

УДК 550.344.42

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ КАРТ ЦУНАМИОПАСНОСТИ И ЕЁ РЕАЛИЗАЦИЯ ДЛЯ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Академик РАН Ю. И. Шокин¹, В. К. Гусяков², В. А. Кихтенко¹, Л. Б. Чубаров^{1,*}

Поступило 17.06.2019 г.

Созданы обзорные карты цунамиопасности Дальневосточного побережья России. Обсуждаются методологические основы подхода, основанного на методике РТНА (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment), а также проблемы построения сейсмотектонических моделей основных цунамигенных зон, численные методики получения расчётных каталогов высот волн на побережье и некоторые проблемы применения методики РТНА, связанные как с недостаточностью данных наблюдений, так и со сложностью выполнения большого объёма сценарного численного моделирования. Приведены примеры обзорных карт цунамиопасности для различных повторяемостей, представленные в приложении WTMap.

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

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524894419-423>

Вероятностная оценка цунамиопасности определяется с помощью методики РТНА (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment) [1–3], реализуемой построением сейсмотектонической модели цунамигенных зон, угрожающих побережью, и численным моделированием проявления цунами вблизи береговых пунктов. При этом учитываются только вносящие основной вклад сейсмогенные цунами (для Дальневосточного региона РФ их доля составляет около 95% [4]).

Методика основана на гипотезе о том, что воздействие цунами заданной интенсивности на побережье представляется пуассоновским потоком событий, который характеризуется соотношением

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

где P — вероятность события, T — период времени, $I(s)$ — характеристика опасности цунами на защищаемом участке побережья, I_{thre} — пороговое значение этой характеристики, s — высота волны на урезе, $W(I(s) > I_{thre})$ — средняя частота (повторяемость) превышения I_{thre} , полностью определяющая поток событий. В силу аддитивности пуассоновских

потоков $W(I(s) > I_{thre})$ представляется суммой частот всех возможных событий с $I(s) > I_{thre}$:

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

где Ω — непрерывное пространство параметров очагов цунамигенных землетрясений, $Q \in \Omega$ — элемент этого пространства, $I(s | Q)$ — высота волны в защищаемом пункте при воздействии источника Q , $b(x, y)$ — индикаторная функция, равная 1, если $x > y$ — и 0 иначе, $w(Q)$ — средняя повторяемость события с источником Q , имеющая смысл плотности потоков событий. Пространство Ω и повторяемости $w(Q)$ определяются по сейсмотектонической модели региона с некоторой погрешностью, объясняемой недостатком статистики наблюденных событий, особенно в области больших магнитуд. Величина $I(s | Q)$ находится численным моделированием распространения волны.

Выбор алгоритма интегрирования в (2) обусловлен многомерностью пространства Ω , стремлением к снижению числа узлов интегрирования с сохранением требуемой точности, отсутствием необходимости пересчёта значений при изменении сейсмотектонической модели.

Конечная совокупность наборов параметров Q , плотно покрывающая пространство Ω , создаётся с использованием экспертных оценок. При этом исследуемая область разбивается на условно-однородные зоны (УОЗ), внутри которых характеристики сейсмичности постоянны. Для каждой УОЗ задаётся

¹ Институт вычислительных технологий
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск

² Институт вычислительной математики
и математической геофизики
Сибирского отделения Российской Академии наук,
Новосибирск

*E-mail: chubarov@ict.nsc.ru

интервал возможных магнитуд, который разбивается на подынтервалы, а пространство Ω — на классы Ω_i . Повторяемость каждого класса $w(\Omega_i)$ оценивается либо по числу соответствующих событий в каталоге, либо экстраполяцией закона Гутенберга—Рихтера в область больших магнитуд.

Для i -го класса по экспертным оценкам конструируется набор представительных источников $\{Q_i\}$, а повторяемость источников делится на всех его представителей. Тогда

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

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

Значения $I(s|Q)$ определяются с использованием программного комплекса MGC [5], реализующего конечно-разностный алгоритм, основанный на схеме Мак-Кормака [6]. Этот алгоритм аппроксимирует

нелинейные уравнения теории мелкой воды с учётом сферичности Земли и силы Кориолиса.

