



MATHEMATICAL MODELING IN THE PROBLEM OF ASSESSMENT OF TSUNAMI HAZARD FOR MARINE COASTS

V. K. Gusiakov

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

Mathematical modeling is one of the most powerful and flexible tools for studying complex natural phenomena, in which the setting up of a direct full-scale experiment is, as a rule, impossible. A typical example of a dangerous natural phenomenon characterized by low frequency and severe consequences are tsunami waves that occur in the oceans and the seas after submarine earthquakes, volcanic explosions, underwater slumping and coastal landslides. By the number of casualties and the total damage, tsunamis are in fourth place among other natural disasters and catastrophes, after earthquakes, floods and typhoons. In the world statistics of victims of natural disasters in the XX century, which took more than 4 million lives, the share of tsunami was relatively small and amounted to just over 1 %. The Indonesian disaster of 2004, which took more than 227,000 lives, immediately brought the tsunami in first place in the statistics of the victims of natural disasters in the 21st century.

The damage caused by the tsunami is aggravated by their complete suddenness, transience, heavy destruction and high probability of fatal outcomes among people caught in the zone of impact of these waves. The problem of effective protection from this natural disaster is complicated by the rarity of its manifestation in a particular section of the coast. Even in the most tsunami-prone areas of the Pacific Ocean (such as Japan, Chile, Peru), strong tsunamis with casualties occur every 30–50 years, disastrous — once in 100–150 years. These return periods far exceed the frequency of occurrence, for example, of hurricanes and floods and are comparable to the return periods of earthquakes and volcanic eruptions. Due to the nature of the mechanism of occurrence, as well as due to the presence of constant sea level disturbances due to wind waves, storms and tides, tsunamis have a certain natural threshold below which they are practically unobservable, and above it immediately become dangerous. This is partly why in the event of the occurrence of this natural disaster, the degree of the population's readiness for it turns out to be unacceptably low.

In the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, studies on tsunamis initiated by M. A. Lavrent'ev, E. I. Bichenkov, R. M. Garipov and A. I. Yanushauskas in the early 1960s, were then continued and received an especially intensive development in the Computing Center SOAN USSR (now the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the SB RAS). The leading role in this was played by Anatoly A. Alekseev, at that time the Head of the Laboratory of Mathematical Problems of Seismology. The idea of A. S. Alekseev was to include consideration of gravity term into the standard Lame's equation of motion for the liquid layer overlying the elastic half-space. In such a model among the solutions of the dispersion equation there must be a root corresponding to the surface gravitational wave in the fluid layer, i.e. tsunami. This approach turned out to be very fruitful and made it possible to study the dependence of tsunami amplitudes on the parameters of a seismic source, used in seismology and determined from observations of seismic waves (seismic moment, depth, mechanism). It was called the „elastic model“ of tsunami generation, which was considered as an alternative to the hydrodynamic „piston model“, in which the fluid is considered incompressible and the bottom is rigid. The elastic model makes it possible to carry out a joint analysis of the generation conditions for the surface seismic waves (Rayleigh waves) and tsunami in order to

determine the existence of physical connections or correlations between them, which could be used for tsunami prediction.

The possibility of considering both elastic waves and tsunami waves within the framework of a unified model made it possible for the first time to obtain estimates of the fraction of seismic energy radiated by a model source that goes to the formation of tsunami waves. It was found that the upper limit of the share of seismic energy, transferring into tsunami waves (about 10 %) is reached for a point source of the vertical dip-slip type, located at a shallow (about 10 km) depth. For the parameters of model sources corresponding to the real tsunamigenic earthquakes in the Pacific, the fraction of tsunami energy does not exceed 1 % of the total seismic energy.

The two main scientific and practical tasks in the tsunami problem are the operational tsunami forecast and preliminary tsunamizoning of the coast. The main problem of operational tsunami forecast on the Far Eastern coast of the Russian Federation is to reduce the number of false alarms, which can be achieved by limiting the size of coastal zone for the alarm released after the submarine earthquake with magnitude above threshold value as well as shifting from a binary to a three-level alarm scheme. The main problem of assessing the tsunami hazard of the ocean coast, which has a subduction zone in front of it, is to obtain realistic estimates of the place and time of occurrence of M9 class mega-earthquake in the nearest segments of this zone. Obtaining such estimates is a complex scientific and practical problem and in fact corresponds to solving the problem of a long-term forecast of the strongest earthquakes.

The results presented in this paper were partially obtained during the implementation of the RFBR project 16-05-00450.

Key words: mathematical modeling, earthquake sources, seismotectonics, tsunami, operational warning, tsunami hazard, tsunami-zoning.

References

1. Topics 2000. Natural catastrophes — the current position. Special Millennium Issue // Munich Re Group, 2001.
2. Solovev S. L. Osnovnye dannye o tsunami na Tihookeanskem poberezhe SSSR, 1937–1976 gg. V kn.: Izuchenie tsunami v otkrytom okeane, M.: Nauka, 1978, S. 61–136.
3. Miller D. J. Giant Waves in Lituya Bay, Alaska // Geological Survey Professional Paper 354-C, U.S. Government Printing Office, Washington, 1960, P. 50–85.
4. Gusiakov V. K. Tsunami na Dalnevostochnom poberezh'e Rossii: istoricheskaya perspektiva i sovremennoy problematika // Geologiya i geofizika. 2016. № 9. S. 1601–1615.
5. Gusiakov V. K. Vozbuzhdenie voln tsunami i okeanicheskikh voln Releya pri podvodnom zemletryasenii // Matematicheskie problemy geofiziki, Novosibirsk, VTS SOAN SSSR. 1972. V. 3. S. 250–272.
6. Gusiakov V. K. O svyazi volny tsunami s parametrami ochaga podvodnogo zemletryaseniya // Matematicheskie problemy geofiziki, Novosibirsk: VTS SO AN SSSR. 1974. V. 5. Ch. 1. S. 118–140.
7. Alekseev A. S., Gusiakov V. K. Ob otcenke tsunamiopasnosti podvodnyh zemletryaseniy // Zemletryaseniya i preduprezhdenie stihiiykh bedstviy: Trudy 27-go Mezhdunarodnogo geologicheskogo kongressa, Moskva, 4–14 avgusta, 1984. T.6, M.: Nauka, 1984, S.127–133.
8. Gusiakov V. K. Raschet ehnergii voln tsunami. V kn.: Nekorrektnye zadachi matematicheskoy fiziki i problemy interpretatsii geofizicheskikh nablyudeniy, Novosibirsk, VTS SO AN SSSR, 1976, S. 46–64.
9. Alekseev A. S., Gusiakov V. K., Chubarov L. B., Shokin YU. I. CHislennoe issledovanie generatsii i rasprostraneniya voln tsunami pri realnoy topografi dna Lineynaya model Izuchenie tsunami v otkrytom okeane, M.: Nauka, 1978, S. 5–20.

