

КРАТКАЯ АННОТАЦИЯ

В 2014-2016 гг. в Институте вычислительных технологий СО РАН выполнялся проект «Оценка цунамиопасности побережья Курило-Камчатского региона, Японского, Охотского и Черного морей», получивший поддержку Российского научного фонда (грант № 14-17-00219). В рамках проекта созданы методика, алгоритмы, программы и средства информационной поддержки построения карт цунамиопасности побережья. Эти карты показывают вдольбереговое распределение высот цунами, которые могут быть превышены с заданной вероятностью (например, 10%) в течение заданных периодов времени (например, 100 лет). Подобные карты построены в РФ впервые. Они дают возможность количественного сравнения цунамиопасности, оцененной по единой методике, на всем протяжении Дальневосточного побережья РФ и на российских участках побережья Черного моря.

Основным и главным результатом проекта являются вероятностные карты цунамиопасности Дальневосточного и Черноморского побережий РФ. Они были построены с использованием методики прямого сценарного моделирования, когда каждая расчетная высота от конкретного модельного очага входит в оценку цунамиопасности со своей повторяемостью, соответствующей повторяемости цунамигенных землетрясений конкретной магнитуды в конкретной условно-однородной зоне. В свою очередь, эта величина получается по результатам анализа инструментального сейсмического каталога для рассматриваемой зоны, который, в случае недостатка инструментальных данных, аппроксимировался в область больших магнитуд путем интерполяции и учета данных исторической (доинструментальной) сейсмичности, а также сеймотектонических особенностей региона.

По результатам проекта опубликовано более 20 научных статей в авторитетных международных и отечественных научных журналах, таких как *Science of Tsunami Hazards*, *Pure and Applied Geophysics*, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, *Russian Geology and Geophysics*, *Journal of Volcanology and Seismology*, *Doklady Physics* и других. Кроме того, за время выполнения проекта сделано более 15 докладов с представлением результатов на международных и национальных конгрессах и конференциях: VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, International Workshop on «Mega Earthquakes and Tsunamis in Subduction Zones: Forecasting Approaches and Implications for Hazard Assessment», GRC Symposium «Improving Geophysical Risk Assessment, Forecasting and Management», AGU Fall Meeting: Session 3695: «Decade of Mega Tsunamis: Science and Tsunami Warning Systems after the 2004 Sumatra event», Международная Конференция «Современные информационные технологии для фундаментальных научных исследований в области наук о Земле» и другие.

РАЗВЕРНУТАЯ АННОТАЦИЯ

В рамках проекта РНФ № 14-17-00219 «Оценка цунамиопасности побережья Курило-Камчатского региона, Японского, Охотского и Черного морей» созданы методика, алгоритмы, программы и средства информационной поддержки построения карт цунамиопасности побережья. Эти карты показывают вдольбереговое распределение высот цунами, которые могут быть превышены с заданной вероятностью (например, 10%) в течение заданных периодов времени (например, 100 лет). Подобные карты построены в РФ впервые. Они дают возможность количественного сравнения цунамиопасности, оцененной по единой методике, на всем протяжении Дальневосточного побережья РФ и на российских участках побережья Черного моря.

1. Для создания карт цунамиопасности, т.е. вероятности превышения волной некоей пороговой высоты в заданный период времени, дискретные последовательности землетрясений и цунами рассматриваются как стационарные пуассоновские потоки. Несмотря на разнообразие факторов, влияющих на исследуемые процессы, такая модель является вполне адекватной для описания сейсмического явления, порождаемого всем многообразием реальных геологических и сейсмотектонических условий, часть из которых может быть плохо известной, либо неизвестной совсем.

Сейсмичность региона рассматривается как совокупность пуассоновских процессов, частоты которых зависят от параметров землетрясений. Для вычисления искомой повторяемости потока событий цунами использован подход, который можно назвать методом прямых сценарных расчетов. Он предполагает фиксацию совокупности наборов параметров модельных землетрясений, которая должна достаточно плотно покрывать все пространство возможных значений параметров землетрясений.

Для оценки повторяемостей каждого модельного источника вся совокупность наборов была разбита на *классы*, по магнитудам и областям пространства (условно-однородным цунамигенным зонам). Далее, по инструментальному каталогу землетрясений оценивалась повторяемость каждого класса в целом, т.е. выделялись исторические события, соответствующие каждому классу, и вычислялась их повторяемость. Затем полученная величина равномерно распределялась по всем модельным землетрясениям этого класса. Часто такой метод не дает возможности оценить повторяемость для землетрясений большой магнитуды (большей, чем зафиксирована в инструментальном каталоге, но тем не менее возможной для рассматриваемой зоны по историческим данным, либо на основе сейсмотектонического анализа). При этом использовалась оценка повторяемости на основе экстраполяции закона Гутенберга-Рихтера в область больших значений магнитуды с поправкой на усеченность инструментального каталога.

В ходе выполнения проекта создана уникальная, не имеющая аналогов в России и за рубежом информационно-экспертная система Wtmap, позволяющая пользователю получить доступ ко всему объему информации, имеющей отношение к задаче цунамирайонирования побережья, и в интерактивном режиме получить оценки ожидаемых высот цунами и их повторяемостей для любой точки побережья РФ из предварительно заданных районов (сейчас это Курило-Камчатская зона, Охотское море, Японское море, Черное море).

Система построена 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. Таким образом, система не требует установки специализированного ПО на машине пользователя. Веб-сервер и дополнительные утилиты для загрузки данных моделирования в СУБД написаны на языке Go.

В основном окне главного рабочего экрана системы Wtmap (Рис. 1) показывается карта региона с нанесенными на нее эпицентрами модельных очагов землетрясений. При наведении курсора на любой эпицентр показываются проекции относящихся к нему площадок разрыва в модельных очагах различной магнитуды. Вдоль береговой линии подсвечиваются в соответствии

с выбранной цветовой шкалой (легенда шкалы в левом верхнем углу) точки созданной системы наблюдений, покрывающей все Дальневосточное побережье, в которых рассчитываются значения ожидаемых высот цунами на заданный (в правом верхнем окне) интервал повторяемости (здесь – 1000 лет). При наведении курсора на конкретную береговую точку (здесь – точка № 3755 на южной оконечности п-ва Камчатка) на карте подсвечиваются все очаги, давшие в этой точке высоты большие, чем высота, заданная слайдером в правой части экрана (здесь – 5 м). Все расчетные высоты в этой точке, отсортированные по убыванию, приведены в таблице второго рабочего окна (в левой части экрана). Здесь максимальную расчетную высоту 17,08 м дает модельный источник A_29_b магнитуды $M_w = 9,0$, расположенный в непосредственной окрестности этой береговой точки. Завершается список очагами магнитуды $M_w = 7,2$, расположенными в самой северной части Японского моря (в районе Татарского пролива), дающими хотя и ничтожно малые (порядка 0,01 см), тем не менее, вычисляемые высоты цунами в точке № 3755 (на юге п-ва Камчатка).