Используется поршневая модель возбуждения цунами, которая предполагает, что под действием внутреннего пространственного источника дислокационного типа [7] возникают статические остаточные смещения дна, определяющие начальное возмущение поверхности океана в очаге.

Для построения обзорных карт цунамиопасности Дальневосточного побережья России с учётом современных представлений о сейсмотектонике региона была создана совокупность 2552 модельных очагов (рис. 1), входящих в шесть УОЗ. В Курило-Камчатском регионе формируются зона А, аппроксимируемая системой очагов (M_w в диапазоне от 7,2 до 9,0) с подвижками, ориентированными вкост простирания островной дуги, и зона А1, реализующая другой тип механизмов [8] и состоящая из взбросовых подвижек по крутопадающим в сторону океана плоскостям разрывов.

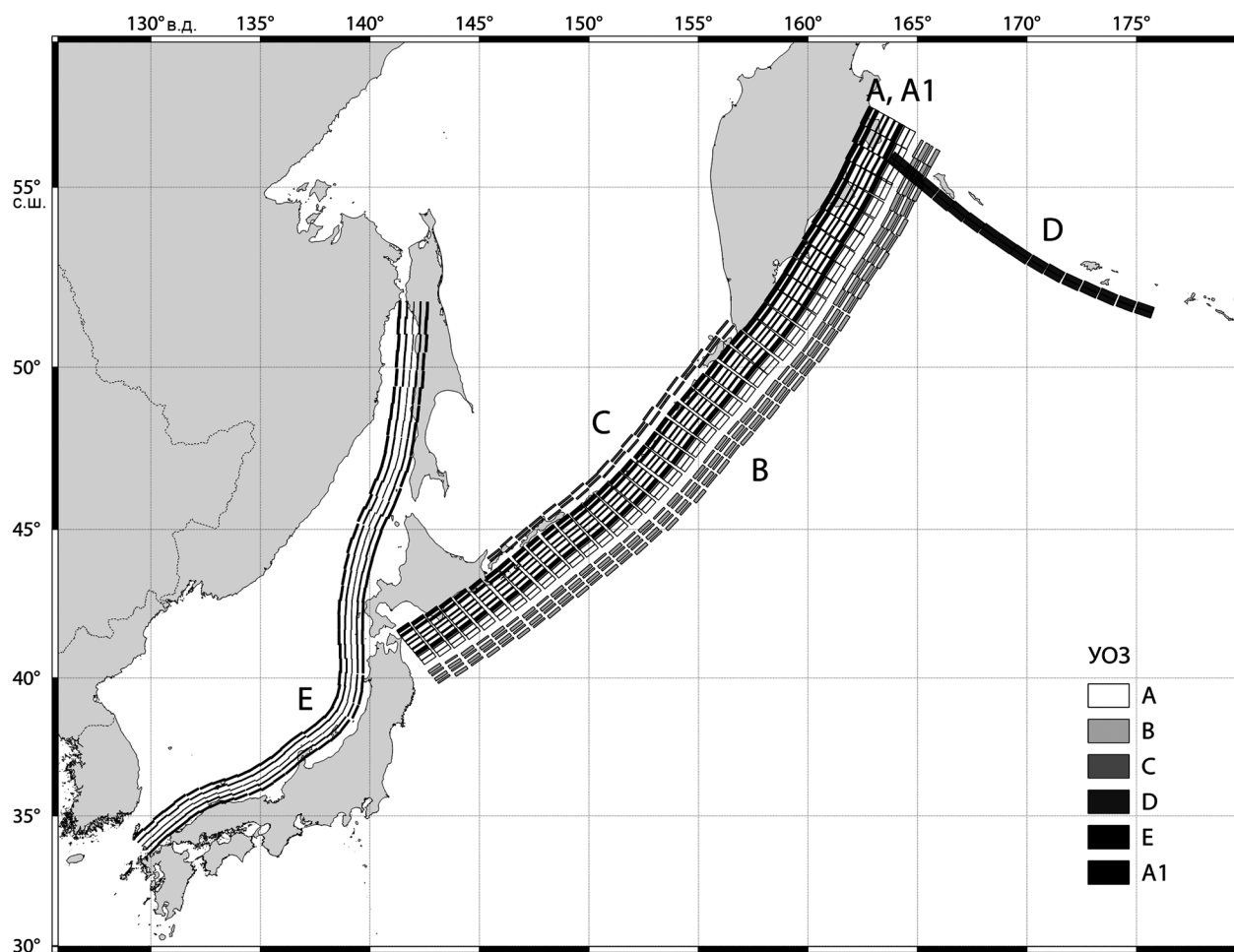


Рис. 1. Проекция площадок разрыва в очагах модельных землетрясений магнитуды $M_w = 7,2$ в условно-однородных зонах.

В зоне В характерен сбросовый механизм по плоскостям, субпараллельным простиранию глубоководного жёлоба с довольно крутыми углами падения. Здесь построена система из четырёх цепочек очагов (M_w от 7,2 до 8,4). В модель добавлена также двойная цепочка очагов ($M_w = 7,2$) со взбросовым механизмом подвижки по разноориентированным плоскостям разрыва с падением как под океан, так и под Охотское море (зона С).