10. Gusiakov V. K. Ostatochnye smeshcheniya na poverhnosti uprugogo poluprostranstva / Uslovno-korrektnye zadachi matematicheskoy fiziki v interpretatsii geofizicheskikh nablyudeniy, Novosibirsk, VTS SO RAN, 1978, S. 23–51.
11. Gusiakov V. K., Chubarov L. B. CHislennoe modelirovanie SHikotanskogo Nemuro-Oki tsunami 17 iyunya 1973 goda / V kn.: EHvolyutsiya tsunami ot ochaga do vyhoda na bereg, M.: Radio i svyaz', 1982, S. 16–24.
12. Gusiakov V. K., Chubarov L. B. CHislennoe modelirovanie vozbuздheniya i rasprostraneniya tsunami v pribrezhnoy zone // Fizika Zemli. 1987. N 11. S. 53–64.
13. Gusiakov V.K., Osipova A.V. Avtomatizirovannyy katalog zemletryaseniy i tsunami Kurilo-Kamchatskogo regiona // Vychislitelnye tekhnologii, 1992, T. 1, N 3, S. 197–204.
14. Gusiakov V. K., Osipova A. V. Baza dannyh po zemletryaseniyam i tsunami Kurilo-Kamchatskogo regiona // Preprint VTS SORAN, N 976, 1999.
15. Gusiakov V. K., Kalashnikova T. V. Globalnaya baza dannyh po tsunami / Global tsunami database (GTDB). Zaregistrirovana v FGU FIPS (Rospatent) 16 sentyabrya 2016 goda, svidetelstvo N 2016621269.
16. Lyskovskaya E. V., Gusiakov V. K. Graficheskaya obolochka PDM/TSU (Parametric Data Manager for Tsunami Database) dlya raboty s bazoy dannyh po tsunami. Zaregistrirovana v FGU FIPS (Rospatent) 16 sentyabrya 2016 goda, svidetelstvo N 2016660574.
17. Alekseev A. S., Gusiakov V. K. Seysmicheskaya sistema prognoza tsunami. Printsip postroeniya // Preprint N 428, Novosibirsk, VTS SO AN SSSR, 1983.
18. Gusiakov V. K. Magnitudno-geograficheskiy kriteriy prognozirovaniya tsunami analiz praktiki primeneniya za 1958–2009gg // Seysmicheskie pribory. 2010. T. 46. N 3. S. 5–21.
19. Kanamori H. Mechanism of tsunami earthquakes // Phys. Earth Planet. Inter., 1972. V. 6, P. 346–359.
20. Obshchee seysmicheskoe rayonirovanie territorii Rossiyskoy Federatsii Poyasnitelnaya zapiska k komplekту kart OSR-2016 i spisok naseleñnyh punktov raspolozhennyh v seysmoaktivnyh zonah. Red. V. I. Ulomov, M. I. Bogdanov // Inzhenernye izyskaniya. 2016. N 7. S. 49–121.
21. Power W., Downes G. Tsunami hazard assessment / Volcanic and tectonic hazard assessment for nuclear facilities. Edited by Connor C., Chapman N., Connor L. Cambridge Univ. Press. 2009. P. 276–306.
22. Knighton J., Bastidas L. A proposed probabilistic seismic tsunami hazard analysis methodology // Nat Hazards. 2015. V. 78. P. 699–723.



МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ЦУНАМИОПАСНОСТИ МОРСКИХ ПОБЕРЕЖЬЙ

В. К. Гусяков

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Новосибирск, Россия

УДК 550.345

Математическое моделирование представляет собой одно из наиболее мощных и гибких средств изучения сложных природных явлений, в отношении которых постановка прямого натурного эксперимента является, как правило, невозможной. Характерным примером опасного природного явления, характеризующегося малой повторяемостью и тяжелыми последствиями, являются волны цунами, возникающие в морях и океанах при подводных землетрясениях, вулканических извержениях, подводных оползнях и береговых обвалах. В работе рассматриваются математические модели, используемые для изучения двух основных стадий развития цунами (возбуждение в очаговой области и распространение в глубоком океане), проблемы создания информационно-вычислительных комплексов и баз данных по наблюдениям цунами, а также их применение для решения практических задач оперативного прогноза цунами и предварительного цунамирайонирования побережья.

Ключевые слова: математическое моделирование, очаги землетрясений, сейсмотектоника, цунами, оперативный прогноз, цунамиопасность, цунамирайонирование.

Введение. Волны цунами, возникающие в морях и океанах при некоторых сильных подводных землетрясениях, вулканических извержениях, оползнях и обвалах, являются одним из наиболее опасных видов природных катастроф. По числу жертв и суммарному ущербу цунами находятся на четвертом месте в ряду стихийных бедствий и катастроф, после землетрясений, наводнений и тайфунов. В мировой статистике жертв природных катастроф в XX столетии, унесших более 4 миллионов жизней [1], доля цунами была относительно невелика и составляла чуть более 1 %. Индонезийская катастрофа 2004 г., унесшая более 227 000 жизней, сразу вывела цунами в статистике жертв природных катастроф XXI века на первое место.

Ущерб, наносимый цунами, усиливается их полной внезапностью, быстротечностью, тяжелыми разрушениями и высокой вероятностью фатальных исходов среди людей, оказавшихся в зоне воздействия этих волн. Проблема эффективной защиты от этого стихийного бедствия осложняется редкостью его проявления на отдельном участке побережья. Даже в наиболее цунамиопасных районах Тихого океана (таких как Япония, Чили, Перу) сильные цунами с жертвами среди населения происходят раз в 30–50 лет, катастрофические — раз в 100–150 лет. Эти периоды намного превышают повторяемость, например,

Представленные в работе результаты частично (в отношении поддержки баз данных и создания графических оболочек) получены в ходе реализации проекта РФФИ 16-05-00450.

Автор выражает благодарность Т. В. Калашниковой и П. С. Зиновьеву за помощь в подготовке графических материалов и оформлении статьи.

ураганов и наводнений и сопоставимы с периодами повторяемости землетрясений и вулканических извержений. Благодаря особенностям механизма возникновения, а также ввиду наличия постоянных возмущений уровня моря, обусловленных ветровым волнением, штормами и приливами, цунами обладают некоторым естественным порогом (по высоте), ниже которого они практически ненаблюдаются, а выше него сразу становятся опасными. Отчасти поэтому при возникновении этого стихийного бедствия степень готовности населения к нему оказывается недопустимо низкой.

Точного научного определения, что такое цунами, до сих пор нет. В 60-х годах прошлого века под этими волнами понимались длиннопериодные (в диапазоне от 2 до 200 мин) колебания уровня океана, вызванные быстротечными процессами на дне или поверхности океана, в основном, тектонического характера, т. е. подводными землетрясениями, вулканическими извержениями, а также береговыми и подводными оползнями и обвалами [2]. В географическом отношении считалось, что главным цунамигенным регионом является побережье Тихого океана, цунами в других океанах могут возникать только при редких исключительных событиях, подобных Лиссабонскому землетрясению 1755 года или извержению вулкана Кракатау 1883 года. Считалось, что наилучшей математической моделью для описания цунами является модель длинных волн на мелкой воде. Однако уже тогда в каталоги цунами включались явления, подобные гигантскому (высотой в 525 м) заплеску в заливе Литуйя на Аляске, порожденному 10 июля 1958 года сейсмогенным обвалом, возникшем на его восточном склоне после землетрясения магнитудой 7.9 [3]. Такого рода волну ни в каком приближении нельзя считать „длинной“, однако ее аномальный и катастрофический характер не вызывает сомнения.

При любом типе источника волна цунами есть возмущение, захватывающее всю толщу водного бассейна, при ее прохождении в движение приводятся огромные массы воды, что и делает цунами грандиозным катастрофическим явлением. В этом ее принципиальное отличие от ветровых волн, высоты которых на берегу при сильных штормах также могут достигать 8–10 метров, но их разрушительный потенциал неизмеримо ниже.

В Российской Федерации угрозе цунами подвержено в первую очередь Курило-Камчатское побережье, а также побережья Японского, Охотского и Берингова морей. Исторический каталог цунами для Дальневосточного региона включает в себя 110 цунамигенных событий, произошедших там с 1737 года [4]. Всего за этот период наблюдалось 10 разрушительных цунами с высотами на берегу 10 и более метров, среди них было 2 мегацунами с высотами более 20 м (в 1737 году и 1952 году), еще в 15 случаях цунами было опасным (высоты в диапазоне 2–10 м), в 13 случаях наблюденные высоты волн находились в пределах приливных колебаний (порядка 1–2 м), в остальных случаях цунами было слабым и наблюдалось только на приборных записях. Таким образом, повторяемость разрушительных цунами у дальневосточных берегов РФ составляет в среднем 1 раз в 25 лет, опасных — 1 раз в 10–15 лет, слабые цунами наблюдаются практически ежегодно. Цунами и цунамиподобные явления (внезапные аномальные колебания уровня воды) известны также на Черном, Каспийском, Балтийском, Баренцевом и Белом морях. Максимальные высоты заплесков при них достигали нескольких (до 4–5) метров, однако их повторяемости существенно ниже, чем в Дальневосточном регионе, и составляют десятки и даже сотни лет. Внезапные водные возмущения в историческое время известны на Байкале и на Ладоге, и даже на крупных реках, таких как Волга и Днепр (вследствие береговых оползней и обвалов).