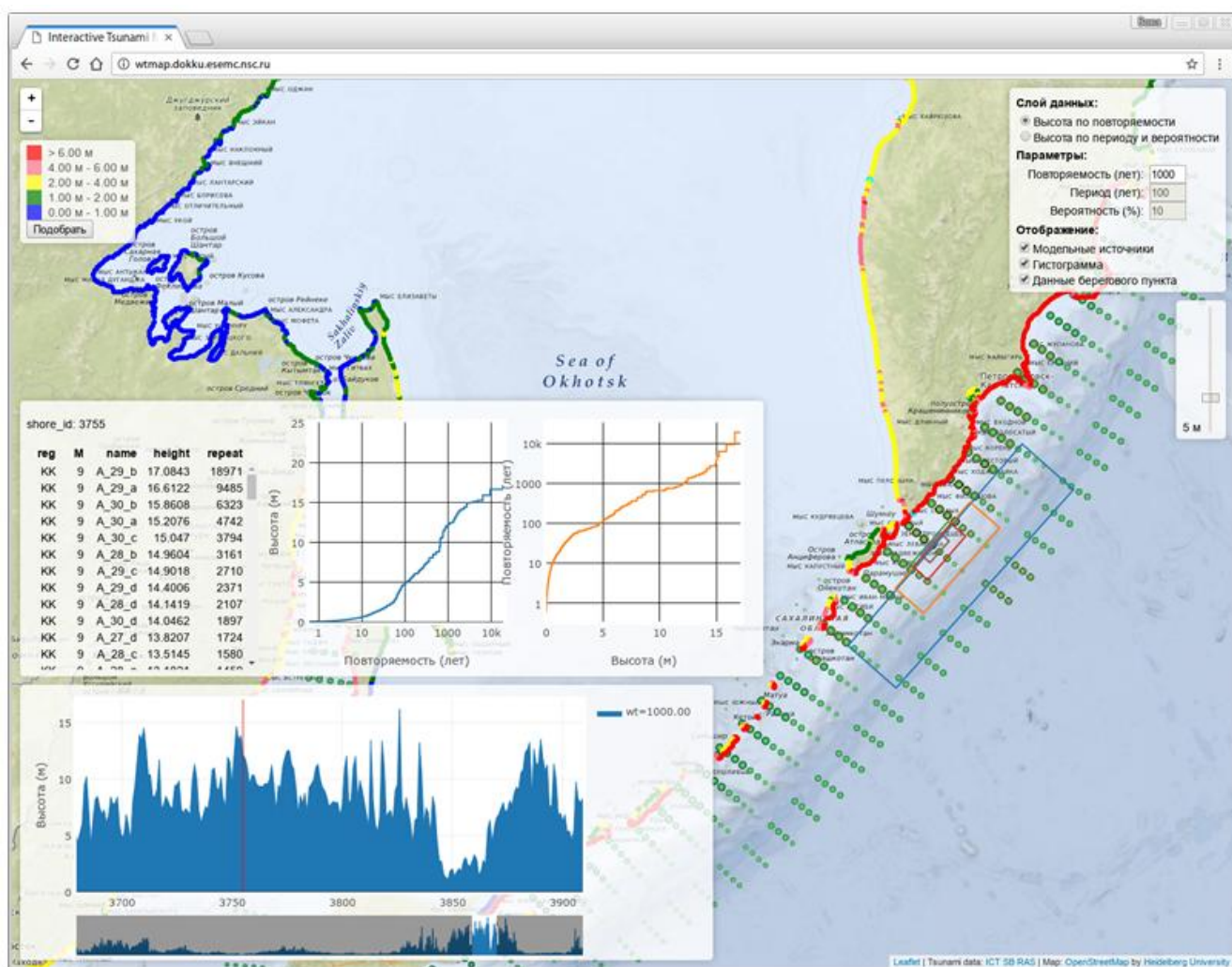


Рис. 1. Рабочий экран интерактивной информационно-экспертной системы WTmap для получения карт цунамиопасности побережья.

На графиках в правой верхней части второго рабочего окна показываются зависимость ожидаемой высоты в выбранной береговой точке от повторяемости (слева) и обратный к нему график зависимости повторяемости от заданной высоты (справа). Графики в нижней части этого рабочего окна носят вспомогательный характер и показывают ожидаемую (для заданного интервала повторяемости) высоту в выбранной береговой точке и ее соотношение с высотами в

других точках на рассматриваемом участке побережья. На самом нижнем графике показывается распределение расчетных высот на всем Дальневосточном побережье, при этом выведенный на верхний график участок выделяется подсветкой.

Таким образом, на одном рабочем экране системы WTmap пользователь-эксперт может получить всю необходимую информацию как для исследования цунамиопасности в конкретной береговой точке, так и для ее картирования на заданном участке побережья. При этом результаты оценки могут быть достаточно быстро пересчитаны при замене, например, регионального сейсмического каталога (на основе которого оценивается повторяемость землетрясений той или иной магнитуды) на более полный или более достоверный, либо при добавлении в каталог нового, отсутствовавшего в нем ранее, сильного события. Именно такой подход к задаче оценки цунамиопасности представляется исполнителям проекта наиболее правильным и перспективным для получения карт, пригодных для решения практических задач планирования и строительства в цунамиопасных районах.

Одним из важных преимуществ разработанной информационно-экспертной системы является ее масштабируемость – система WTmap может одинаково успешно использоваться на глобальном, региональном и локальном уровнях. Для этого нужно загрузить в нее соответствующие сейсмологические каталоги, сеймотектонические модели цунамигенных зон и результаты сценарных расчетов распространения цунами. Примером использования системы на локальном уровне является карта цунамиопасности Южных Курильских островов (Рис. 2). При дальнейшем развитии системы она может быть достаточно быстро адаптирована для решения задач микро-цунамирайонирования отдельных береговых пунктов, портов и гаваней, т.е. оценок заплеска волн и построения карт заливания берега – того конечного продукта, который требуется изыскателям и строителям. Для этого в нее должны быть добавлены блок управления результатами моделирования выхода цунами на берег и загружены результаты соответствующих модельных расчетов.

