ω является существенно многомерным, что делает невозможным применение традиционных квадратурных формул. Так, использованная авторами дислокационная пространственная модель сейсмического источника описывается десятью независимыми параметрами. Выполненное в [6] исследование значимости этих параметров хотя и подтверждает хорошо известный факт преобладающего значения магнитуды, положения и глубины очага подводного землетрясения, но в то же время показывает, что в определенных условиях все рассматриваемые параметры оказываются значимыми и их нельзя полностью игнорировать.

Второе обстоятельство связано с тем, что в силу вычислительной ресурсоемкости процедуры расчета значения $I(s | Q)$ для каждого Q желательно обходиться небольшим числом узлов интегрирования при условии обеспечения приемлемой точности. Потратив некоторые ресурсы на определение оптимальных узлов, можно снизить затраты на численное моделирование. Наконец, используемый расчетный алгоритм должен быть таким, чтобы возможное изменение сейсмотектонической модели и, как следствие, изменение оценок повторяемости сейсмических событий $w(Q)$ не приводили к необходимости пересчета значений $I(s | Q)$.

2. Методика решения задачи

Для вычисления искомой повторяемости высот цунами с использованием экспертных оценок создается конечное множество наборов параметров очагов модельных землетрясений. Такой подход является некоторым упрощением общей методики, изложенной в предыдущем разделе. Для адекватной аппроксимации интеграла (2) эта совокупность должна достаточно плотно покрывать все пространство возможных значений параметров очагов землетрясений. Явный выбор совокупности источников экспертом позволяет обойтись меньшим их числом, чем при использовании метода Монте-Карло, и не потерять при этом нужную точность интегрирования.

Для упрощения оценки частоты возникновения таких модельных событий вся исследуемая область разбивается на условно-однородные зоны (УОЗ), внутри которых характеристики сейсмичности считаются постоянными. Для каждой УОЗ задается интервал возможных магнитуд землетрясений, который в свою очередь разбивается на подынтервалы. Таким образом, пространство Ω разбивается на подобласти Ω_i , которые бу-

дем называть классами. Средняя частота событий каждого класса $w(\Omega_i)$ может быть оценена либо напрямую по количеству событий исторического каталога землетрясений, соответствующих этому классу, либо экстраполяцией закона Гутенберга — Рихтера в область больших магнитуд, где непосредственное использование каталога невозможно из-за недостатка в нем источников с такими магнитудами.

Для каждого класса на основе экспертных оценок конструируется набор представительных источников $|Q_j|$. Общая частота повторяемости источников i -го класса равномерно делится на всех его представителей. Тогда искомая частота превышения значения пороговой характеристики вычисляется как

$$W(I(s) > I_{thre}) = \sum_i \frac{N_i(I(s) > I_{thre})w(\Omega_i)}{M_i},$$

где M_i — общее число модельных источников i -го класса; $N_i(I(s) > I_{thre})$ — число модельных источников, обеспечивающих превышение значения пороговой характеристики порождаемыми ими волнами цунами.

Для определения значений $I(s | Q_j)$ применяется сценарное моделирование распространения цунами от зоны генерации до берега с использованием программного комплекса MGC [7], ядро которого реализует конечно-разностный алгоритм, основанный на схеме Мак-Кормака [8], аппроксимирующей нелинейные уравнения теории мелкой воды, учитывающие сферичность Земли и силу Кориолиса. Каждый сценарный расчет позволяет определить значения искомого параметра $I(s | Q_j)$ сразу для всех береговых пунктов рассматриваемой акватории.

При этом в точках расчетной сетки на линии уреза ставилось граничное условие непротекания (условие “отражающей стенки”). Процесс наката волн на сушу не моделировался. Для того чтобы избежать эффекта “осушения” дна и последующего развития численной неустойчивости при взаимодействии волн с отражающей стенкой, прибрежные глубины, меньшие заданной пороговой величины H_{min} , заменялись этим значением. Для различных магнитуд землетрясений величины H_{min} были различны: 10 м для $M_w = 7.2$ и 7.8 , 15 м для $M_w = 8.4$, 20 м для $M_w = 9.0$.

3. Построение вероятностной сеймотектонической модели

3.1. Совокупность модельных очагов

В качестве модели возбуждения цунами при численных расчетах чаще всего используется так называемая поршневая модель, в рамках которой вертикальные движения дна бассейна в очаговой области подводного землетрясения определяют начальное состояние свободной поверхности океана. Такие смещения рассчитываются обычно по формулам, выведенным в [9] и представляющим остаточные (статические) смещения поверхности однородного упругого полупространства под действием внутреннего пространственного источника дислокационного типа.

В настоящей работе использованы аналогичные формулы, полученные В. К. Гусяковым в [10] на семь лет ранее И. Окады. Несмотря на различия в форме записи итоговых выражений для компонент смещений, полученных в этих работах, многочисленные проверки показали полное соответствие значений рассчитанных смещений при любых наборах параметров модельных очагов. Этот подход требует задания следующих параметров очаговой модели: L , W — длина и ширина плоскости разрыва, δ — угол падения разрыва (отсчитывается против часовой стрелки от горизонтальной плоскости),