Западная часть Алеутской зоны субдукции (зона D) аппроксимировалась двойной цепочкой очагов с полным набором магнитуд $M_w = 7,2-9,0$ и с механизмами в виде косого поддвига по главной литосферной границе раздела, полого падающей здесь под Берингово море. В Японском море УОЗ Е аппроксимировалась системой из пяти цепочек очагов с магнитудами $M_w = 7,2; 7,8$ и $8,4$, реализующих взбросовые подвижки по субвертикальным плоскостям разрыва.

Для оценки повторяемости модельные события группировались в 13 классов по магнитуде и принадлежности к УОЗ. Повторяемость событий заданного интервала магнитуд в пределах УОЗ (или их объединения) делилась на период представительности соответствующего класса в каталоге [9]. В перекрывающихся зонах А и А1 к зоне А отнесено 70% исторических событий. В зоне Е повторяемость определялась линейной аппроксимацией закона Гутенберга—Рихтера с экстраполяцией в область больших магнитуд.

Веб-приложение WTMap [10] позволяет строить и отображать карты вдольберегового распределения высот волн с заданной средней повторяемостью превышения пороговой высоты волны либо для заданных периодов наблюдения и вероятности превышения с пересчётом по формуле (1). На карте региона (рис. 2) нанесены эпицентры модельных