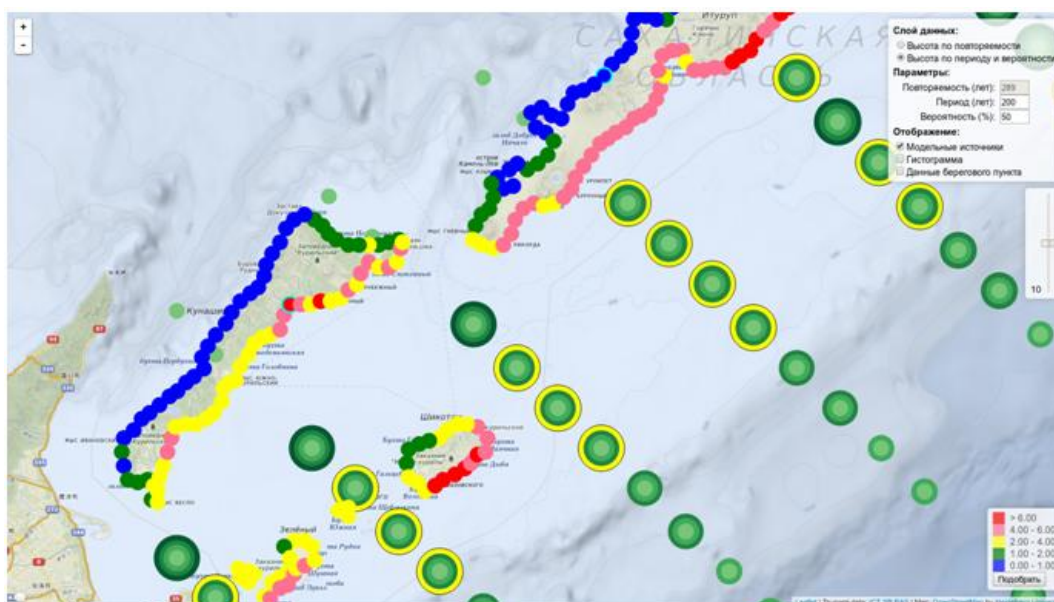


Рис. 2. Карта цунамиопасности Южных Курильских островов: цветом показаны расчетные высоты с вероятностью превышения 50% за период в 200 лет (эквивалентная частота повторяемости 1/289 в год); желтым подсвечены модельные очаги, породившие расчетные высоты, превышающие 10 м в заданной береговой точке № 3526 (44,25N,146,1E, выделена голубым) на восточном побережье Кунашира. Ожидаемая (с обозначенной выше вероятностью) высота в этой береговой точке составляет 6,4 м.

2. Анализ полного исторического каталога цунами на Дальневосточном побережье РФ, содержащего около 110 событий за период с 1737 года по настоящее время [1], показывает, что основную угрозу этому побережью несут две главных цунамигенных зоны – Курило-

Камчатская и зона в восточной части Японского моря.

В **Курило-Камчатской** зоне (Рис. 3) происходит 90% всех цунамигенных землетрясений, угрожающих российскому побережью, в том числе все сильнейшие землетрясения с магнитудой 8.5–9.0. Здесь очаги цунамигенных землетрясений располагаются в широкой полосе, протягивающейся между краем шельфа островной дуги и восточным побережьем Камчатки и осью глубоководной впадины.

Рассматриваемая зона – зона **А** – аппроксимировалась системой модельных очагов с магнитудами M_w в диапазоне от 7,2 до 9,0 и подвижками, ориентированными вкост простирания субдукционной зоны (угол $\lambda = 90^\circ$). Глубины заложения этих очагов закономерно возрастают от 10 – 20 км вблизи глубоководной впадины до 50 – 60 км вблизи 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 $35^\circ - 40^\circ$ на юго-западе, при этом, как показывает анализ исторических данных и результаты моделирования, ее цунамигенный потенциал резко падает.

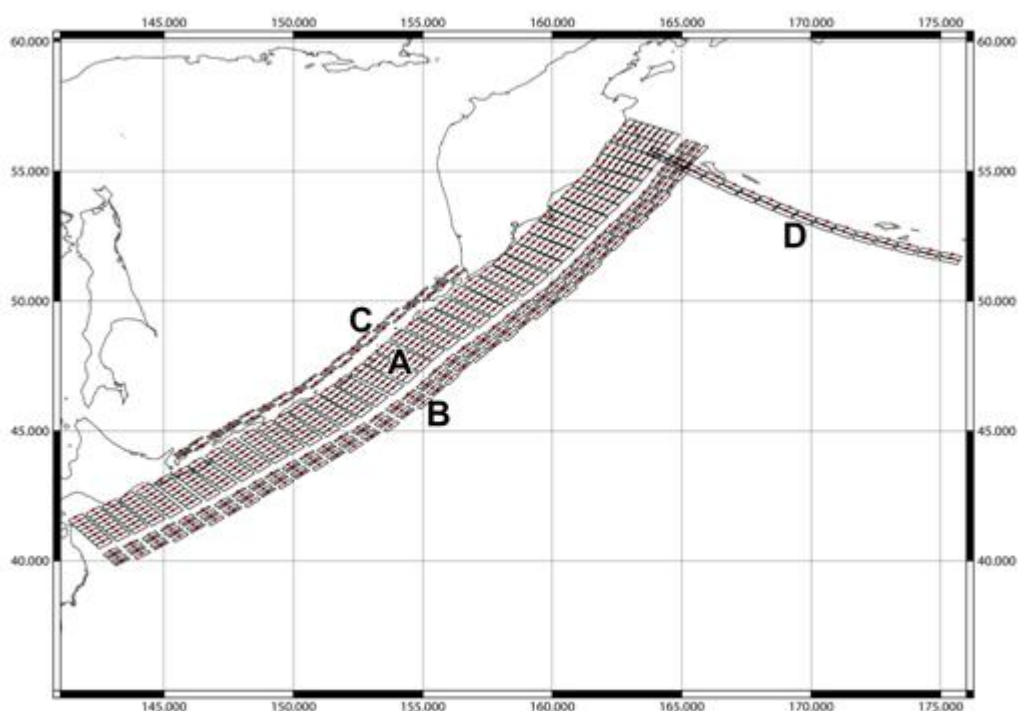


Рис. 3. Положение проекций площадок модельных очагов землетрясений магнитуды $M_w = 7,2$ в цунамигенных зонах А, А1, В, С и D, угрожающих Курило-Камчатскому побережью.