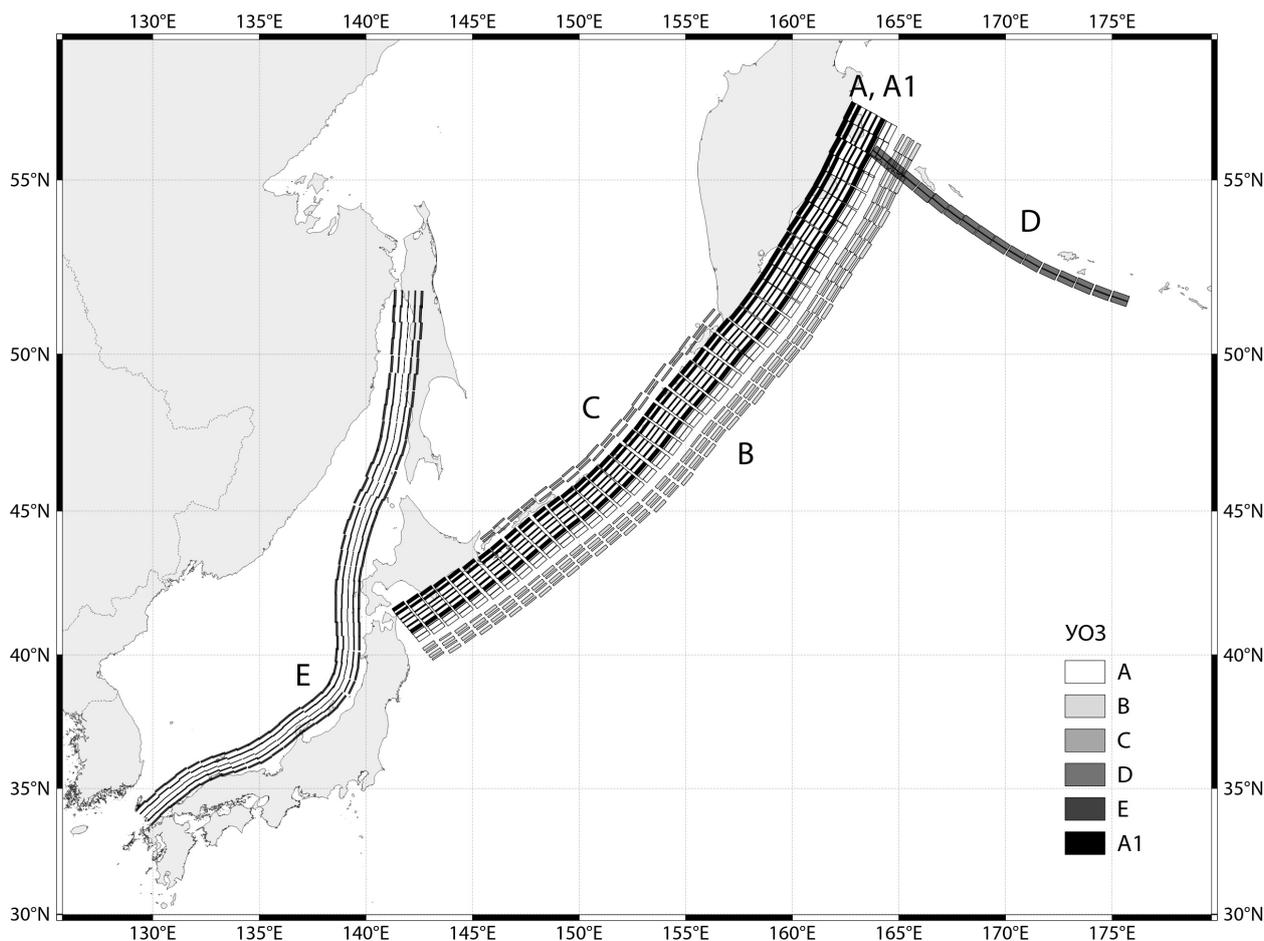


Рис. 1. Положение проекций площадок модельных очагов землетрясений магнитуды $M_w = 7.2$ в УОЗ А, А1, В, С и D, угрожающих курило-камчатскому побережью, и площадок модельных очагов землетрясений той же магнитуды, аппроксимирующих УОЗ в восточной части Японского моря (зона Е)

λ — направление подвижки в плоскости разрыва (отсчитывается против часовой стрелки от проекции горизонтальной линии на плоскость разлома), D_0 — величина смещения по разрыву, h_0 — глубина верхнего края разрыва, θ — простирание разрыва (отсчитывается против часовой стрелки от направления на север).

При моделировании процессов генерации волн цунами сейсмического происхождения значения параметров L , W , D_0 выводятся из корреляционных соотношений, связывающих эти параметры с магнитудой землетрясения M_w [11, 12]. Глубина верхнего края разрыва h_0 , углы δ и λ определяются экспертно на основе построенных моделей очаговых зон, а угол θ принимается близким углом простирания глубоководной впадины или по ориентации береговой линии в очаговой зоне.

Формирование совокупности модельных очагов выполнялось с учетом современных представлений о сеймотектонике рассматриваемого региона. В результате была создана совокупность 2552 таких событий, состоящая из шести УОЗ (А — 968 событий, А1 — 468 событий, В — 456 событий, С — 38 событий, D — 52 события, Е — 570 событий). Расположение соответствующих площадок разрыва в этих зонах для наборов модельных очагов с магнитудами 7.2 представлено на рис. 1.

В Курило-Камчатском регионе очаги цунамигенных землетрясений располагаются в широкой полосе, протянувшейся между краем шельфа островной дуги, восточным побережьем Камчатки и осью глубоководной впадины. Сейсмотектоника здесь определяется процессом субдукции океанической (тихоокеанской) плиты под перекрывающий ее выступ континентальной литосферы [13, 14]. В соответствии с такой сейсмотектонической моделью преобладающим механизмом сильных субдукционных землетрясений в этой зоне должен быть пологий (с углами падения порядка 15°) поддвиг, что реально подтверждают результаты определения их механизмов по методике СМТ (Centroid Moment Tensor).

В сейсмотектонической модели Курило-Камчатского региона этим очагам соответствует зона А (рис. 1), которая аппроксимируется системой модельных очагов с магнитудами M_w в диапазоне от 7.2 до 9.0 и подвижками, ориентированными вкрест простирания островной дуги (угол $\lambda = 90^\circ$). Глубины гипоцентров этих очагов закономерно возрастают от 10–20 км вблизи глубоководной впадины до 50–60 км у восточного побережья Курильских островов и Камчатки. Далее к западу сейсмофокальная зона резко изгибается вниз и падает под Охотское море с углами от 55° на севере до 35° – 40° на юго-западе, при этом, как показывают анализ исторических данных и результаты моделирования, ее цунамигенный потенциал резко падает.

С зоной А связаны очаги большинства цунамигенных землетрясений Курило-Камчатского региона, в том числе всех наиболее сильных (с магнитудами $M_w > 8.5$). Однако в рамках той же субдукционной модели в этой зоне оказывается возможным и другой тип механизмов. Расчетные данные и физическое моделирование [15] показывают, что островодужный склон континентальной литосферы под действием напряжений, возникающих на его подошве в процессе поддвига океанической плиты, должен деформироваться и разрушаться с образованием разрывов, круто падающих под океан, по которым происходят подвижки взбросового типа. Для учета вклада таких очагов в цунамиопасность побережья была построена дополнительная система модельных очагов А1, состоящая из взбросовых подвижек (угол $\lambda = -90^\circ$) по крутопадающим в сторону океана плоскостям разрывов (угол $\delta = 45$ – 135°). Поскольку эти очаги должны целиком располагаться в пределах островодужного клина, их магнитуда ограничена величиной $M_w = 7.8$, а вертикальная протяженность разрывов — величиной порядка 40 км.

Другая область, в которой также возможно возникновение цунамигенных землетрясений, угрожающих курило-камчатскому побережью, находится вблизи внешнего океанического вала и связана с изгибом Тихоокеанской плиты перед ее погружением в зону субдукции (зона В на рис. 1). Хотя уровень сейсмической активности в этой области примерно на порядок ниже, чем на пологом участке зоны субдукции, в ней также происходит достаточно много землетрясений с магнитудами в диапазоне 6.0–7.0, а иногда случаются и более сильные события. Самое сильное из инструментально зарегистрированных землетрясений в области океанического вала, имевшее магнитуду $M_w = 8.1$, произошло 13 января 2007 г. и породило цунами с высотами волн до 2–3 м на ближайшем побережье острова Симушир.

Поскольку эта область в целом находится в зоне растяжения, для нее характерен сбросовый механизм по плоскостям, субпараллельным простиранию глубоководного желоба с довольно крутыми углами падения. Выбор одной из двух возможных плоскостей разрыва в данном случае менее очевиден, однако многие эксперты отдают предпочтение плоскостям с падением в сторону океана. Землетрясения здесь аппроксимировались

системой в виде четырех цепочек модельных очагов с углами падения $\delta = 50\text{--}70^\circ$ и магнитудами в диапазоне 7.2–8.4.

Наконец, в задуговой (охотоморской) части островной дуги также имеется область мелкофокусной сейсмичности, где теоретически возможно возникновение цунамигенных землетрясений. За время инструментальных наблюдений здесь зафиксировано около десяти мелкофокусных (с глубинами 20–40 км) землетрясений с магнитудой более 6.0. Сильнейшее из них произошло 07.05.1962 г. к западу от острова Итуруп и имело магнитуду 6.6–7.0. Документальных свидетельств о возникновении цунами от таких землетрясений в литературе не имеется, однако теоретически их исключать нельзя, поэтому в сеймотектоническую модель добавлена зона С в виде двойной цепочки очагов с магнитудой $M_w = 7.2$, протягивающихся параллельно Курильской островной дуге в ее задуговой части (рис. 1). Для них принимался взбросовый механизм подвижки по разноориентированным плоскостям разрыва с падением как под океан, так и под Охотское море (углы падения $\delta = 70$ и 110°). Простирание всех модельных очагов в зонах А, В и С в целом соответствует простиранию островной дуги и восточного побережья Камчатки.