В Сибирском отделении РАН работы по изучению цунами, начатые по инициативе академика М. А. Лаврентьева Е. И. Биченковым, Р. М. Гариповым и А. И. Янушаускасом еще в начале 1960-х годов, были затем продолжены и получили особенно интенсивное развитие в Вычислительном центре СО АН СССР (сейчас Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН). Ведущую роль в этом сыграл Анатолий Семенович Алексеев, в то время заведующий лабораторией математических задач сейсмологии. В 1968 году автору данной статьи, тогда еще студенту геолого-геофизического факультета НГУ, им была предложена задача о возбуждении волн в слое сжимаемой гравитирующей жидкости, лежащем на упругом полупространстве. Идея А. С. Алексеева состояла в том, что в такой модели среди решений дисперсионного уравнения должен быть корень, соответствующий поверхностной гравитационной волне в слое жидкости, т. е. цунами. Такой подход оказался очень плодотворным и позволил изучить зависимость амплитуд цунами от параметров сейсмического источника, используемых в сейсмологии и определяемых из наблюдений над сейсмическими волнами (сейсмический момент, глубина, механизм). Он получил название „упругой модели“ возбуждения, которая рассматривалась как альтернатива чисто гидродинамической „поршневой модели“, в которой жидкость считается несжимаемой, а дно жестким, и возможность его колебаний не учитывается. Упругая модель позволяет провести совместный анализ условий возбуждения поверхностных сейсмических волн (волн Релея) и цунами, для того чтобы выяснить существование физических связей или корреляции между ними, которую можно было бы использовать для прогноза цунами.

Упругая модель возбуждения цунами. Обычный подход к изучению процесса возбуждения цунами — это решение линеаризованных уравнений гидродинамики для потенциального движения идеальной тяжелой жидкости, лежащей на жестком дне. Линеаризация может быть выполнена либо в предположениях теории волн малой амплитуды, либо в предположениях теории длинных волн при пренебрежении членами конвективной инерции. В таких постановках уже в середине 1960-х годов был решен целый ряд задач о возбуждении гравитационных волн в слое несжимаемой жидкости постоянной глубины при заданных подвижках дна той или иной. Однако связать при этом волну цунами непосредственно с порождающим ее сейсмическим очагом не представляется возможным, поскольку дно принимается жестким, и его упругие свойства не учитываются.

Математическая постановка задачи о возбуждении цунами в рамках упругой модели может быть сформулирована следующим образом. Слой однородной сжимаемой жидкости (воды) залегает на однородном упругом полупространстве (породы земной коры) и находится в однородном поле силы тяжести. H — толщина слоя жидкости (глубина океана). На глубине H под дном находится модельный источник, имеющий некоторые свойства реального очага землетрясения (рис. 1). Уравнение Ляме с учетом влияния поля силы тяжести записывается в виде:

$$V_0^2 \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{U} - g \operatorname{div} \bar{U} k = \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial t^2}, \quad 0 < z < H, \quad (1)$$

$$(V_p^2 - V_s^2) \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{U} + V_s^2 \Delta \bar{U} - g \operatorname{div} \bar{U} k = \frac{\partial^2 \bar{U}}{\partial t^2}; \quad z > H. \quad (2)$$

Границные условия на поверхности и дне океана имеют вид:

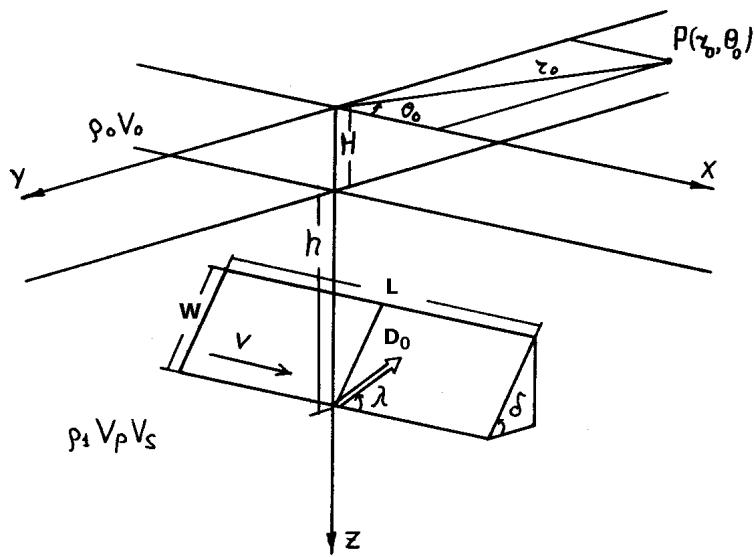


Рис. 1. Модель среды и источника

$$[V_0^2 \operatorname{div} \bar{\mathbf{U}} - g U_z]_{z=+0} = 0, \quad (3)$$

$$[U_z]_{z=H+0} = [U_z]_{z=H-0}, \quad (4)$$

$$\left(\frac{\partial U_r}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial r} \right) \Big|_{z=H+0} = 0; \quad \left(\frac{1}{r} \frac{\partial U_z}{\partial \theta} + \frac{\partial U_\theta}{\partial z} \right) \Big|_{z=H+0} = 0, \quad (5)$$

$$\left[(V_p^2 - 2V_s^2) \operatorname{div} \bar{\mathbf{U}} + 2V_s^2 \frac{\partial U_z}{\partial z} - g U_z \right]_{z=H+0} = \frac{\rho_0}{\rho_1} [V_0^2 \operatorname{div} \bar{\mathbf{U}} - g U_z]_{z=H-0}. \quad (6)$$

Здесь $\bar{\mathbf{U}}(r, \theta, z, t)$ — вектор смещения частиц среды относительно некоторого начального состояния статического равновесия в гравитационном поле, g — ускорение силы тяжести, \bar{k} — единичный вектор по оси z , ρ_0 — плотность воды, V_0 — скорость звука в воде, ρ_1 , V_p , V_s — плотность, скорость продольных и поперечных волн в упругом полупространстве соответственно.

Начальные условия принимаются нулевыми. В момент времени $t = 0$ включается источник, в качестве которого на первом этапе берутся вертикальная и горизонтальная (ориентированная вдоль оси x) сосредоточенные силы величиной Q и S соответственно, приложенные внутри упругого полупространства в точке с координатами $(0, 0, +h)$, зависимость которых от времени вначале принимается в виде единичной ступенчатой функции Хэвисайда. Решение вспомогательной задачи об излучении упругих волн точечным источником в однородной безграничной среде определяет подынтегральные функции для падающих волн. Подынтегральные выражения для отраженных и преломленных волн являются неизвестными функциями и определяются из граничных условий.

