

УДК 550.345

© В. К. Гусяков

Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, г. Новосибирск
gvk@sscc.ru

МЕТОДЫ И ПРОБЛЕМЫ ОЦЕНКИ ЦУНАМИОПАСНОСТИ МОРСКИХ ПОБЕРЕЖИЙ

Статья поступила в редакцию 31.05.2017, после доработки 06.06.2017.

Обсуждаются методы и подходы, используемые в России и за рубежом для картирования цунамиопасности на побережьях, подверженных воздействию волн цунами, т. е. для решения задачи предварительного цунамирайонирования побережья. Эта задача состоит в получении оценок высот цунами на берегу с заданной вероятностью превышения в течении определенного интервала времени. В настоящее время она решается на основе построения сейсмотектонических моделей основных цунамигенных зон, угрожающих данному побережью и применения численных моделей возбуждения и распространения цунами в океане с реальным рельефом дна для получения расчетного каталога высот волн на побережье. Отмечается методологическая общность этой задачи с задачей оценки сейсмоопасности прибрежных территорий, которая во всех странах сейчас решается на основе методики *Probabilistic Seismic Hazard Assessment*. Применительно к задаче цунамирайонирования подобная методика получила название *Probabilistic Tsunami Hazard Assessment*. При всех известных недостатках этой методики, как принципиальных, так и технических, она может и должна быть использована для картирования цунамиопасности на побережьях России. Обсуждаются подходы к рациональному выбору масштабов карт цунамиопасности, к определению набора картируемых параметров, проблема оценки максимально возможного события.

Ключевые слова: цунами, цунамиопасность, цунамириск, цунамирайонирование, сейсмотектоника, очаги землетрясений.

V. K. Gusiakov

Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SD RAS, Novosibirsk, Russia

METHODS AND PROBLEMS OF TSUNAMI HAZARD ASSESSMENT OF MARINE COASTS

Received 31.05.2017, in final form 06.06.2017.

The paper discusses methods and approaches used in Russia and abroad for mapping tsunami hazard on the coasts affected by tsunami waves that is for solving the problem of the preliminary tsunamization of the coast. This task consists in obtaining estimates of the tsunami heights on the coast with a given probability of exceedence during a certain time interval. Currently, this problem is being solved based on constructing seismotectonic models of the main tsunamigenic zones threatening a particular coast as well as numerical models of tsunami generation and propagation in the ocean with a real bathymetry to create a computed catalog of wave heights on the coast. The methodological commonality of this problem with the problem of seismic zonation of coastal territories is noted. The latter is solved now in all countries on the basis of the methodology of the *Probabilistic Seismic Hazard Assessment*. A similar methodology for tsunamization is called *Probabilistic Tsunami Hazard Assessment*. With all known shortcomings of this technique, both fundamental and technical, it can and should be used for mapping of tsunami hazard on the coasts of Russia. The problems of rational choice of the scale of tsunami hazard maps, selection of a set of charted parameters, and the problem of estimating the maximum possible event are discussed.

Key words: tsunami, tsunami hazard, tsunami risk, tsunamization, seismotectonics, earthquake sources.

Ссылка для цитирования: Гусяков В. К. Методы и проблемы оценки цунамиопасности морских побережий // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2017. Т. 10, № 3. С. 26—38.

For citation: Gusiakov V. K. Methods and problems of tsunami hazard assessment of marine coasts. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2017, 10, 3, 26—38.

DOI: 10.7868/S2073667317030029.

Цунамирайонирование актуально практически для всей береговой линии Мирового океана, включая те ее участки, которые не имеют в непосредственной близости от себя подводных сейсмоактивных зон. Это обусловлено, во-первых, способностью цунами распространяться на большие расстояния, во-вторых, возможностью их образования при подводных оползнях и обвалах, которые могут возникать на любых участках акватории, имеющих даже незначительные уклоны дна (порядка 1°) и подчас вне всякой связи с сейсмичностью. Такие цунами имеют, как правило, локальный характер, но способны давать высокие заплески (десятки, иногда сотни метров) на ближайших участках побережья.