Помимо рассмотренных выше зон А, В и С для курило-камчатского побережья, по крайней мере его северо-восточной части, представляют также опасность землетрясения в западной части Алеутской зоны субдукции. Они аппроксимировались двойной цепочкой модельных очагов с механизмами в виде косоугольного поддвига ($\lambda = 170^\circ$) по главной литосферной границе раздела, полого ($\delta = 10^\circ$) падающей в этой области под Берингово море (зона D, рис. 1). За время инструментальных наблюдений непосредственно в этой зоне не было зафиксировано землетрясений с магнитудами более 7.9, однако они возникали на соседних прилегающих к ней участках обеих субдукционных зон (Курило-Камчатской и Алеутской), поэтому для зоны D рассмотрен полный набор магнитуд $M_w = 7.2\text{--}9.0$.

В Японском море основная цунамигенная зона (зона Е) протягивается вдоль западного побережья Японской островной дуги от Цусимского пролива на юге до Татарского пролива на севере. Возникающие здесь цунамигенные землетрясения имеют магнитуды 7.4–7.9, однако в силу особенностей механизмов очагов (крутопадающие плоскости разрывов, малая глубина) они способны вызывать опасные цунами с высотами волн до 20–30 м на ближайшем (японском) и до 6–8 м российском (в Приморье) побережьях. Сейсмический процесс в этой протяженной зоне обусловлен взаимодействием Филиппинской плиты и Японской микроплиты, движущихся на запад-северо-запад, с юго-восточным окончанием Евразийской плиты, часто выделяемым в качестве отдельной Амурской плиты. В соответствии с этой схемой преобладающими механизмами сильных цунамигенных землетрясений в восточной части Японского моря должны быть взбросы по крутопадающим плоскостям разрыва. Такая интерпретация в целом подтверждается результатами определений механизмов современных цунамигенных землетрясений в Японском море (например, Акицкого 1986 г., Окуширского 1993 г.).

Япономорская цунамигенная зона аппроксимировалась системой модельных очагов с магнитудой 7.2 (рис. 1). Она состоит из пяти параллельных цепочек, протянувшихся вдоль западного побережья о. Хонсю, Хоккайдо и Сахалина, реализующих взбросовые подвижки по субвертикальным плоскостям разрыва. Углы падения этих плоскостей приняты равными 70° (цепочка А), 80° (В), 90° (С), 100° (D), 110° (Е). На основе этих очагов строилась также система модельных очагов с магнитудами 7.2, 7.8 и 8.4. Значение 8.4 принято в качестве предельно возможной магнитуды цунамигенных землетрясений в Японском море на основе анализа макросейсмических последствий раз-

рушительного землетрясения Манджу 1026 г. [16], происшедшего в южной оконечности рассматриваемой зоны.

3.2. Определение повторяемости цунамигенных землетрясений

Как было сказано выше, для оценки повторяемости модельные события сгруппированы в классы по магнитуде и принадлежности к УОЗ (см. таблицу). Повторяемость первых десяти классов определялась по сейсмическому каталогу Дальнего Востока, встроенному в Глобальную базу данных по цунами, поддерживаемую лабораторией цунами ИВМиМГ СО РАН [17]. Этот каталог покрывает период с 1737 г. по настоящее время и состоит из двух частей — инструментальной и исторической. Инструментальная часть, покрывающая период с 1904 по 2014 г., построена на основе известного глобального каталога ISC-GEM [18]. Историческая часть (1737–1903 гг.), построена в основном на основе опубликованных сейсмических каталогов [19, 20] с дополнениями из каталогов цунами [21–23].

Для определения повторяемости из этого каталога извлекалось число событий из заданного интервала магнитуд, происшедших в пределах рассматриваемой УОЗ (или их объединения). Такая принадлежность определялась как вхождение эпицентра землетрясения в некоторую область класса, представляющую собой объединение площадок разрыва всех соответствующих модельных источников, расширенное во всех направлениях на некоторую буферную величину. Это число делилось на период представительности каталога для соответствующего класса. В перекрывающихся зонах А и А1 предполагалось, что 70 % исторических событий относятся к зоне А, остальные — к зоне А1.

Группировка модельных событий в классы по магнитуде и принадлежности к УОЗ

№ класса	Модельная магнитуда	Число модельных источников	Область	Период представительности, лет	Буфер, км	Интервал магнитуд	Число событий каталога 1/год	Повторяемость класса, 1/год	Повторяемость одного модельного события, 1/год
1	9.0	136	A,D	279	0	[8.6, ∞)	2	0.00716	$0.052 \cdot 10^{-3}$
2	8.4	372	A,B,D	116	0	[8.0, 8.6)	11	0.09482	$0.254 \cdot 10^{-3}$
3	7.8	304	A	116	0	[7.5, 8.0)	29	0.17500	$0.575 \cdot 10^{-3}$
4	7.8	228	A1	116	10	[7.5, 8.0)	31	0.08017	$0.351 \cdot 10^{-3}$
5	7.8	168	B,D	116	10	[7.5, 8.0)	6	0.05172	$0.307 \cdot 10^{-3}$
6	7.2	320	A	116	10	[7.0, 7.5)	104	0.44827	$1.400 \cdot 10^{-3}$
7	7.2	240	A1	116	11	[7.0, 7.5)	99	0.42672	$1.778 \cdot 10^{-3}$
8	7.2	160	B	116	10	[7.0, 7.5)	18	0.15517	$0.969 \cdot 10^{-3}$
9	7.2	38	C	116	10	[7.0, 7.5)	3	0.02586	$0.680 \cdot 10^{-3}$
10	7.2	16	D	116	5	[7.0, 7.5)	4	0.03448	$2.155 \cdot 10^{-3}$
11	8.4	190	E	86	21	[8.0, ∞)	—	0.02822	$0.148 \cdot 10^{-3}$
12	7.8	190	E	86	21	[7.5, 8)	—	0.03351	$0.176 \cdot 10^{-3}$
13	7.2	190	E	86	21	[7.0, 7.5)	—	0.09108	$0.479 \cdot 10^{-3}$

Процедура оценки повторяемости событий из япономорской УОЗ (Е) заключалась в линейной аппроксимации закона Гутенберга — Рихтера методом наименьших квадратов по данным из сейсмического каталога для зоны Е с последующей экстраполяцией в область больших магнитуд.

4. Веб-приложение WTMap

Представленные выше подходы использованы при построении обзорных карт цунами-опасности для дальневосточного побережья России. Для построения и визуализации карт создано веб-приложение WTMap [24]. Оно позволяет по результатам моделирования строить и отображать карты вдольберегового распределения высот волн с заданной средней повторяемостью превышения, например 1 раз в 100, 500 или 1000 лет. Кроме того, возможно построение карт для заданных периода времени и вероятности превышения высоты волны, в этом случае повторяемость рассчитывается по формуле (1).