Решение системы уравнений (1)–(6) находится методом разделения переменных. В начале рассматривается случай точечного источника в виде двойной пары сил произвольной ориентации. Затем решение обобщается на случай пространственного источника дислокационного типа с движущимся с произвольной конечной скоростью разрывом, описываемого набором параметров: длиной разрыва L , шириной разрыва W , глубиной нижнего

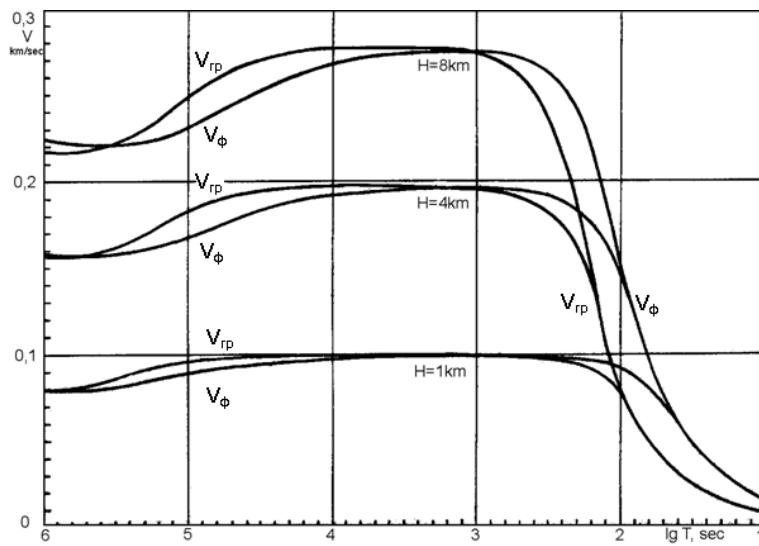


Рис. 2. Дисперсионные кривые фазовой ($V\phi$) и групповой (V_{rp}) скорости волн цунами при различных глубинах океана

края разрыва h_0 , углом падения δ , направлением подвижки λ и величиной смещения противоположных берегов разрыва D_0 (рис. 1). Окончательные формулы имеют довольно сложный вид и мы их здесь не приводим (см., например, [5]).

Полученное решение описывает полное динамическое поле смещений, образуемое волнами различных типов, которые соответствуют различным особенностям подынтегральных функций. Известно, что поверхностные (сейсмические и гравитационные) волны связаны с полюсами подынтегральных выражений, т. е. с корнями дисперсионного уравнения. В данной модели дисперсионное уравнение имеет, кроме корней, соответствующих главной и высшим модам волны Релея, еще один корень, существование которого обусловлено наличием гравитационного члена в уравнениях движения (1)–(2), который не имеет аналога в обычной теории упругости. Соответствующие ему дисперсионные кривые для трех глубин океана представлены на рис. 2. Они показывают дисперсию фазовой и групповой скорости волн цунами в зависимости от периода. Интегрируя вычет в этом полюсе вдоль дисперсионной кривой фазовой скорости, можно получить смещение в волне цунами как функцию времени и расстояния, т. е. теоретическую магнитограмму. Меняя затем параметры источника и среды, можно изучать их влияние на условия возбуждения цунами. В этом, собственно, и состоит главное преимущество рассмотрения процесса генерации цунами в рамках упругой модели.

Детальный анализ условий возбуждения цунами в рамках такой модели был выполнен в работах [6, 7]. Было показано, что наибольшее влияние на амплитуды цунами на глубокой воде (в зоне очага) оказывают механизм и глубина источника. В качестве иллюстрации этих результатов на рис. 3 приведены расчетные магнитограммы цунами для трех основных типов источника — взброс по вертикальной плоскости разрыва, надвиг по пологой плоскости разрыва и чисто сдвиговая подвижка (по вертикальному разрыву). Видно, что наиболее интенсивное цунами возбуждается взбросовой подвижкой по вертикальному разрыву. На рис. 4. показана зависимость амплитуд цунами от глубины источника для взбросовой и сдвиговой подвижек. При $h > 10$ км амплитуды монотонно уменьшаются и на глубине около 60 км составляют около 1/10 от максимума. Во всем диапазоне глубин

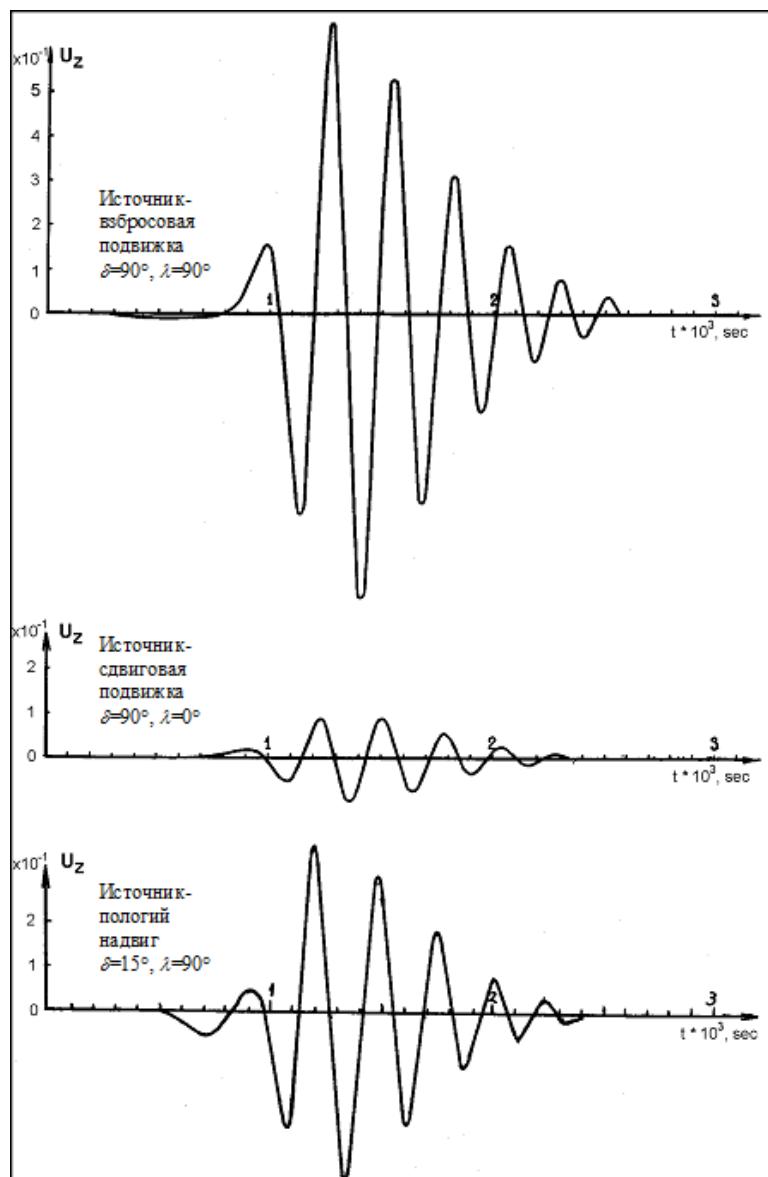


Рис. 3. Теоретические мадеограммы волн цунами для трех различных типов источника

амплитуда цунами от сдвиговой подвижки составляет приблизительно 1/5 амплитуды от взбросовой подвижки.

Эти результаты на тот момент (середина семидесятых годов прошлого столетия) носили пионерский характер и ясно показывали, в каком направлении должна идти работа по совершенствованию методов оперативного прогноза цунами.

Возможность рассмотрения в рамках единой модели как упругих волн, так и волн цунами позволила впервые получить оценки доли сейсмической энергии, излучаемой очагом, которая идет на образование волн цунами [8]. Было установлено, что верхний предел доли сейсмической энергии, переходящей в волны цунами (порядка 10 %) достигается для точечного источника типа вертикального взрыва, находящегося на малой глубине (порядка 10 км) под дном океана. Для параметров модельных источников, соответствующих реаль-