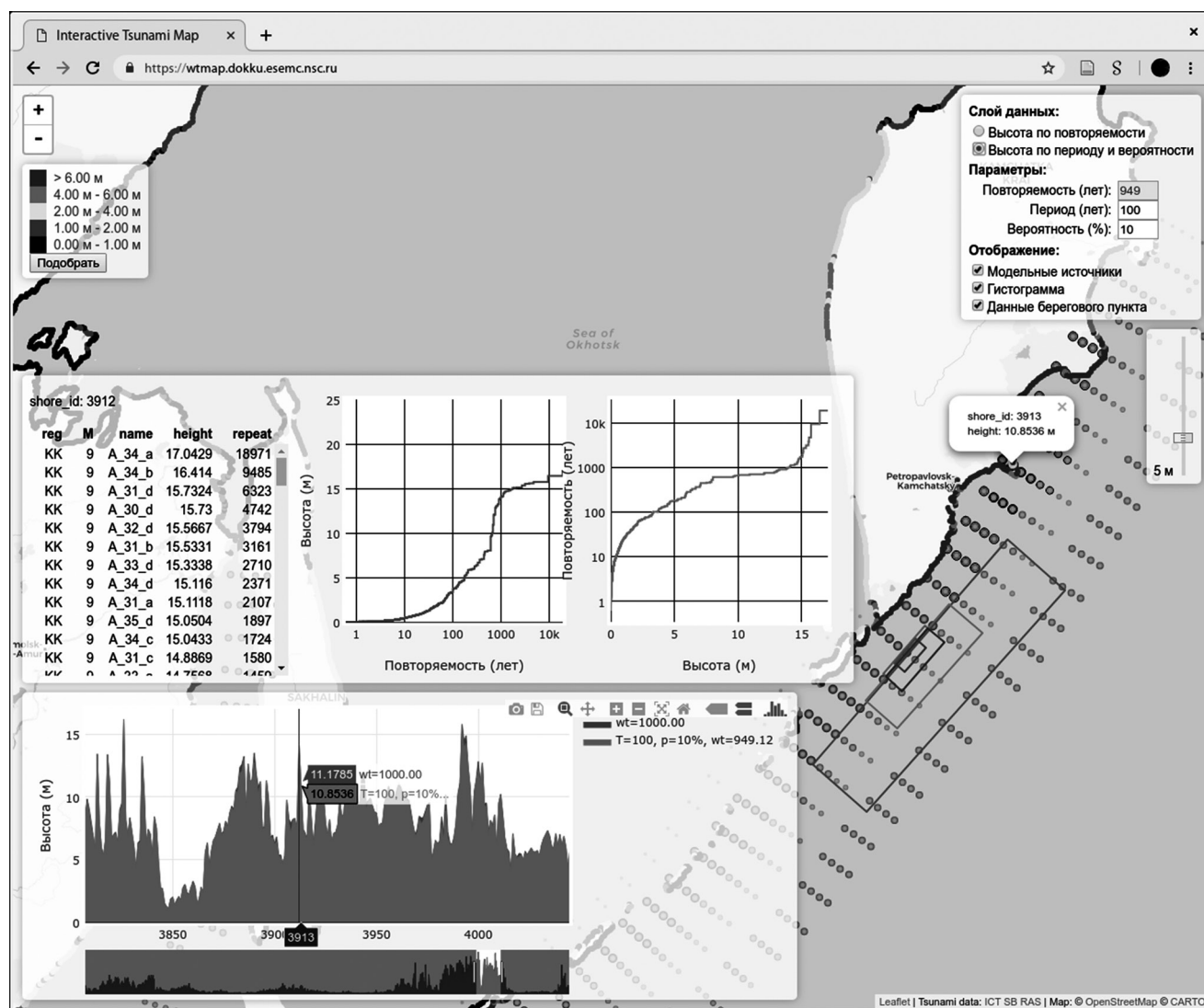


Рис. 2. Веб-приложение WTMap.

очагов землетрясений. Раскраска береговой линии соответствует оценкам высот волн с заданной средней повторяемостью превышения. При наведении курсора на конкретную береговую точку на карте высвечиваются очаги, породившие в этой точке высоты, превышающие заданную, а в таблице приводятся рассчитанные здесь высоты волн от всех модельных очагов. Отображаются также зависимости ожидаемой высоты от повторяемости и распределение оценок высот для выбранной береговой точки и её окрестности, а также на всём Дальневосточном побережье. При выборе эпицентра показываются проекции относящихся к нему площадок разрыва очагов различных магнитуд. WTMap допускает интерактивное изменение параметров отображаемой информации.

Анализ построенных карт (см., например, рис. 3) показывает, что основную опасность (высоты волн до 5–6 м) представляют цунами, порождённые землетрясениями, происходящими на континентальном

склоне Курило-Камчатской субдукционной зоны. Те же землетрясения приводят на западном побережье островной дуги к меньшим высотам волн (1–2 м). На остальном побережье Охотского моря, за исключением части восточного побережья Сахалина и западного побережья Камчатки, ожидаемые высоты волн менее 1 м. На побережье Приморья влияют в основном цунамигенные очаги в восточной части Японского моря, способные на отдельных участках создавать высоты до 3–4 м.