Приложение построено на основе СУБД PostgreSQL с расширением для работы с пространственными данными PostGIS. Отображение картосхем и графиков производится веб-браузером с помощью библиотек Leaflet и Plotly. Веб-сервер и дополнительные утилиты для загрузки данных моделирования в СУБД написаны на языке Go.

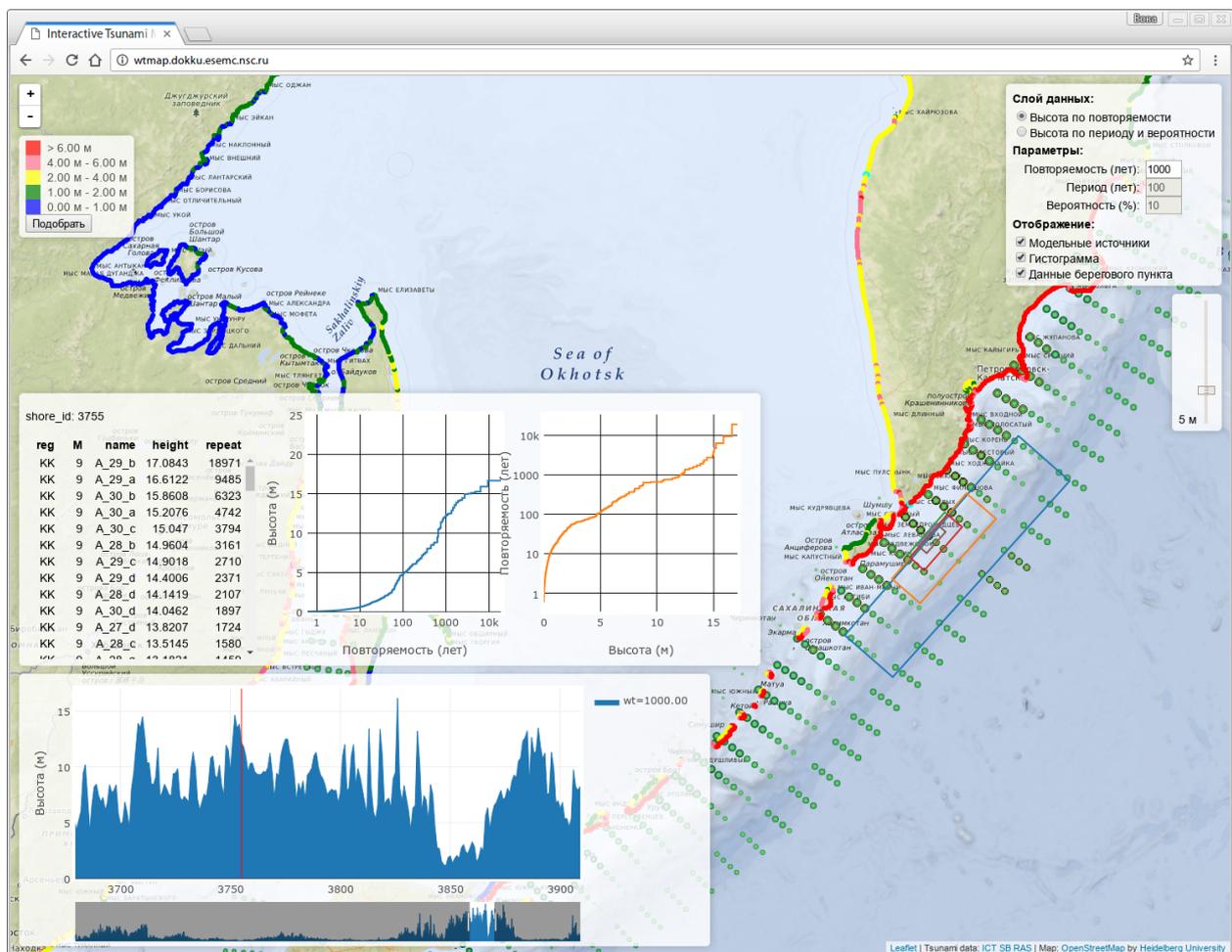


Рис. 2. Рабочий экран веб-приложения WTMap

В основном окне главного рабочего экрана WTMap (рис. 2) представлена карта исследуемого региона с нанесенными на нее эпицентрами модельных очагов землетрясений. Цвет точек береговой линии соответствует оценкам высот волн с заданной средней повторяемостью превышения (здесь — 1 раз в 1000 лет). Цветовая шкала приведена в левом верхнем углу окна. При выборе щелчком мыши конкретной береговой точки на карте высвечиваются все очаги, породившие в этой точке высоты, большие, чем высота, заданная слайдером в правой части окна (в показанном на рис. 2 примере это значение равно 5 м). Высоты цунами, рассчитанные в этой точке от всех модельных очагов, отсортированные по убыванию, приводятся в таблице, размещенной в левой части экрана. Там же отображаются кривые повторяемости — зависимости ожидаемой высоты от повторяемости (слева) и обратной к ней (справа).

В левом нижнем окне показано распределение оценок высот для выбранной береговой точки и ее окрестности. Здесь могут отображаться одна или несколько гистограмм для разных повторяемостей по выбору пользователя. На самом нижнем графике представлено распределение расчетных высот на всем дальневосточном побережье, участок, выведенный на верхний график, выделен подсветкой. При выборе конкретного эпицентра на карте показываются проекции относящихся к нему площадок разрыва событий различных магнитуд. WTMap поддерживает интерактивное изменение параметров отображаемых карт и графиков с помощью панели в правом верхнем углу окна.