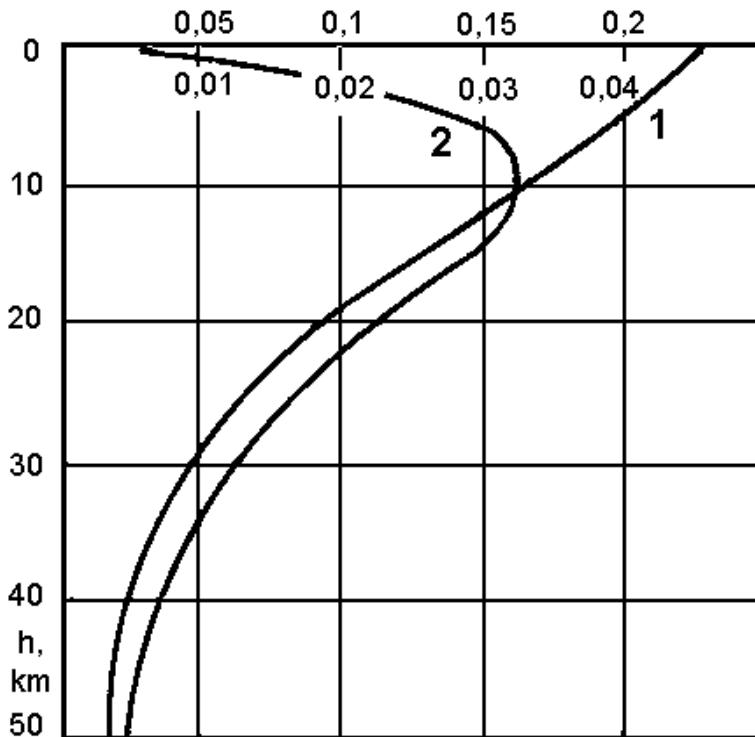


Рис. 4. Зависимость максимальных амплитуд волн цунами от глубины источника (1 — взброс ($\lambda = 90^\circ$) по вертикальной плоскости разлома ($\delta = 90^\circ$), 2 — сдвиг ($\lambda = 0^\circ$) по той же плоскости)

ным очагам цунамигенных землетрясений Тихого океана, доля энергии цунами составляет менее 1 % от полной сейсмической энергии очага.

Моделирование распространения цунами. Упругая модель, являясь важным и информативным средством изучения процесса генерации цунами в очаговой области, не позволяет, тем не менее, изучать процесс дальнейшего распространения цунами в открытом океане, так как не учитывает изменения глубины водного слоя. Глубина между тем является ведущим фактором, определяющим процесс распространения цунами и наката на берег. Поэтому уже на самых ранних этапах применения математического моделирования для изучения цунами возникла идея разделения задачи на две части — генерацию в области источника и распространения в океане с реальным рельефом дна. Процесс генерации рассматривался в рамках поршневой модели, когда смещения дна океана, задаваемые произвольно или получаемые путем решения задачи о деформации поверхности упругого полупространства под действием внутреннего источника того или иного типа (такая задача была решена в работе [9]), вводятся в уравнение неразрывности гидродинамической системы, описывающей движение поверхностных гравитационных волн в жидкости. Чаще всего в качестве такой системы используется система уравнений мелкой воды, которая затем решается численно для модельного рельефа, аппроксимирующего реальные участки акватории океана:

$$\begin{aligned}
 H_t + (uH)_x + (vH)_y &= 0, \\
 u_t + uu_x + vu_y + gH_x &= gD_x, \\
 v_t + uv_x + vv_y + gH_y &= gD_y
 \end{aligned} \tag{7}$$

где $H(x,y,t) = \eta(x,y,t) + D(x,y,t)$ — полная глубина воды в данной точке, η — высота волны, отмеряемая от невозмущенного уровня, $D(x,y,t)$ — функция, описывающая рельеф дна (в том числе и его движение в очаговой области D_0 до момента времени t_0), $u(x,y,t)$, $v(x,y,t)$ — скорости вдоль осей x и y соответственно, g — ускорение свободного падения.

Функция $D(x,y,t)$ задается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned} D(x,y,t) &= D_0(x,y,t), & t \leq t_0, \\ D(x,y,t) &= D_0(x,y,t_0), & t > t_0. \end{aligned} \quad (8)$$

В задачах возбуждения цунами параметр t_0 (время движения дна) обычно мал по сравнению с периодом волны, так что смещения свободной поверхности в очаговой области практически повторяют вертикальные движения дна. В такой постановке уже в середине 1970-х годов в ВЦ СО АН СССР были выполнены первые расчеты гипотетических и реальных исторических цунами на конкретных участках акватории Курило-Камчатского региона [10, 11]. На рис. 5 воспроизведен результат одного из первых таких расчетов, выполненных на ЭВМ БЭСМ-6, на примере моделирования реального цунамигенного события в районе Южных Курил (циунами Немуро-оки 17 июня 1973 года). Расчет был выполнен на сетке размерностью 108 на 45 с пространственным шагом $\Delta x = \Delta y = 4,76$, в узлах которой аппроксимировался подводный рельеф изучаемого участка океана, оцифрованный вручную с батиметрической карты. Стоит отметить, что быстродействие самой мощной из имевшихся в то время в ВЦ СО АН СССР ЭВМ (БЭСМ-6) не позволяло выполнять опережающие расчеты цунами, поскольку требовало примерно часа процессорного времени на час физического времени распространения волны.

В процессе этих работ возникла идея проведения численных экспериментов по изучению особенностей генерации и распространения цунами не на реальных участках акватории океана, а на модельном рельефе, характерном для зон островных дуг, где происходит большинство цунамигенных землетрясений. Такой модельный бассейн, сохраняя основные особенности морфологии островодужного склона (шельф, материковый склон, глубоководная терраса, континентальный и океанический борта глубоководной впадины, океаническое плато) позволяет разделить эффекты влияния источника (очага землетрясения) и эффекты распространения, определяющиеся в основном подводным рельефом дна. Такая модель оказалась весьма полезной и продуктивной и позволила изучить влияние механизмов очагов землетрясения на характер вдольберегового распределения высот волн цунами и на их расчетную интенсивность, определяемую в баллах шкалы Соловьева–Имамуры [12]. Было показано, что распределение высот цунами вдоль побережья типичной островной дуги имеет колоколообразную форму с шириной зоны главного максимума порядка размера очага, т. е. 100–150 км (рис. 6), при удалении от которой вдоль берега амплитуды цунами быстро падают. Формирование такой отчетливо выраженной зоны максимума является результатом совместного действия направленности излучения сейсмического источника, эллиптичности очага цунами и фокусирующего действия наклонного рельефа дна. Из этих трех факторов наибольшее значение имеет последний.

В рамках этого подхода впервые была получена теоретическая зависимость интенсивности цунами по шкале Соловьева–Имамуры I от момент-магнитуды подводного землетрясения M_W в виде соотношения