Основная проблема методики РТНА связана с построением моделей цунамигенных зон, часто формируемых по неполной и не всегда достоверной информации о геологическом строении этих зон и их сейсмотектоническом режиме.

Другая проблема связана с поиском путей снижения вычислительной трудоёмкости сценарных расчётов, необходимых для получения оценок цунамиопасности на большие повторяемости. Это возможно за счёт использования новых математи-

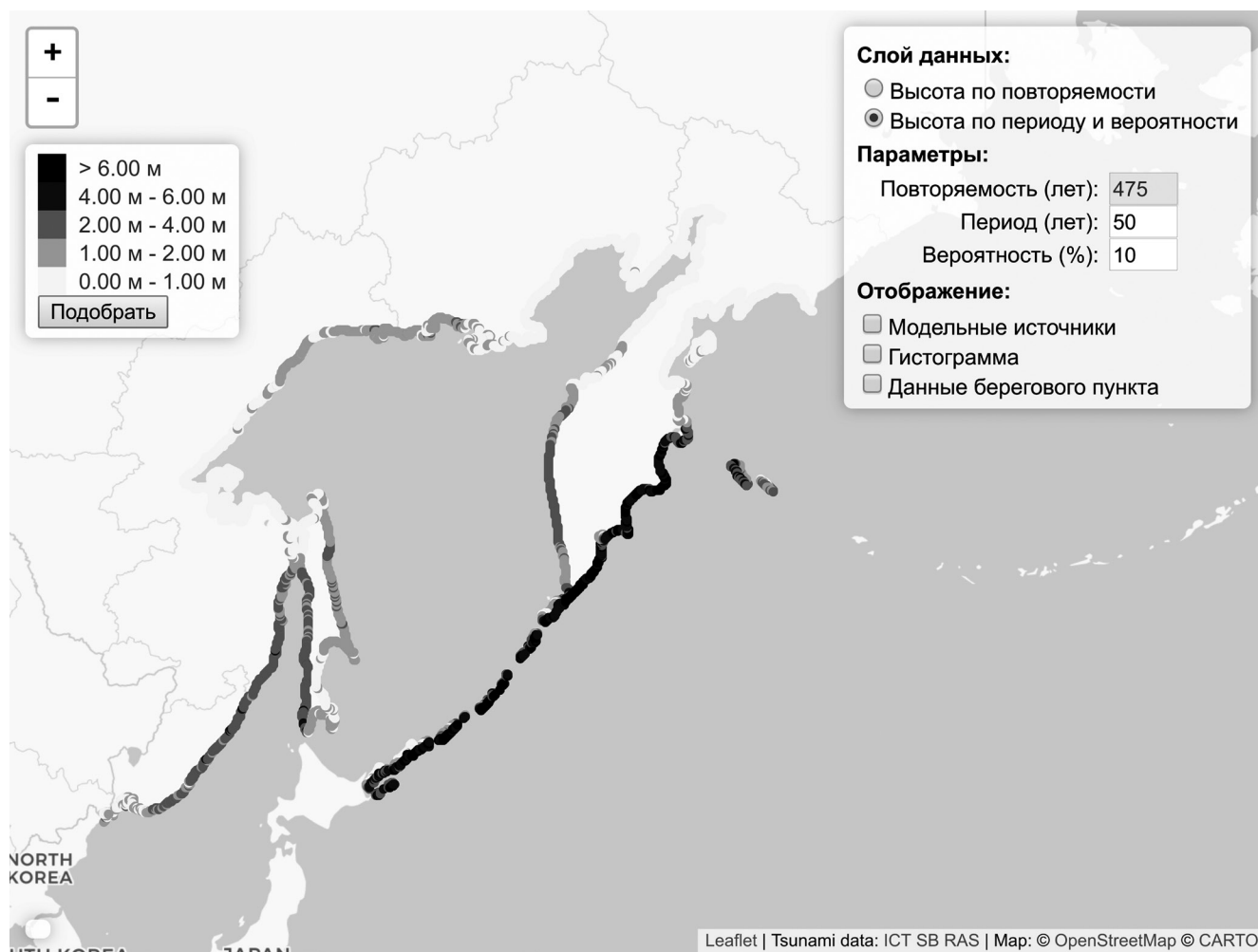


Рис. 3. Пример расчётной карты цунамиопасности Дальневосточного побережья РФ, полученной в рамках методики РТНА: $P = 10\%$, $T = 50$ лет, повторяемость 1 раз в 475 лет.