С зоной **А** связаны очаги большинства цунамигенных землетрясений Курило-Камчатской зоны. Однако, в рамках той же субдукционной модели в ней оказывается возможным и другой тип механизмов. Расчетные данные и физическое моделирование [2] показывают, что островодужный склон континентальной литосферы под действием напряжений, возникающих на его подошве в процессе подвига океанической плиты, должен деформироваться и разрушаться с образованием разрывов, круто падающих под океан, по которым должны происходить подвижки взбросового типа. Для учета вклада таких очагов в цунамиопасность побережья была построена дополнительная система модельных очагов **А1**, состоящая из взбросовых (угол $\lambda = -90^\circ$) подвижек по крутопадающим в сторону океана плоскостям разрывов (угол $\delta = 45^\circ - 135^\circ$). Поскольку эти очаги должны целиком располагаться в пределах островодужного клина, их магнитуды были ограничены величиной $M_w=7,8$, а вертикальная протяженность разрывов – величиной порядка 40 км.

При использовании систем модельных очагов **A** и **A1** предполагается, что потенциальные цунамигенные землетрясения с магнитудами вплоть до 7,8 в этих зонах могут возникать во всем объеме под Курило-Камчатским шельфом и континентальным склоном на глубинах от 10 до 60 км. Очаги же сильнейших землетрясений с магнитудами в диапазоне 8,0 – 9,0 располагаются вдоль главной литосферной границы раздела, по которой происходит процесс субдукции океанической коры под континентальную.

Другая область, в которой также возможно возникновение цунамигенных землетрясений, угрожающих Курило-Камчатскому побережью, находится в области внешнего океанического вала, связанной с изгибом Тихоокеанской плиты перед ее погружением в зону субдукции (зона **B**). Хотя уровень сейсмической активности 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. Сильнейшее из инструментально зарегистрированных землетрясений в области океанического вала, имевшее магнитуду $M_w = 8,1$, произошло 13 января 2007 года и породило цунами с высотами 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 достаточно 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 $\delta = 50^\circ - 70^\circ$ и магнитудами M_w 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 10 мелкофокусных (с глубинами 20 – 40 км) землетрясений с магнитудой больше 6,0. Сильнейшее из них произошло 7 мая 1962 года 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 дополнительно к зонам **A** и **B** была рассмотрена зона **C** в виде двойной цепочки очагов с магнитудой $M_w = 7,2$, протягивающихся параллельно Курильской островной дуге в ее задуговой части. Для них принимался взбросовый механизм подвижки по разнориентированным плоскостям разрыва, с падением как под океан, так и под Охотское море (углы падения 110°).

Простирание всех модельных очагов в зонах **A**, **B** и **C** в целом соответствует простиранию островной дуги у восточного побережья Камчатки.

Помимо рассмотренных выше зон возникновения цунамигенных землетрясений для Курило-Камчатского побережья, по крайней мере его северо-восточной части, представляют также опасность землетрясения западной части Алеутской зоны субдукции. Они аппроксимировались двойной цепочкой модельных очагов с механизмами в виде косоугольного ($\lambda=170^\circ$) поддвига по главной литосферной границе раздела, пологого ($\delta = 10^\circ$) падающей в этой области под Берингово море (зона **D**). Непосредственно в этой зоне за время инструментальных наблюдений 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** был рассмотрен полный набор магнитуд $M_w = 7,2 - 9,0$. Некоторые исследователи (см., например, [3]) полагают, что этот участок Алеутской дуги является долговременной сейсмической брешью, период молчания которой близок к предельному периоду повторяемости сильнейших субдукционных землетрясений, где в близком будущем вероятно возникновение сильного (вплоть до магнитуды 9,0) цунамигенного землетрясения. В этом случае включение этой зоны в рассмотрение приобретает особое значение для оценки цунамиопасности, например, восточного побережья Камчатки.

В Японском море основная цунамигенная зона (зона **F**) протягивается вдоль западного побережья Японской островной дуги от Цусимского пролива до юго-западной оконечности острова Сахалин. Возникающие здесь цунамигенные землетрясения имеют магнитуду 7,4 – 7,9, однако, в силу особенностей механизмов очагов (крутопадающие плоскости разрывов, малая глубина), они способны вызывать опасные цунами с высотами до 20 – 30 м на ближайшем (японском) побережье и до 6 – 8 м на российском побережье (в Приморье). Япономорская цунамигенная зона аппроксимировалась системой модельных очагов с магнитудой $M_w = 7,2$ (Рис. 4). Она состоит из пяти параллельных цепочек, протягивающихся вдоль западного побережья Хонсю, Хоккайдо и Сахалина, реализующих взбросовые подвижки по субвертикальным плоскостям разрыва. Углы падения этих плоскостей были приняты равными 70° (цепочка а), 80° (b), 90° (c), 100° (d), 110° (e). На основе этих очагов строилась также система модельных очагов с магнитудами 7,5, 7,8 и 8,4. Значение 8,4 принято в качестве предельно возможной магнитуды цунамигенных землетрясений Японского моря, на основе анализа макросейсмических последствий разрушительного землетрясения Манджу 1026 года [4], происшедшего в южной оконечности рассматриваемой зоны.

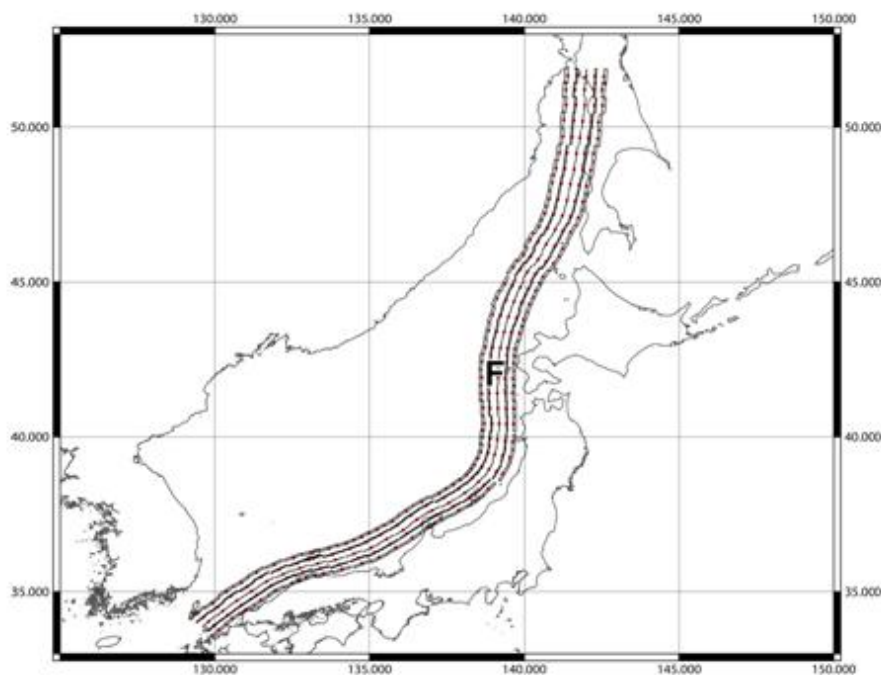


Рис. 4. Положение проекций площадок модельных очагов землетрясений магнитуды $M_w = 7,2$, аппроксимирующих цунамигенную зону в восточной части Японского моря.