$$I = 3,55 \cdot M_W - 27,1.$$

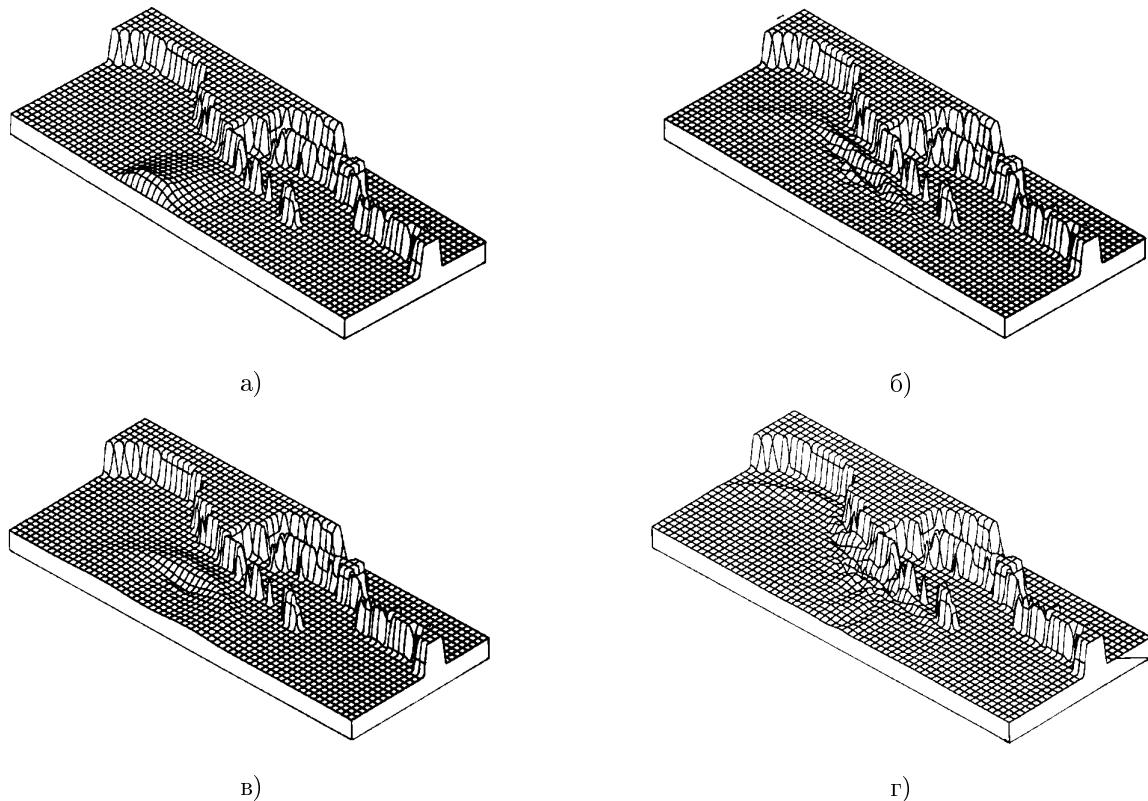


Рис. 5. Численное моделирование цунами Немуро-оки 17 июня 1973 года в районе Южных Курил [11].
Форма начального возвышения поверхности океана через 12 с (а) после землетрясения и волновая картина через 170 (б), 294 (в) и 810 (г) с

Полученная зависимость сопоставлена с реальными данными по наблюдениям цунами в зонах островных дуг типа Японской, Курило-Камчатской, Алеутской, и обнаружено их хорошее соответствие. Практически все события попадают в доверительный интервал ± 1 от расчетного значения интенсивности, что соответствует реальной точности определения этого параметра.

Примерно в это же время была осознана необходимость создания каталогов и баз данных по наблюдениям цунами и сильных землетрясений, которые могли бы использоваться в качестве информационной поддержки теоретических исследований многих аспектов проблемы цунами. Такая возможность появилась в середине 1980-х годов с появлением в институте первых средств вычислительной техники (машины типа СМ-4), позволяющих интерактивное взаимодействие пользователя с вычислительным комплексом и средствами визуализации (экраном дисплея и планшетными плоттерами). В лаборатории цунами, созданной в ИВМ и МГ СО РАН в 1988 году, были начаты работы по составлению каталога наблюдений исторических цунами вначале в Курило-Камчатском регионе, а позднее во всем Тихом океане [13]. С появлением первых персональных ЭВМ, имевших в составе своего матобеспечения средства поддержки баз данных (например, СУБД MS Access), эти каталоги были конвертированы в базы данных [14]. Особое внимание при этом было уделено созданию средств выборки и визуализации накопленных данных в виде специализированных графических оболочек, обеспечивающих удобное взаимодействие пользователя с данными, картами и моделями. В настоящее время в лабо-

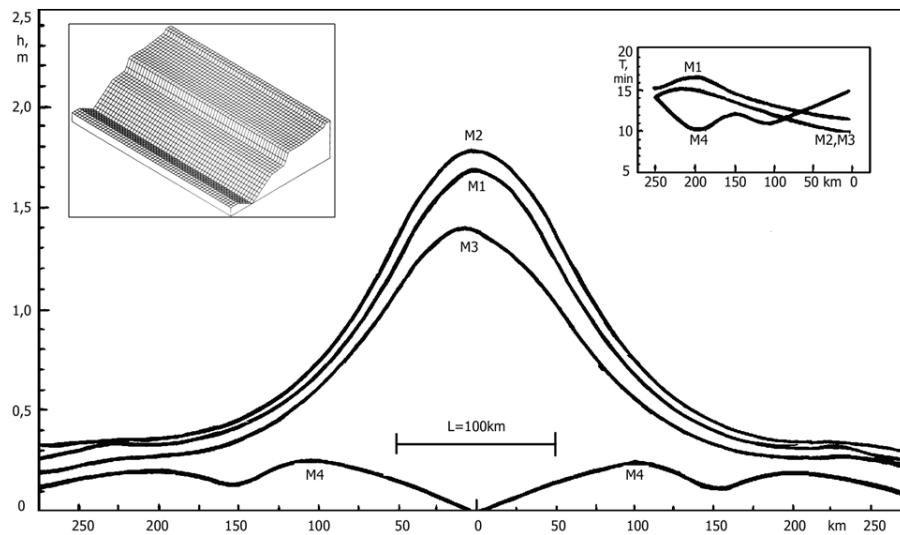


Рис. 6. Распределение максимальных высот волн цунами вдоль берега для источников типа пологого надвига (M1), крутого взброса (M2), взбросо-сдвига (M3) и сдвиговой подвижки (M4). Отрезком прямой линии показаны положение и длина сейсмического разлома. На врезках — модельный рельеф, на котором производился расчет (слева вверху), изменение периода максимальной волны вдоль берега для тех же источников (справа вверху)

ратории цунами ИВМ и МГ СО РАН поддерживается Глобальная база данных по наблюдениям цунами в Мировом океане GTDB (Global Tsunami DataBase), содержащая подробные сведения о параметрах очагов более чем 2250 событий и проявлениях цунами на побережье [15]. База покрывает весь период исторических наблюдений (с 2000 года до н. э. по настоящее время) и содержит свыше 25000 наблюдений высот цунами. Веб-версия базы данных поддерживается на сервере лаборатории цунами ИВМ и МГ СО РАН (<http://tsun.sscc.ru/nh/tsunami.php>). База снабжена специализированной графической оболочкой PDM/TSU (<http://tsun.sscc.ru/PDM.htm>), имеющей встроенные процедуры выборки, анализа и визуализации данных на конкретной картографической основе (цифровой карте местности) [16]. Пример визуализации информации, содержащейся в GTDB для Дальневосточного региона РФ, приведен на рис. 7.

Оперативный прогноз цунами. Двумя главными научно-практическими задачами, связанными с проблемой цунами, являются **оперативный прогноз** и предварительное **цунамирайонирование побережья**. Оперативный прогноз осуществляется по факту возникновения сильного подводного землетрясения Службой предупреждения о цунами (СПЦ), действующей на Дальневосточном побережье РФ с 1958 года. Прогноз осуществляется тремя оперативными центрами — во Владивостоке, Южно-Сахалинске и Петропавловске-Камчатском, по трем основным зонам — Курило-Камчатское побережье, Японское море, Охотское море. Используется так называемый магнитудно-географический принцип прогноза, согласно которому землетрясение считается цунами-генным при превышении магнитудой значения **7.0** и положении его эпицентра под морским дном или в пределах береговой линии [17]. Выполненный в 2010 году в работе [18] анализ эффективности работы СПЦ за 50 лет (с 1958 по 2009 годы) показал, что в целом служба предупреждения о цунами на Дальневосточном побережье функционирует вполне надежно и без крупных провалов (т. е. пропусков опасных цунами) и накопила определен-