ческих моделей и алгоритмов, современных аппаратных и программных средств. Определённые трудности представляет также получение цифровых моделей рельефов дна и суши, обеспечивающих необходимую точность результатов.

Благодарности. Авторы выражают признательность С.А. Бейзелю, выполнившей расчёты, результаты которых использовали при оценке цунами-опасности побережья.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. DOI: 10.1017/CBO9780511635380.012.
2. Knighton J., Bastidas L. A Proposed Probabilistic Seismic Tsunami Hazard Analysis Methodology // Nat. Hazards. 2015. V. 78. P. 699–723. DOI: 10.1007/s11069-015-1741-7.
3. Grezio A., Babeyko A., Baptista M.A., et al. Probabilistic Tsunami Hazard Analysis: Multiple Sources and Global Applications // Rev. of Geophysics. 2017. V. 55. P. 1158–1198. DOI: 10.1002/2017RG000579.
4. Гусяков В.К. Цунами на Дальневосточном побережье России: историческая перспектива и современная проблематика // Геология и геофизика. 2016. № 9. С. 1601–1615. DOI: 10.15372/GiG20160901.
5. Shokin Yu.I., Babailov V.V., Beisel S.A., et al. Mathematical Modeling in Application to Regional Tsunami Warning Systems Operations // Comput. Sci. and High Perform. Computing III: Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design / E. Krause, Yu.I. Shokin, M. Resch, N. Shokina (Eds). V. 101. B.: Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. P. 52–68. DOI: 10.1007/978-3-540-69010-8_6.
6. MacCormack R.W. The Effect of Viscosity in Hypervelocity Impact Cratering // J. Spacecraft and Rockets. 2003. V. 40. № 5. P. 757–763. DOI: 10.2514/2.6901.
7. Okada Y. Surface Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half Space // Bulletin of the Seismological Society of America. January 1992. № 82 (2). P. 1018–1040. DOI: 10.1016/0148-9062(86)90674-1.
8. Лобковский Л.И., Сорохтин О.Г. Деформация литосферных плит в зонах поддвига // Океанология. Геофизика океана. Т. 2. Геодинамика. М.: Наука, 1979. С. 194–203.
9. HTDB/WLD (Historical Tsunami Database for the World Ocean), 2000 BC to Present, Tsunami Laboratory, ICMMG SB RAS, Novosibirsk, 2018. <http://tsun.sccc.ru/nh/tsunami.php>
10. 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. <https://wtmap.dokku.lesemc.nsc.ru/>

TSUNAMI HAZARD MAPPING METHODOLOGY AND ITS IMPLEMENTATION FOR THE FAR EASTERN COAST OF THE RUSSIAN FEDERATION

Academician of the RAS Yu. I. Shokin¹, V. K. Gusiakov², V. A. Kikhtenko¹, L. B. Chubarov¹

¹*Institute of Computational Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russian Federation*

²*Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

Received June 17, 2019

The overview maps of tsunami hazard for the Far East coast of Russian Federation are created. The methodological basis of the PTHA (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment) approach are discussed, as well as the problems of constructing seismotectonic models of the main tsunamigenic zones, mathematical models and algorithms for calculating probability estimates of tsunami hazard, and some problems of applying the RTHA methodology both related to the lack of observation data and with the complexity of performing a large amount of scenario calculations. Examples of overview tsunami hazard maps for various recurrence intervals, constructed using the PTHA methodology and presented using the “WTMap” application, are given.

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