При построении системы модельных очагов для оценки цунамиопасности для побережья **Черного моря** было принято, что возникновение цунамигенных землетрясений с магнитудами в диапазоне 7-8 возможно вдоль всего побережья этой акватории. Недостаточное число определений механизмов очагов (в глобальном масштабе такие определения ведутся с 1976 г.) не дает возможности выявить преобладающий тип механизмов и, тем более, проследить его вариации по различным сейсмогенным зонам. Поэтому в качестве механизмов очагов модельных землетрясений был принят наиболее опасный с точки зрения возбуждения цунами – взбросо-сбросовые ($\lambda = \pm 90^\circ$) подвижки по вертикальным плоскостям разрыва ($\delta = 90^\circ$). Построенная система модельных очагов землетрясений магнитуды $M_w = 7,2$, состояла из трех цепочек по 48 очагов в каждой, протягивающихся по всему шельфовому обрамлению черноморской котловины (Рис. 5).

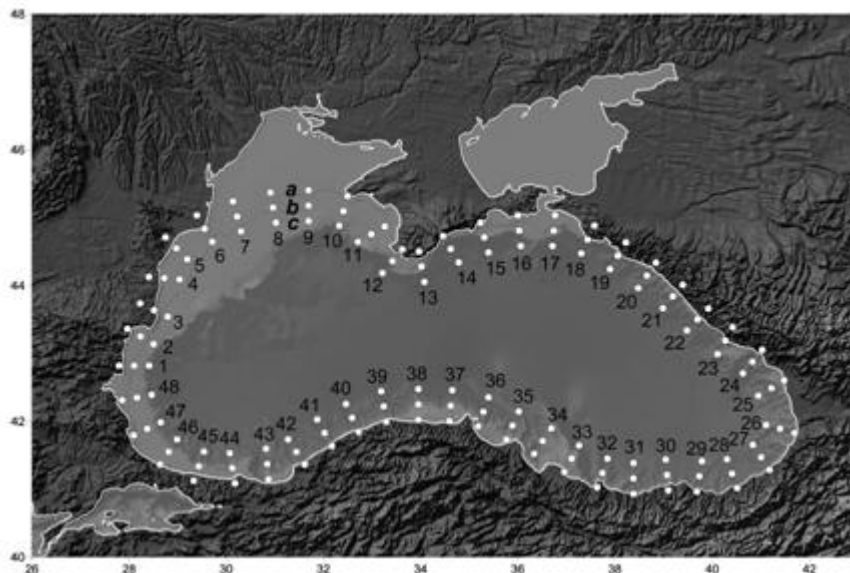


Рис. 5. Положение эпицентров модельных очагов землетрясений магнитуды $M_w = 7,2$, аппроксимирующих цунамигенные зоны Черного моря. Точки соответствуют положению центра нижнего края площадок разрыва в модельных очагах.

3. Построенная система модельных очагов, аппроксимирующих основные цунамигенные зоны Дальнего Востока и Черного моря, использовалась для получения **расчетных** высот волн цунами вдоль российских участков побережья Дальнего Востока и Черного моря. Расчеты выполнялись с использованием программного комплекса MassGlobalCalc [5], реализующего алгоритмы модифицированного варианта конечно-разностной схемы Мак-Кормака, аппроксимирующей систему уравнений мелкой воды, записанных в сферической системе координат. Все расчеты проводились для 24 часов физического времени распространения волн.

Именно расчетная цунамиопасность в каждой точке береговой системы наблюдений представляется в виде интерактивной веб-карты, пример которой для всего Дальневосточного побережья РФ (Рис. 6) показывает высоты волн с ожидаемой вероятностью превышения 10% в течение интервала 100 лет (средний интервал повторяемости 949 лет). Общая длина районированного таким образом Дальневосточного побережья РФ составляет около 16400 км.

Эта карта показывает, 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 Охотоморском побережье, 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 повторяемостях которых требует отдельного изучения.

4. Результаты численного **моделирования** волн цунами вблизи Дальневосточного и Черноморского побережий РФ были использованы для построения обзорных карт цунамирайонирования. На Рис. 7 – Рис. 10 приведены итоговые результаты – четыре карты цунамиопасности Дальневосточного побережья РФ, построенные для вероятности превышения в

5, 10, 25 и 50 процентов в течение 50-летнего интервала времени, что соответствует повторяемостям в 975, 475, 174 и 72 гг., соответственно.