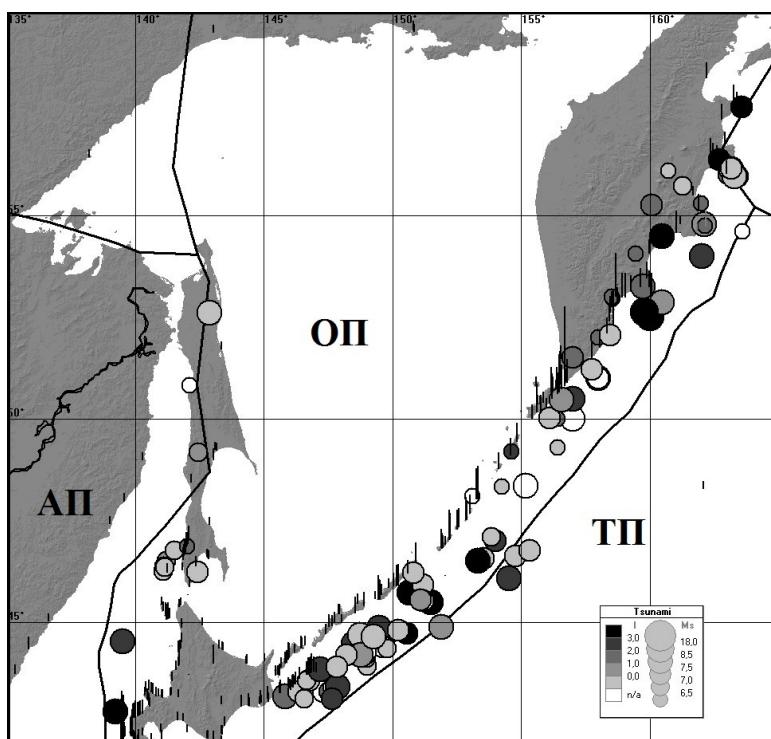


Рис. 7. Положение эпицентров 110 региональных цунамигенных событий, вызвавших зарегистрированные цунами на Дальневосточном побережье РФ с 1737 по 2015 год. Размер кружков пропорционален магнитуде землетрясения, плотность серого тона отражает интенсивность цунами (по шкале Соловьева–Имамуры). Вертикальными черными линиями показаны наблюдавшиеся высоты цунами от этих очагов. Сплошными ломаными линиями показаны границы плит, ТП — Тихоокеанская плита, ОП — Охотская плита, АП — Амурская плита

ный опыт в прогнозировании региональных и удаленных цунами. Основной проблемой службы является высокая доля ложных тревог при обработке региональных событий, достигающая 75 % от всех поданных. Это является следствием стохастической природы генерации цунами и разнообразия механизмов их возбуждения. Статистика наблюдений цунами в Тихоокеанском регионе за 1991–2015 гг. показывает, что все подводные землетрясения становятся реально цунамиопасными только начиная с магнитуды 8 (рис. 8). Однако поднимать на этот уровень пороговое значение магнитуды нельзя из-за риска пропуска сильного цунами (с высотами до 10–15 м) при относительно слабых землетрясениях, с магнитудой порядка 7. Такие особые землетрясения, называемые цунами-землетрясениями (tsunami-earthquakes по терминологии Х. Канамори [19]) в течение 20-го века в Курило-Камчатском регионе происходили трижды — в 1923, 1963 и 1975 годах.

Снижение доли ложных тревог может быть достигнуто как за счет использования дополнительной гидрографической информации от подводных кабельных и буйковых регистраторов цунами, так и путем пересмотра географических границ для выпуска тревоги цунами для землетрясений в различных магнитудных диапазонах. Такой пересмотр может быть сделан на основе анализа фактических наблюдений цунами и результатов сценарных расчетов распространения волн внутри каждой из трех основных цунамиgenных зон (Курило-Камчатская зона, Охотское море, Японское море). Результаты расчетов убедительно показывают (и это подтверждается анализом реальных наблюдений), что вдоль-

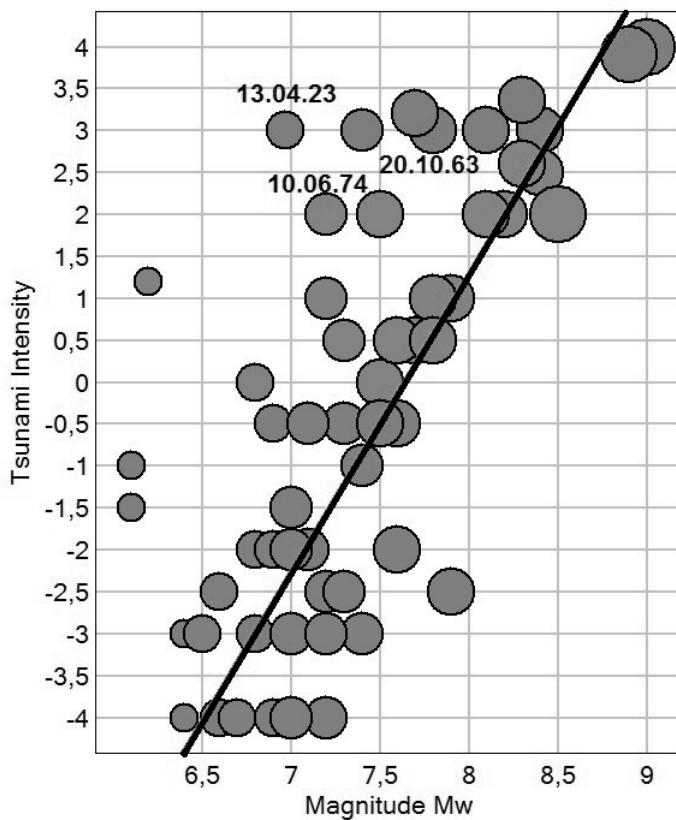


Рис. 8. Зависимость интенсивности цунами I от магнитуды Mw для цунамигенных событий, произошедших в Дальневосточном регионе РФ с 1737 по 2017 год. Сплошной линией на рисунке показана теоретическая зависимость $I = -27.1 + 3.6Mw$, полученная в работе [12]. Цунами-землетрясения 1923, 1963 и 1975 гг. помечены датами

береговое распределение максимальных высот имеет ограниченную протяженность и для большинства цунамигенных землетрясений, за исключением предельно сильных (с магнитудой более 8.5), имеет размеры, сопоставимые с размерами самого очага, т. е. 150–200 км (рис. 6). Действующий же регламент работы СПЦ предусматривает выпуск тревоги цунами при любом цунамигенном землетрясении для всего побережья зоны, протяженность которого может достигать 1500 км.

Еще один резерв для совершенствования работы службы заключается в переходе от бинарного прогноза (угроза цунами/нет угрозы цунами) к оценке возможных высот в конкретных пунктах побережья. На первом этапе это может быть сделано путем разбиения угрозы на три уровня — сильное цунами/цунами/возможное (слабое) цунами, при соответствующей модификации действий служб МЧС и местных властей при угрозе разного уровня. Такое разбиение могло бы осуществляться на основе предвычисления ожидаемых высот с использованием хорошо развитых в настоящее время средств моделирования цунами, а также алгоритмов коррекции прогноза по мере поступления сведений о фактической регистрации цунами региональной метеографической сетью с учетом возросших возможностей оперативного получения информации с приборов регистрации уровня.

Цунамирайонирование побережья. Предварительное цунамирайонирование побережья — это получение и картирование долговременных оценок максимальных ожидаемых высот цунами на побережье и их обеспеченности (повторяемости). Долговременные

оценки опасности цунами необходимы для (1) 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). Хозяйственное освоение прибрежных территорий в цунамиопасных районах требует также наличия оценок долгосрочного цунами-риска, которые могут быть получены на основе детальных карт цунамиопасности конкретных участков побережья и карт заливания для отдельных населенных пунктов, гаваней и бухт.

Задача оценки долгосрочной цунамиопасности является во многом аналогичной задаче оценки сейсмоопасности. Последняя во всех странах решается сейчас на основе методики PSHA (Probabilistic Seismic Hazard Assessment), положенной также в основу проекта создания карты общего сейсмического районирования территории России ОСР-2016 [20]. При выполнении этого проекта такая опасность подводных землетрясений как цунами, к сожалению, не принималась во внимание, хотя она является основной для Дальневосточного региона, где происходит 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 (зон ВОЗ) в цунамиопасных районах могут и должны быть использованы для оценки цунамиопасности Дальневосточного и других побережий России.