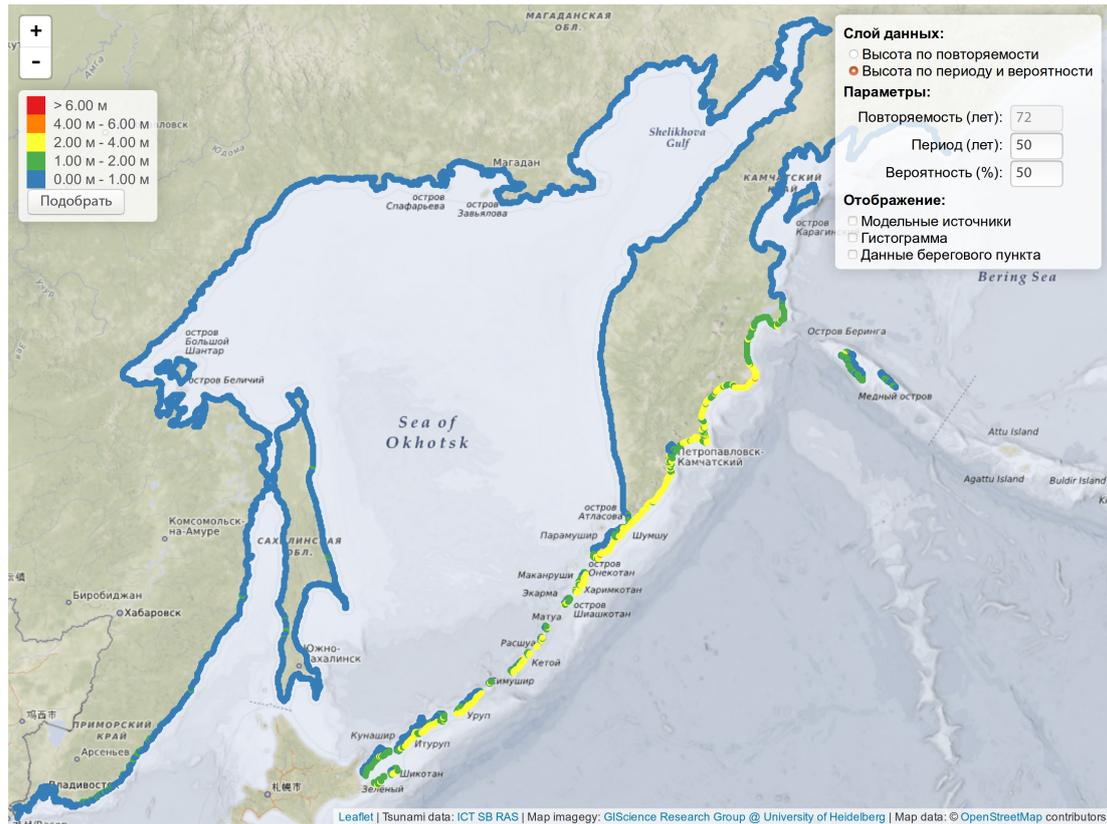
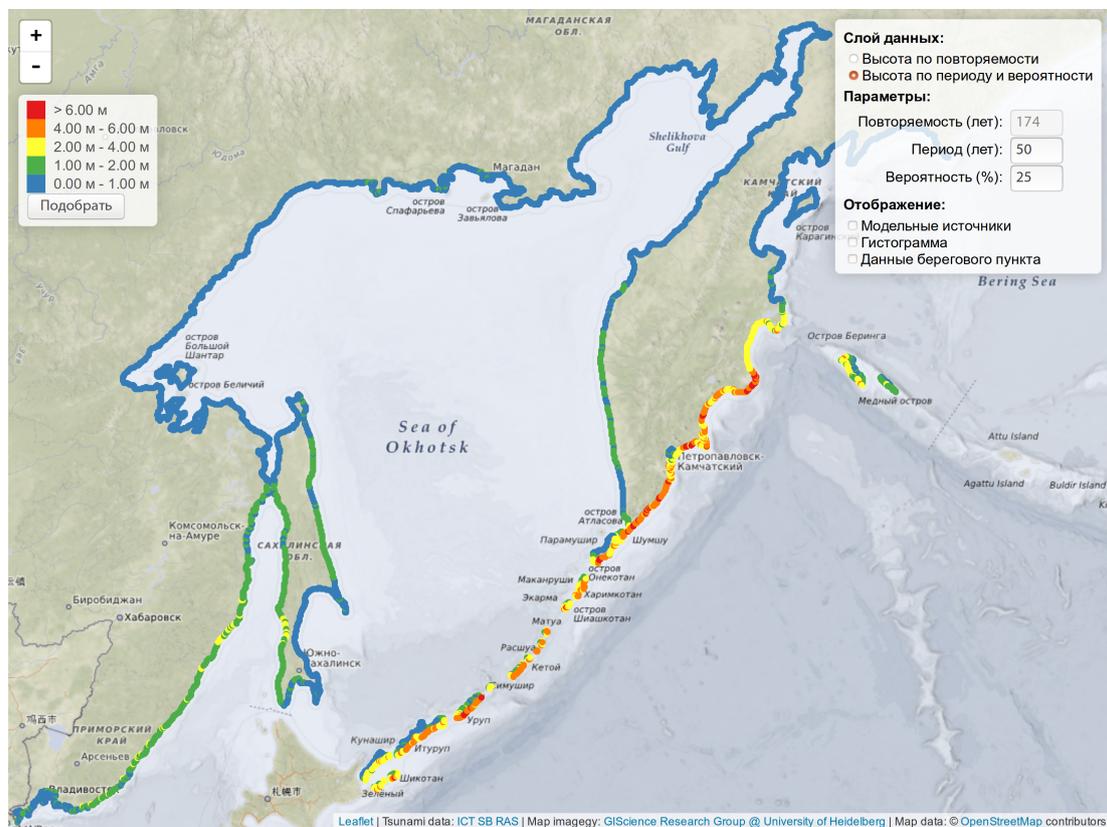
5. Обзорные карты цунамиопасности дальневосточного побережья России

На рис. 3–6 представлены построенные обзорные карты цунамиопасности дальневосточного побережья России. На них цветом изображены ожидаемые высоты волн с вероятностями превышения 50, 25, 10 и 5 % в течение 50 лет, что соответствует средней повторяемости 1 раз в 72, 174, 475 и 975 лет.

Эти карты показывают, что основную опасность представляют цунами, порожденные подводными землетрясениями, происходящими на континентальном склоне Курило-Камчатской субдукционной зоны. Они способны создавать волны высотой до 5–6 м на всем восточном побережье Курильских островов и Камчатки. Высоты волн от тех же землетрясений на западном побережье островной дуги значительно ниже и не превышают 1–2 м. На всем остальном побережье Охотского моря, за исключением части восточного побережья Сахалина и западного побережья Камчатки, ожидаемые высоты волн составляют менее 1 м. На побережье Приморья влияют в основном цунамигенные очаги в восточной части Японского моря, которые способны создавать высоты до 3–4 м на отдельных участках побережья. При анализе карты следует иметь в виду, что оценки на побережье Берингова моря получены без учета возникновения редких, но возможных (и известных по палеоданным) цунамигенных землетрясений на западном шельфе и континентальном склоне Берингова моря, вопрос о величине магнитуд и повторяемости которых требует отдельного изучения.

Заключение и выводы

Представлены результаты применения методики РТНА для создания обзорных карт цунамирайонирования побережья. Интерактивный доступ к исходным данным и резуль-

Рис. 3. Карта цунамиопасности: $P = 50\%$, $T = 50$ лет, повторяемость 1 раз в 72 годаРис. 4. Карта цунамиопасности: $P = 25\%$, $T = 50$ лет, повторяемость 1 раз в 174 года