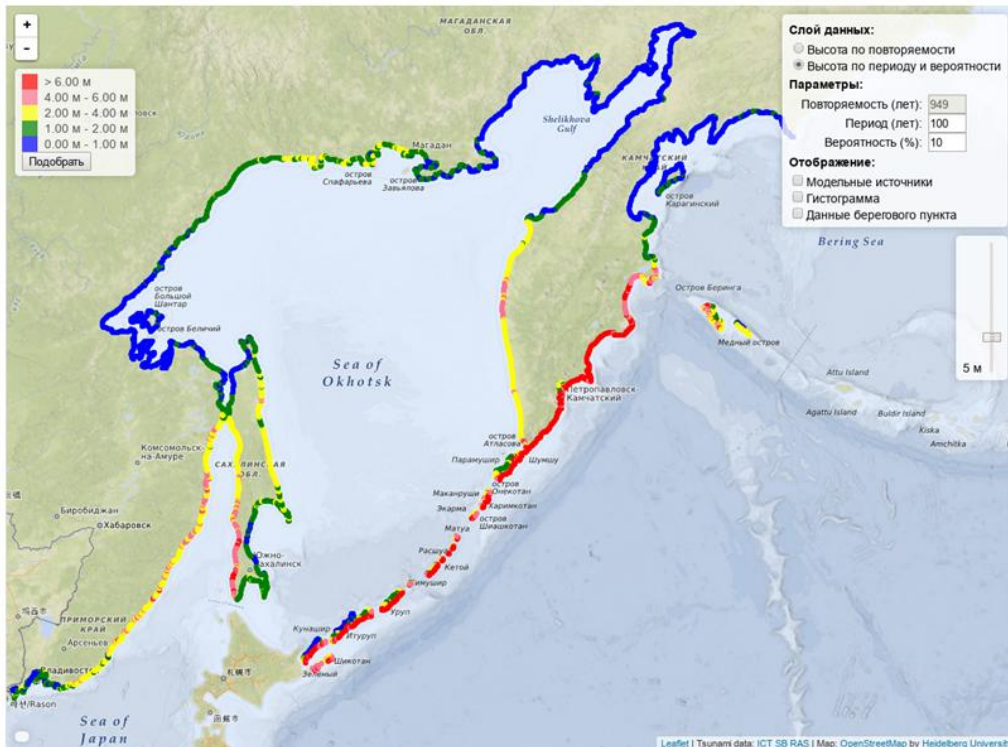


Рис. 6. Карта цунамиопасности Дальневосточного побережья РФ, показывающая высоты волн с ожидаемой вероятностью превышения 10% в течение интервала 100 лет (средний интервал повторяемости 949 лет).

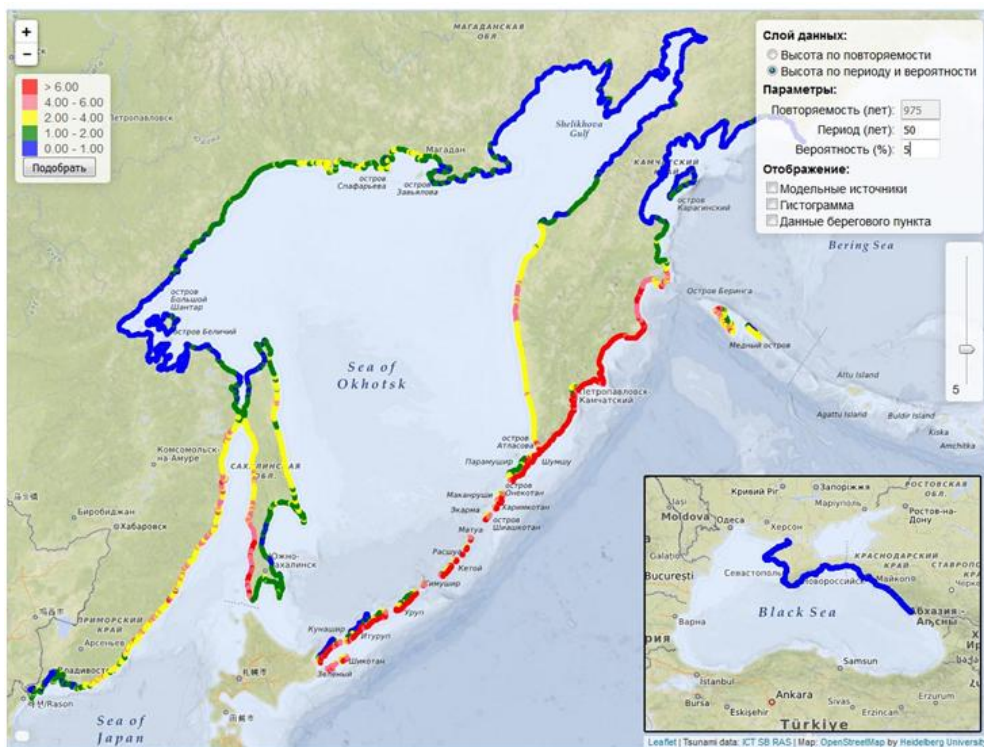


Рис. 7. Карта цунамиопасности Дальневосточного побережья РФ, показывающая высоты волн с ожидаемой вероятностью превышения 5% в течение интервала 50 лет (средний интервал повторяемости 975 лет). На врезке показана аналогичная карта для Российского побережья Черного моря.

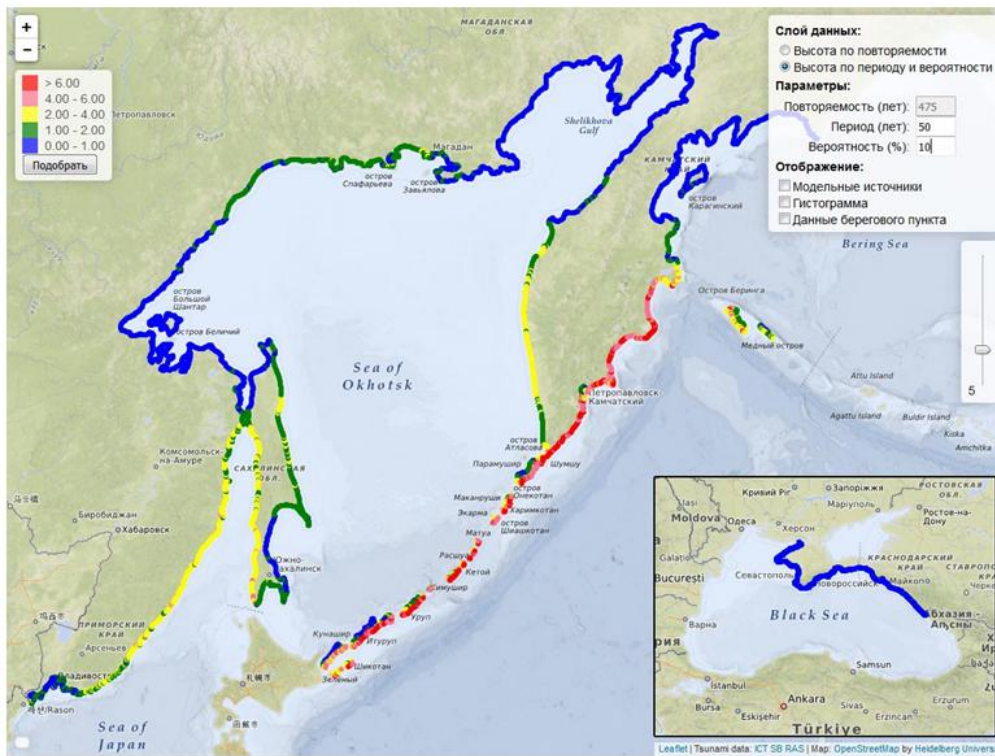


Рис. 8. Карта цунамиопасности Дальневосточного побережья РФ, показывающая высоты волн с ожидаемой вероятностью превышения 10% в течение интервала 50 лет (средний интервал повторяемости 475 лет). На врезке показана аналогичная карта для Российского побережья Черного моря.