В настоящее время существует современная, достаточно детально разработанная методика РТНА (Probabilistic Tsunami Hazard Assessment) для вероятностной оценки цунамиопасности [21, 22]. Эта методика широко используется в США, Канаде, Австралии, Новой Зеландии, в западной Европе как для обзорного цунамирайонирования протяженных участков побережья, так и для расчета детальных карт заливания отдельных населенных пунктов, гаваней и портов. В основе методики РТНА лежит построение вероятностной сейсмотектонической модели основных цунамигенных зон, угрожающих защищаемому побережью, и применение численных моделей возбуждения и распространения цунами для расчета ожидаемых высот цунами в конкретных пунктах побережья. Поскольку изменчивость высот волн цунами вдоль берега является достаточно сильной, 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 обзорной карты цунамирайонирования для крупных участков побережья, построенной в масштабе порядка 1:2 000 000, является совершенно необходимым. Помимо того, что такая карта позволяет количественно сравнивать различные побережья в смысле их цунамиопасности, она также служит основой для построения карт детального цунамирайонирования, поскольку при ее построении должен быть выполнен основной объем работ по созданию сейсмотектонической модели цунамигенного региона. Такого рода карты цунамиопасности Дальневосточного и Черноморского побережий России были созданы в рамках совместного проекта ИВТ СО РАН и ИВМ и МГ СО РАН, поддержанного грантом РНФ 14-17-219 (руководитель Л. Б. Чубаров).

Заключение. Математическое моделирование представляет собой одно из наиболее мощных и гибких средств изучения сложных природных явлений, таких как волны цунами, но оно должно применяться с полным осознанием всех ограничений, вытекающих из несовершенства используемых моделей и ограниченности имеющихся реальных данных наблюдений. Две главные научно-практические задачи в проблеме цунами — это опера-

тивный прогноз и предварительное цунамириайонирование побережья. Основная проблема оперативного прогноза цунами на Дальневосточном побережье РФ заключается в снижении числа ложных тревог, что может быть достигнуто путем ограничения размеров зон для выпуска тревоги при землетрясениях различной магнитуды и переходу от бинарной к трехуровневой схеме подачи тревоги. Основная проблема оценки цунамиопасности океанического побережья, имеющего перед собой зону субдукции, состоит в получении реалистичных оценок места и времени возникновения в ближайших сегментах этой зоны мега-землетрясения с магнитудой 9.0 и выше. Получение таких оценок представляет собой сложную научно-практическую проблему и фактически сводится к решению задачи долгосрочного прогноза сильнейших землетрясений.

Список литературы

1. Topics 2000. Natural catastrophes — the current position. Special Millennium Issue // Munich Re Group, 2001.
2. Соловьев С. Л. Основные данные о цунами на Тихоокеанском побережье СССР, I937—I976 гг. // В кн.: Изучение цунами в открытом океане, М., Наука, 1978, С. 61–136.
3. Miller D. J. Giant Waves in Lituya Bay, Alaska // Geological Survey Professional Paper 354-C, U.S. Government Printing Office, Washington, 1960, Р. 50–85.
4. Гусяков В. К. Цунами на Дальневосточном побережье России: историческая перспектива и современная проблематика // Геология и геофизика. 2016. № 9. С. 1601–1615.
5. Гусяков В. К. Возбуждение волн цунами и океанических волн Релея при подводном землетрясении // Математические проблемы геофизики. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР. 1972. Вып. 3. С. 250–272.
6. Гусяков В. К. О связи волны цунами с параметрами очага подводного землетрясения // Математические проблемы геофизики, Новосибирск: ВЦ СО АН СССР. 1974. Вып. 5. Ч. 1. С. 118–140.
7. Алексеев А. С., Гусяков В. К. Об оценке цунамиопасности подводных землетрясений // Землетрясения и предупреждение стихийных бедствий: Труды 27-го Международного геологического конгресса. Москва, 4–14 августа 1984 г. Т. 6. М.: Наука, 1984. С. 127–133.
8. Гусяков В. К. Расчет энергии волн цунами / В кн.: Некорректные задачи математической физики и проблемы интерпретации геофизических наблюдений, Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1976, С. 46–64.
9. Алексеев А. С., Гусяков В. К., Чубаров Л. Б., Шокин Ю. И. Численное исследование генерации и распространения волн цунами при реальной топографии дна. Линейная модель / Изучение цунами в открытом океане, М.: Наука, 1978, С. 5–20.
10. Гусяков В. К. Остаточные смещения на поверхности упругого полупространства / Условно-корректные задачи математической физики в интерпретации геофизических наблюдений, Новосибирск: ВЦ СО РАН, 1978. С. 23–51.
11. Гусяков В. К., Чубаров Л. Б. Численное моделирование Шикотанского (Немуро-Оки) цунами 17 июня 1973 года / В кн.: Эволюция цунами от очага до выхода на берег, М.: Радио и связь, 1982, С.16–24.
12. Гусяков В. К., Чубаров Л. Б. Численное моделирование возбуждения и распространения цунами в прибрежной зоне // Физика Земли. 1987. № 11. С. 53–64.
13. Гусяков В. К., Осипова А. В. Автоматизированный каталог землетрясений и цунами Курило-Камчатского региона // Вычислительные технологии. 1992. Т.1. № 3. С. 197–204.
14. Гусяков В. К., Осипова А. В. База данных по землетрясениям и цунами Курило-Камчатского региона // Препринт ВЦ СО РАН. 1992. № 976.

15. Гусяков В. К., Калашникова Т. В. Глобальная база данных по цунами / Global tsunami database (GTDB). Зарегистрирована в ФГУ ФИПС (Роспатент) 16 сентября 2016 года, свидетельство № 2016621269.
16. Лысковская Е. В., Гусяков В. К. Графическая оболочка PDM/TSU (Parametric Data Manager for Tsunami Database) для работы с базой данных по цунами. Зарегистрирована в ФГУ ФИПС (Роспатент) 16 сентября 2016 года, свидетельство № 2016660574.
17. Алексеев А. С. , Гусяков В. К. Сейсмическая система прогноза цунами. Принцип построения // Препринт № 428, Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1983.
18. Гусяков В. К. Магнитудно-географический критерий прогнозирования цунами: анализ практики применения за 1958–2009 гг. // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 5–21.
19. Kanamori H. Mechanism of tsunami earthquakes // Phys. Earth Planet. Inter. 1972. V. 6. P. 346–359.
20. 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.
21. Power W., Downes G. Tsunami hazard assessment / Volcanic and tectonic hazard assessment for nuclear facilities. Edited by Connor C., Chapman N., Connor L. Cambridge Univ. Press. 2009. P. 276–306.
22. Knighton J., Bastidas L. A proposed probabilistic seismic tsunami hazard analysis methodology // Nat Hazards. 2015, V. 78. P. 699–723.



Гусяков Вячеслав Константинович, e-mail: gvk@sscc.ru. Д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией математического моделирования цунами (<http://tsun.sscc.ru/tsulab>) Института вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (Новосибирск). Закончил геолого-геофизический факультет Новосибирского государственного университета в 1971 году и аспирантуру Вычислительного центра СОАН СССР в 1974 году по специальности „Геофизика“. Область научных интересов — изучение природных катастроф (цунами, землетрясений, вулканических извержений, космических опасностей), разработка методов их прогнозирования. Председатель (в 1995–2003 гг.) Комиссии по цунами Международного геодезического и геофизического союза (МГГС), заместитель председателя Комиссии по геориску МГГС, участник многих экспедиций в России и за рубежом по изучению следов разрушительных цунами, автор более 100 науч-

ных публикаций по проблеме цунами и природных катастроф.

Gusakov Viacheslav Konstantinovich, e-mail: gvk@sscc.ru. Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Tsunami Laboratory (<http://tsun.sscc.ru/tsulab>) of the Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the SD RAS (Novosibirsk). He graduated from the Geological and Geophysical Department of the Novosibirsk State University in 1971 and got his PhD in the field of geophysics at the Computing Center of the SD Soviet Academy of Sciences in 1974. The area of research interests is the study of natural disasters (tsunamis, earthquakes, volcanic eruptions, cosmic hazards), development of methods for their prediction. Chairman (in 1995–2003) of the IUGG Tsunami Commission, Vice-Chair of the IUGG GeoRisk Commission, participant of many expeditions in Russia and abroad to study the traces of the devastating tsunamis, author of more than 100 scientific publications on the problem of tsunamis and natural disasters.