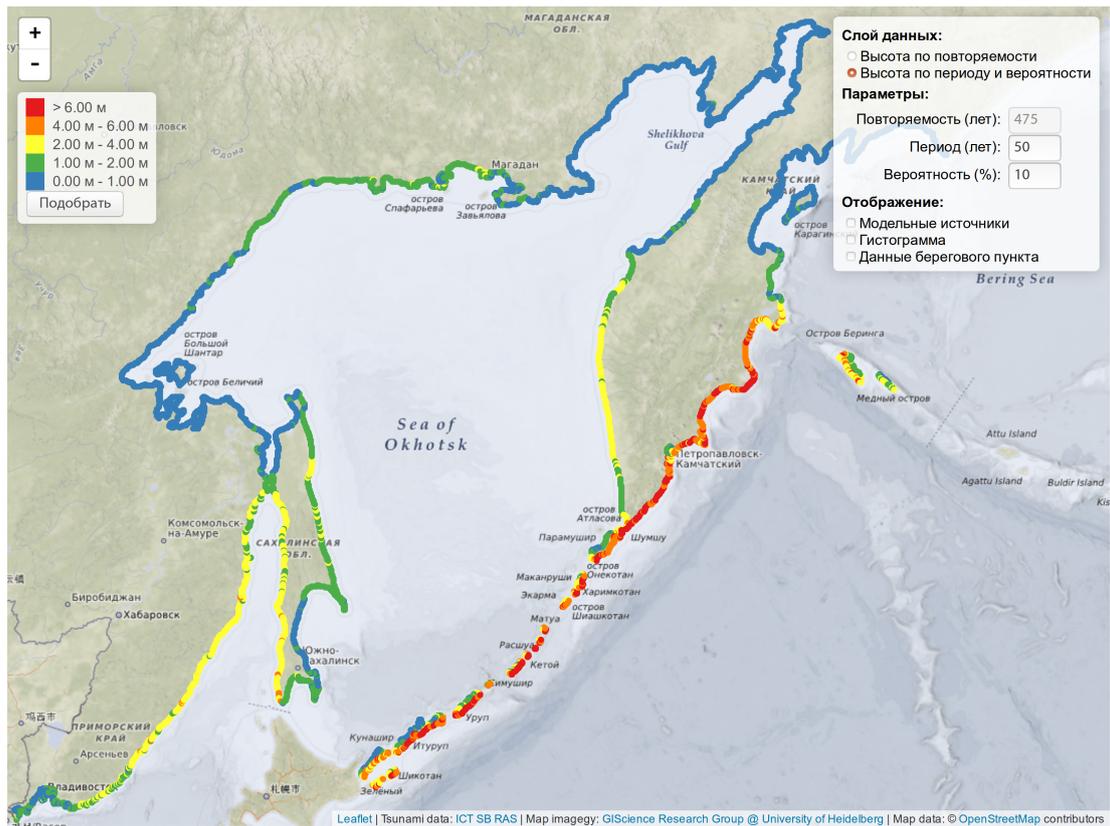


Рис. 5. Карта цунамиопасности: $P = 10\%$, $T = 50$ лет, повторяемость 1 раз в 475 лет

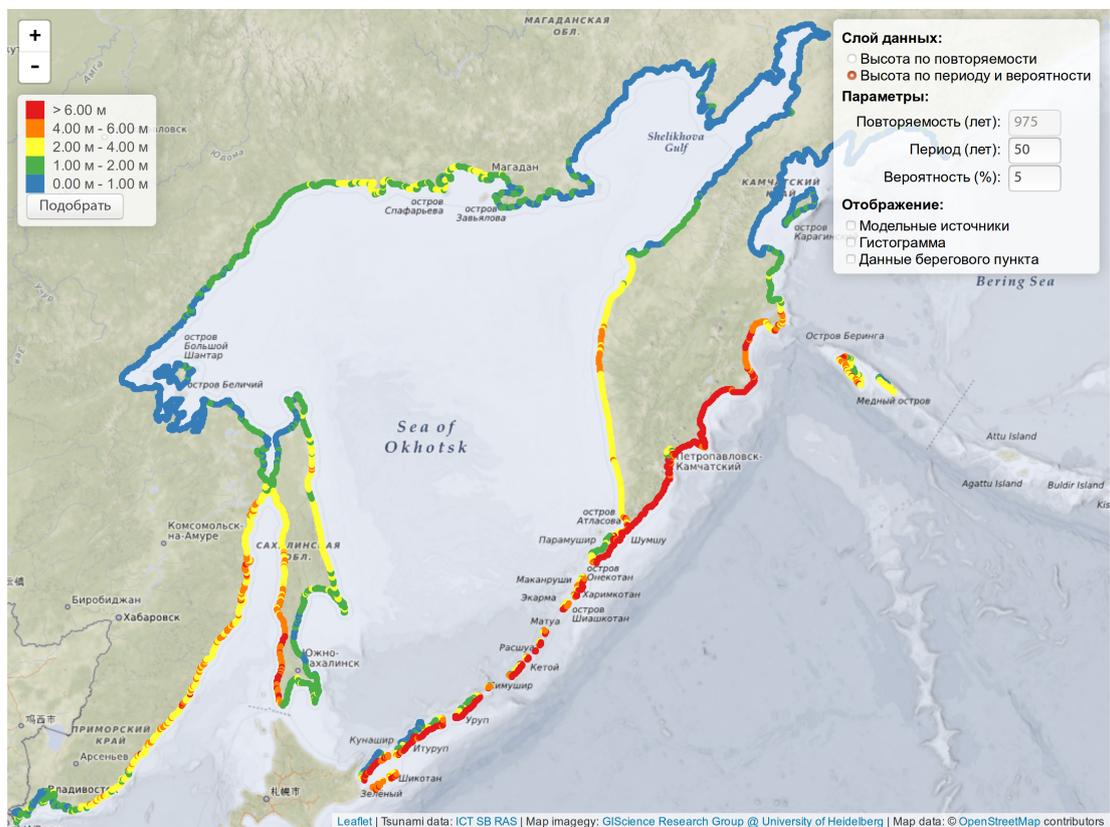


Рис. 6. Карта цунамиопасности: $P = 5\%$, $T = 50$ лет, повторяемость 1 раз в 975 лет

татам оценки цунамиопасности обеспечивается веб-приложением WTMap, которое визуализирует карты распределения ожидаемых высот волн и графики их повторяемости. Приведены и проанализированы примеры созданных с ее помощью обзорных карт цунамиопасности дальневосточного побережья РФ.

Основные выводы, вытекающие из такого анализа, приведены ниже.

1. Задача оценки долгосрочной цунамиопасности во многом аналогична задаче оценки сейсмоопасности. Последняя во всех странах решается сегодня на основе методики PSNA, положенной также в основу проекта создания карты общего сейсмического районирования территории России ОСР-2016. При выполнении этого проекта опасность цунами от подводных землетрясений, к сожалению, не принималась во внимание, хотя она является основной для Дальневосточного региона, где происходит около 90 % всех сильных землетрясений России. Однако результаты большой работы, выполненной в рамках проекта ОСР-2016, по уточнению каталогов исторических землетрясений, изучению строения их очагов, картированию зон возникновения землетрясений в цунамиопасных районах могут и должны быть использованы для оценки цунамиопасности дальневосточного и других побережий России.

2. Методика РТНА представляет собой эффективный и в достаточной мере обоснованный подход к решению задачи вероятностной оценки цунамиопасности побережья. На ее основе выполняется как обзорное цунамирайонирование побережья крупных регионов, так и рассчитываются детальные карты цунамиопасности для отдельных населенных пунктов, гаваней и портов. При всех имеющихся недостатках этой методики, как принципиальных, так и технических (критику вероятностных подходов к оценке сейсмической опасности см., например, в [25–34]), сегодня она является адекватным инженерным инструментом для создания карт цунамиопасности различных масштабов и после необходимой адаптации может и должна быть использована при картировании опасности цунами на побережьях России.

3. Изложенный в статье вариант методики РТНА реализован в виде веб-приложения WTMap, имеющего доступ ко всему объему наблюдательной информации, связанной с задачами цунамирайонирования побережья, и пакетам расчетных программ. Приложение позволяет в интерактивном режиме получать оценки ожидаемых высот цунами и их повторяемости и картировать их на конкретных участках дальневосточного побережья РФ. Полученные оценки могут быть быстро пересчитаны при замене наблюдательных каталогов на более полные и достоверные, при добавлении отсутствовавших ранее событий или пересмотре их параметров, а также результатов новых сценарных расчетов.

4. Основные проблемы применения разработанной методики вероятностного цунамирайонирования к конкретным участкам побережья связаны с построением сейсмотектонических моделей цунамигенных зон, угрожающих этому побережью, на основе неполной и не всегда достоверной информации о геологическом строении этих зон и их сейсмотектоническом режиме. Главная проблема здесь — недостаточная длина инструментальных и исторических каталогов, продолжительность которых часто не превышает одного основного сейсмического цикла в зонах субдукции (140 ± 50 лет). Определенные трудности представляет также получение цифровых моделей рельефов дна и суши, способных обеспечить необходимую точность результатов. Одним из способов преодоления трудностей, связанных с недостаточностью инструментальных и исторических данных, является использование результатов поиска и изучения следов палеоцунами. Такие работы на дальневосточном побережье РФ уже в течение почти тридцати лет [35, 36] должны быть выполнены и на других морских побережьях России.