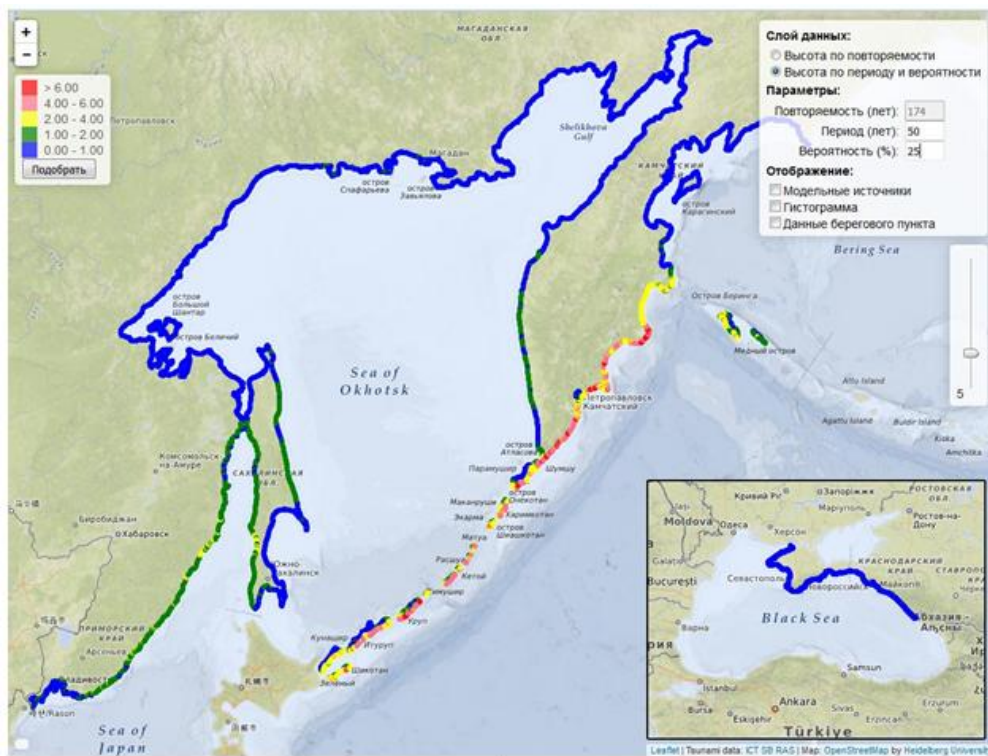


Рис. 9. Карта цунамиопасности Дальневосточного побережья РФ, показывающая высоты волн с ожидаемой вероятностью превышения 25% в течение интервала 50 лет (средний интервал повторяемости 174 года). На врезке показана аналогичная карта для Российского побережья Черного моря.

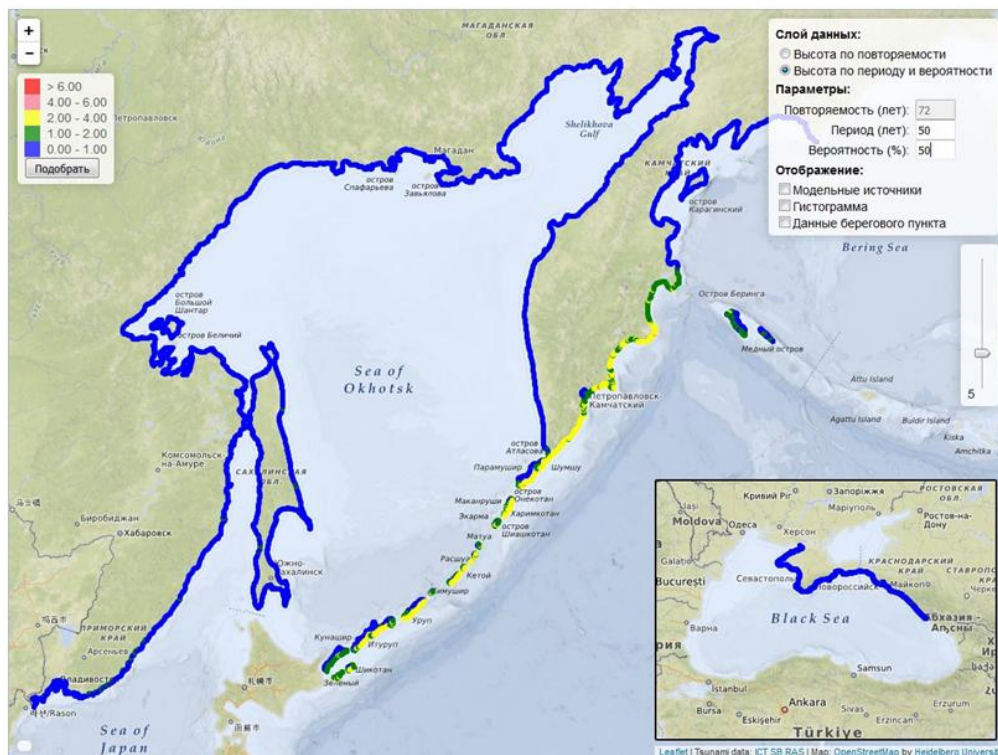


Рис. 10. Карта цунамиопасности Дальневосточного побережья РФ, показывающая высоты волн с ожидаемой вероятностью превышения 50% в течение интервала 50 лет (средний интервал повторяемости 72 г.). На врезке показана аналогичная карта для Российского побережья Черного моря.

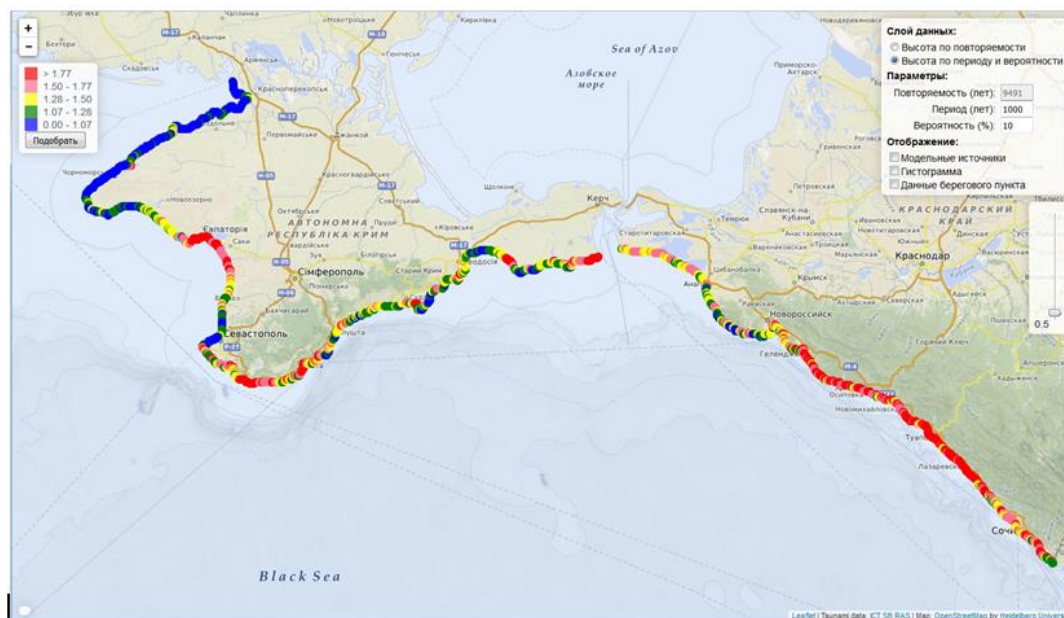


Рис. 11. Карта цунамиопасности Российского побережья Черного моря показывающая высоты волн с ожидаемой вероятностью превышения 10% в течение интервала 1000 лет (средний интервал повторяемости 9490 лет).

Более или менее значимые высоты начинают появляться на карте цунамиопасности Черного моря только на существенно больших периодах повторяемости (5 – 10 тыс. лет) (Рис. 11). Однако к оценкам цунамиопасности, полученным для столь больших повторяемостей, следует относиться с осторожностью, поскольку на таких временных интервалах могут играть существенную роль другие механизмы генерации цунами, не учитываемые в рамках используемого сейсмотектонического подхода. В первую очередь, речь может идти об оползневых и обвальных цунами, способных вызывать ограниченные по вдольбереговой

протяженности, но практически неограниченные по высоте заплески. Примеры таких цунамигенных событий известны для всех областей Мирового океана, но особенно существенную роль они играют для окраинных и внутренних морей, в которых скорость осадконакопления значительно выше, чем в океанических бассейнах, и, следовательно, условия для образования подводных оползней и обвалов значительно более благоприятны.

5. Для решения задач моделирования воздействия волн цунами на побережье разработаны два алгоритма – метод крупных частиц (LP) и комбинированный метод, сочетающий SPH подход и разностную схему с TVD свойствами (TVD+SPH). Эти алгоритмы и их программные реализации верифицированы на известных тестовых задачах, по результатам решения которых получены оценки возможностей алгоритмов в моделировании наката волн цунами в реальных акваториях. Предпочтение было отдано алгоритму LP, с помощью которого рассчитаны основные характеристики наката волн цунами на побережья в окрестностях населенных пунктов Лазаревское (Черное море), Александровск-Сахалинский (Японское море), Поронайск (Охотское море), Северо-Курильск (Тихий океан).

6. Построены базовые полностью нелинейные дисперсионные модели гидродинамики на плоскости и на вращающейся сфере, учитывающие подвижность дна. Созданы иерархические цепочки вложенных друг в друга математических моделей мелкой воды на плоскости и сфере типа моделей Буссинеска, обладающие преимущественно физически содержательными свойствами базовых моделей. Уравнения всех моделей из иерархических цепочек записаны в универсальной компактной форме, которая структурно совпадает с формой уравнений газовой динамики. Разработан универсальный конечно-разностный алгоритм решения нелинейно-дисперсионных уравнений, основанный на использовании расширенной системы уравнений, состоящей из уравнения неразрывности, уравнения движения и дополнительного уравнения эллиптического типа относительно дисперсионной составляющей, проинтегрированного по глубине давления.

7. С помощью созданных программ численно исследовано влияние частотной дисперсии на характеристики оползневых цунами, вызванных подводными оползнями на континентальном склоне акватории Черного моря, и сейсмических удаленных цунами в Тихом океане. Показано, что влияние сферичности и силы Кориолиса увеличивается с ростом горизонтальных размеров начального возмущения, а влияние дисперсии волн уменьшается, увеличение протяженности трасс распространения волн усиливает влияние всех этих эффектов, форма источника и рельеф дна также оказывают заметное влияние на проявление дисперсионных эффектов.

8. **Основным и главным результатом проекта являются вероятностные карты цунамиопасности Дальневосточного и Черноморского побережий РФ. Они были построены с использованием методики прямого сценарного моделирования, когда каждая расчетная высота от конкретного модельного очага входит в оценку цунамиопасности со своей повторяемостью, соответствующей повторяемости цунамигенных землетрясений конкретной магнитуды в конкретной условно-однородной зоне. В свою очередь, эта величина получается по результатам анализа инструментального сейсмического каталога для рассматриваемой зоны, который, в случае недостатка инструментальных данных, аппроксимировался в область больших магнитуд путем интерполяции и учета данных исторической (доинструментальной) сейсмичности, а также сеймотектонических особенностей региона.**

Следует подчеркнуть, однако, что такого рода обзорные карты должны использоваться только для сравнения различных побережий по степени цунамиопасности и для определения участков, нуждающихся в детальном районировании. Их нельзя применять для получения инженерных оценок цунамиопасности отдельных береговых пунктов (залитов, гаваней, портов, прибрежных гидротехнических сооружений), которые должны быть результатом специальных научно-исследовательских и проектно-

изыскательских работ. Только на основании результатов таких работ возможно принятие обоснованных проектно-инженерных решений по освоению прибрежных территорий в цунамиопасных районах.

Список литературы:

- [1] Гусяков В.К. Цунами на Дальневосточном побережье России: историческая перспектива и современная проблематика // Геология и геофизика, 2016, № 9, С. 1601-1615.
- [2] Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г. Деформация литосферных плит в зонах поддвига // В кн.: Океанология. Геофизика океана, Т.2, Геодинамика, М.: Наука, 1979, С. 194-203.
- [3] Лобковский Л.И., Баранов Б.В., Дозорова К.А., Мазова Р.Х., Кисельман Б.А., Баранова Н.А. Командорская сейсмическая брешь: прогноз землетрясения и расчет цунами // Океанология, 2014, Т. 54, № 4, С. 561.
- [4] Minoura, K. and 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, Iss. 1, P. 66-72.
- [5] Чубаров Л.Б., Бабайлов В.В., Бейзель С.А. Программа расчета характеристик волн цунами сейсмического происхождения МГС // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ Федеральной службой по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам № 2011614598 от 09.07.2011.