5. Отдельной проблемой является уменьшение вычислительной трудоемкости больших серий сценарных расчетов, необходимых для получения оценок цунамиопасности на большие повторяемости (1000 лет и более). Это возможно за счет разработки математической технологии, снижающей число необходимых сценарных расчетов, в частности ускорения этих расчетов путем использования новых математических моделей и алгоритмов, современных аппаратных и программных средств.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 14-17-00219, проекта ФНИ № 0316-2018-0010, программы РАН № 27 (в части разработки средств информационной поддержки), проекта РФФИ № 16-05-00450 (в части поддержки баз данных наблюдений цунами).

Авторы выражают признательность С.А. Бейзель, выполнившей расчеты, результаты которых использовались при оценке цунамиопасности побережья.

Список литературы / References

- [1] Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации: Пояснительная записка к комплекту карт ОСР-2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах / Ред. В.И. Уломов, М.И. Богданов // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49–121.
General seismic zoning of the territory of the Russian Federation. Explanatory note to the set of maps of OSR-2016 and the list of settlements located in seismically active zones / Ed. V.I. Ulomov, M.I. Bogdanov // Engineering Survey. 2016. No. 7. P. 49–121. (In Russ.)
- [2] **Power, W., Downes, G.** Tsunami hazard assessment // Volcanic and Tectonic Hazard Assessment for Nuclear facilities / C. Connor, N. Chapman, L. Connor (Eds). Cambridge Univ. Press, 2009. P. 276–306.
- [3] **Knighton, J., Bastidas, L.** A proposed probabilistic seismic tsunami hazard analysis methodology // Nat. Hazards. 2015. Vol. 78. P. 699–723.
- [4] **Grezio, A., Babeyko, A., Baptista, M.A. et al.** Probabilistic tsunami hazard analysis: Multiple sources and global applications // Rev. of Geophysics. 2017. Vol. 55 P. 1158–1198.
- [5] **Гусяков В.К.** Цунами на Дальневосточном побережье России: историческая перспектива и современная проблематика // Геология и геофизика. 2016. № 9. С. 1601–1615.
Gusiakov, V.K. Tsunamis on the Russian Pacific Coast: History and Current Situation // Russ. Geology and Geophysics. 2016. No. 57. P. 1259–1268.
- [6] **Гусяков В.К., Кихтенко В.А., Чубаров Л.Б.** К вопросу о сравнительной значимости параметров очагов цунамигенных землетрясений // Шестая науч.-техн. конф. “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”: Петропавловск-Камчатский, 1–7 октября 2017 г.
Gusiakov, V.K., Kikhtenko, V.A., Chubarov, L.B. To the comparative significance of the parameters of tsunamigenic earthquake sources // The 6th Sci. Biennial Conf. “Problems of Complex Geophysical Monitoring of the Russian Far East”, October 1–7, 2017, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia. <http://emsd.ru/conf2017lib/pdf/tsunami/kihtenko.pdf> (In Russ.)
- [7] **Shokin, Yu.I., Babailov, V.V., Beisel, S.A. et al.** Mathematical modeling in application to regional tsunami warning systems operations / E. Krause, Yu.I. Shokin, M. Resch, N. Shokina (Eds) // Comput. Sci. and High Perform. Computing III: Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. Vol. 101. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. P. 52–68. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-540-69010-8_6
- [8] **MacCormack, R.W.** The effect of viscosity in hypervelocity impact cratering // 4th Aerodynamic Testing Conf. Available at: <https://arc.aiaa.org/doi/10.2514/6.1969-354>

- [9] **Okada, Y.** Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bull. of the Seismolog. Soc. of America. 1985. Vol. 75, No. 4. P. 1135–1154.
- [10] **Гусьяков В.К.** Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства // Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1978. С. 23–51.
Gusjakov, V.K. Static displacement of the surface of an elastic halfspace // Uslovno-correctnyye Zadachi Matematicheskoi Fiziki v Interpretatsii Geofizicheskikh Nablyudenyi. Novosibirsk: VTs SO AN SSSR, 1978. P. 23–51. (In Russ.)
- [11] **Wells, D.L., Coppersmith, K.J.** New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // Bull. of the Seismolog. Soc. of America. 1994. Vol. 84. P. 974–1002.
- [12] **Aki, K.** Earthquake mechanism // Tectonophysics. 1972. Vol. 13, No. 1-4. P. 423–446.
- [13] **Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г.** Тектоника литосферных плит и происхождение цунамигенных землетрясений // Докл. АН СССР. 1980. Т. 251, № 5. С. 1092–1095.
Lobkovsky, L.I., Sorokhtin, O.G. Lithospheric plate tectonics and generation of tsunamigenic earthquakes // Dokl. Akad. Nauk SSSR. 1980. Vol. 251, No. 5. P. 1092–1095. (In Russ.)
- [14] **Лобковский Л.И., Баранов Б.В.** К вопросу о возбуждении цунами в зонах поддвига литосферных плит // Процессы возбуждения и распространения цунами. М.: ИО АН СССР, 1982. С. 7–17.
Lobkovsky, L.I., Varanov, B.V. On the tsunami generation problem in the subduction zones of lithospheric plates // Processy Vozbuzhdenia i Rasprostranenia Tsunami. Moscow: IO AN SSSR. 1982. P. 7–17. (In Russ.)
- [15] **Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г.** Деформация литосферных плит в зонах поддвига // Океанология. Геофизика океана. Т. 2: Геодинамика. М.: Наука, 1979. С. 194–203.
Lobkovsky, L.I., Sorokhtin, O.G. Deformation of lithospheric plates in subduction zones // Okeanologiya. Geofizika Okeana. V. 2: Geodinamika. M.: Nauka, 1979. P. 194–203. (In Russ.)
- [16] **Minoura, K., Nakata, T.** Discovery of an ancient tsunami deposit in coastal sequences of southwest Japan: Verification of a large historic tsunami // Island Arc. 1994. Vol. 3, No. 1. P. 66–72.
- [17] HTDB/WLD (Historical tsunami database for the World Ocean), 2000 BC to Present, Tsunami Laboratory, ICMMG SB RAS, Novosibirsk, 2018. <http://tsun.sscc.ru/nh/tsunami.php>
- [18] The ISC-GEM Global instrumental earthquake catalogue (1904–2014), version 5.1 of June 15, 2018. <http://www.isc.ac.uk/iscgem/>
- [19] New catalog of strong earthquakes in the USSR from ancient times through 1977 / N.V. Kondorskaya, N.V. Shebalin. (Eds). World Data Center A. Report SE-31. Boulder, USA, 1982. 608 p.
- [20] **Ким Ч.У., Андреева М.Ю.** Каталог землетрясений Курило-Камчатского региона (1737–2005 гг.). Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2009. 126 с.
Kim, Ch.U., Andreeva, M.Ju. Catalogue of the earthquakes in the Kuril-Kamchatka Region (1737–2005). Yuzhno-Sakhalinsk: IMGIG DVO RAN, 2009. 126 p. (In Russ.)
- [21] **Соловьев С.Л., Ферчев М.Д.** Сводка данных о цунами в СССР // Бюл. Совета по сейсмологии АН СССР. 1961. № 9. С. 23–55.
Soloviev, S.L., Ferchev, M.D. Data on tsunamis in the USSR // Bull. Council of Seismology AN SSSR. 1961. No. 9. P. 23–55. (In Russ.)
- [22] **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.
Soloviev, S.L. Basic data on tsunamis in the USSR Pacific coast, 1937–1976 // Izuchenie Tsunami v Otkrytom Okeane. Moscow: Nauka, 1978. P. 61–136. (In Russ.)

- [23] **Заякин Ю.А.** Цунами на Дальнем Востоке России. Петропавловск-Камчатский: Камшат, 1996. 88 с.
Zayakin, Yu.A. Tsunami in the Far East of Russia. Petropavlovsk-Kamchatsky: Kamshat, 1996. 88 p. (In Russ.)
- [24] Программа для ЭВМ: Интегрированная информационная система конструирования обзорных карт цунамирайонирования побережий с использованием исторических и расчетных данных / В.А. Кихтенко, В.К. Гусяков, Л.Б. Чубаров. Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2017618398. 2017 г. Адрес доступа: <https://wtmap.dokku.esemc.nsc.ru/>
Computer Program: Integrated information system for designing overview maps of coastal tsunami zoning using historical and computed data / V.A. Kikhtenko, V.K. Gusiakov, L.B. Chubarov. Svidetel'stvo o Gos. Registratsii Programmy dlya EVM No. 2017618398. 2017. Available at: <https://wtmap.dokku.esemc.nsc.ru/> (In Russ.)
- [25] **Castañõs, H., Lomnitz, C.** PSHA: Is it science? // Eng. Geology. 2002. Vol. 66, No. 3-4. P. 315–317.
- [26] **Klügel, J.U.** Problems in the application of the SSHAC probability method for assessing earthquake hazards at Swiss nuclear power plants // Eng. Geology. 2005. Vol. 78, No. 3-4. P. 285–307.
- [27] **Klügel, J.U.** Error inflation in probabilistic seismic hazard analysis // Eng. Geology. 2007. Vol. 90, No. 3-4. P. 186–192.
- [28] **Klügel, J.U.** Seismic hazard analysis — Quo vadis? // Earth-Science Rev. 2008. Vol. 88, No. 1–2. P. 1–32.
- [29] **Мак, S., Clements, R.A., Schorlemmer, D.** The statistical power of testing probabilistic seismic-hazard assessments // Seismolog. Res. Lett. 2014. Vol. 85, No. 4. P. 781–783.
- [30] **Stein, S., Geller, R.J., Liu, M.** Why earthquake hazard maps often fail and what to do about it // Tectonophysics. 2012. Vol. 562. P. 1–25.
- [31] **Mulargia, F., Stark, P.B., Geller, R.J.** Why is probabilistic seismic hazard analysis (PSHA) still used? // Phys. of the Earth and Planetary Interiors. 2017. Vol. 264. P. 63–75.
- [32] **Kossobokov, V.G., Nekrasova, A.K.** Global seismic hazard assessment program maps are erroneous // Seismic Instruments. 2012. Vol. 48, No. 2. P. 162–170.
- [33] **Wyss, M., Nekrasova, A., Kossobokov, V.** Errors in expected human losses due to incorrect seismic hazard estimates // Nat. Hazards. 2012. Vol. 62, No. 3. P. 927–935.
- [34] **Kossobokov, V.G., Keilis-Borok, V.I., Turcotte, D.L., Malamud, B.D.** Implications of a statistical physics approach for earthquake hazard assessment and forecasting // Microscopic and Macroscopic Simulation: Towards Predictive Modelling of the Earthquake Process. Birkhäuser, Basel, 2000. P. 2323–2349.
- [35] **Пинегина Т.К., Разжигаева Н.Г.** Исследования палеоцунами на дальневосточном побережье России // Мировой океан. Т. I: Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане. М.: Научный мир, 2013. С. 488–498.
Pinagina, T.K., Razzhigaeva, N.G. Study of paleotsunami on the Far East coast of Russia // Mirovoy Okean. T. I. Geologiya i Tektonika Okeana. Katastroficheskie Yavleniya v Okeane. Moscow: Nauch. Mir, 2013. P. 488–498. (In Russ.)
- [36] **Разжигаева Н.Г., Ганзей Л.А., Гребенникова Т.А. и др.** Проблема палеореконовструкций мегацунами на Южных Курилах // Тихоок. геология. 2017. Т. 36, №. 1. С. 37–49.
Razzhigaeva, N.G., Ganzey, L.A., Grebennikova, T.A. et al. The problem of paleoreconstructions of megatsunamis on the Southern Kurils // Russ. J. of Pacific Geology. 2017. Vol. 11, iss 1. P. 34–45.

Regional tsunami hazard maps for the Far East coast of the Russian Federation built in the framework of the PTHA methodology

GUSYAKOV, VYACHESLAV K.¹, KIKHTENKO, VLADIMIR A.²,
CHUBAROV, LEONID B.^{2,*}, SHOKIN, YURIY I.²

¹Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, 630090, Russia

²Institute of Computational Technologies SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia

*Corresponding author: Chubarov, Leonid B., e-mail: chubarov@ict.nsc.ru

The article describes the results of the implementation of the PTHA (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment) methodology for creating the overview maps of tsunami hazard for the Far East coast of the Russian Federation. Such maps show the characteristics of the catastrophic impact of tsunami waves on the coast and the probability of their exceeding in a given period of time. The methodological basis of the PTHA approach to the assessment of tsunami hazard, the problems of constructing seismotectonic models of the main tsunamigenic zones, mathematical models and algorithms for calculating probability estimates of tsunami danger are discussed.

The version of the PTHA methodology outlined in the article is implemented as a “WTmap” Web-application that has an access to the entire observational information related to coastal tsunami zoning and software packages used. The application allows to obtain the estimates of the expected tsunami heights and their recurrence estimates and to map them on specific parts of the Far Eastern coast of the Russian Federation. The obtained estimates can be quickly recalculated when replacing the observational catalogs with more complete and reliable ones, with the addition of new, previously absent events or the revision of their parameters, as well as the results of new scenario calculations.

Examples of overview maps for various recurrence intervals, constructed using the PTHA methodology and presented using the “WTMap” application, are given. Some problems of using the PTHA methodology related to the lack of available observational data and to the complexity of performing a large amount of scenario simulations are also discussed.

Keywords: tsunami hazard, tsunami zoning, tsunamigenic zones, seismotectonic models, recurrence, probabilistic assessments, PTHA, Monte Carlo method, scenario modeling.

Cite: Gusiakov, V.K., Kikhtenko, V.A., Chubarov, L.B., Shokin, Yu.I. Regional tsunami hazard maps for the Far East coast of Russian Federation built in the framework of the PTHA methodology // Computational Technologies. 2019. Vol. 24, No. 1. P. 55–72. DOI: 10.25743/ICT.2019.24.1.005. (In Russ.)

Acknowledgements. The work was supported by the RSF (project No. 14-17-00219), Basic Research Program (project No. 316-2018-0010), RAS programs No. 27 (for developing information support tools), RFBR (Project No. 16-05-00450, for tsunami database support). The authors are grateful to S.A. Beisel for performing the calculations, the results of which were used in assessing tsunami hazard.

Received 12 December 2018