В настоящее время цунамириск для большинства участков побережья мирового океана возрастает в прямой связи с увеличением плотности застройки и количеством населения. По данным МОК/ЮНЕСКО свыше 50 % мирового населения, т. е. примерно 3.5 млрд человек, живут в районах, так или иначе связанных с морским побережьем. Ожидается, что эта доля возрастет до 75 % к 2025 г. В США около 80 % населения проживает в зоне, удаленной от побережья не более чем на 50 миль [1]. В Японии свыше 90 % населения живет в 10-километровой зоне, прилегающей к береговой линии, вдоль которой заняты полностью все сколько-нибудь пригодные для строительства участки. В большинстве развитых стран морское побережье является районом практически сплошной застройки и интенсивного развития индустрии туризма, доход от которой составляет значительную часть национального бюджета. В этой же зоне идет строительство высокотехнологичных объектов, таких как водозаборы атомных станций, мощные портовые терминалы, предприятия химической и нефтеперерабатывающей промышленности, корабельные причалы, включая стоянки для атомных подводных лодок. В последние десятилетия началось интенсивное освоение шельфа со строительством нефтяных и газодобывающих платформ и подводных нефте- и газопроводов. Все эти обстоятельства делают задачу предварительного цунамирайонирования побережья чрезвычайно актуальной.

С формальной точки зрения решение фундаментальной проблемы количественной оценки риска (КОР) природной или техногенной катастрофы состоит в вычислении риска (и связанных с ним статистик) в одной точке в связи с событием, происшедшим в некоторой другой точке [2] (рис. 1).

Три главных компоненты модели оценки риска:

- 1) вероятностная модель источника, определяющая интервалы возникновения и энергетический масштаб (магнитуды) событий;
- 2) детерминированная модель распространения, связывающая событие в районе источника с вызываемым им эффектом в районе воздействия (эта модель, впрочем, также может содержать вероятностные элементы);
- 3) детерминированная либо вероятностная модель воздействия опасного явления на сооружения и население.

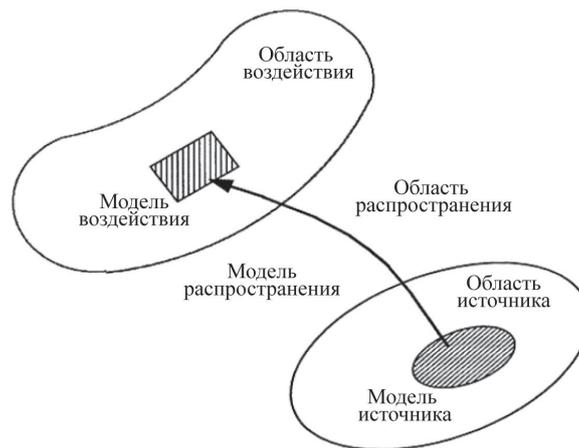


Рис. 1. Общая схема и основные компоненты решения задачи по получению оценок цунамириска (цунамирайонирования побережья).

Fig. 1. A general sketch and basic components of the tsunami risk assessment problem (the coastal tsunamizone).

Эта общая схема, применимая к задаче оценки риска для любой природной или техногенной катастрофы, является особенно наглядной для случая оценки риска цунами, когда источник опасности (очаг подводного землетрясения) пространственно отделен, иногда значительным расстоянием (до 15—16 тыс. км), от объекта воздействия (население, здания и инженерные сооружения в прибрежной зоне). Проблема КОР допускает аналитическое решение лишь в некоторых простейших случаях. В общем же случае необходимо применять численные методы для расчета риска, иногда с привлечением методов Монте-Карло. Ниже рассматриваются компоненты этой схемы применительно к проблеме цунамирайонирования побережья.

Постановка задачи о цунамирайонировании побережья, основные понятия и определения. Основные понятия, используемые в решении проблемы цунамирайонирования побережья вполне аналогичны понятиям и определениям, применяемым в решении задачи сейсмрайонирования [3].

Цунамирайонирование — оценка цунамиопасности и цунамириска и их картирование на определенных участках побережья.

Цунамиопасность — вероятность превышения (или не превышения) определенной высоты волны h метров в данном пункте побережья в течение интервала времени T лет.

Цунамириск — вероятность потерь от воздействия цунами за определенный промежуток времени в соответствии с расчетной цунамиопасностью и уязвимостью объектов (число жертв, материальные потери, экологический ущерб).

Цунамиуязвимость — отношение ожидаемых затрат по восстановлению объекта, подверженного воздействию цунами к его полной стоимости (измеряется числовым коэффициентом от 0.0 до 1.0).

Общая формула для оценки цунамириска совпадает с общей формулой для оценки рисков любых природных и техногенных катастроф [4]:

$$R = H \times V \times S,$$

где R — цунамириск, H — цунамиопасность, V — цунамиуязвимость, S — стоимость восстановления поврежденных объектов. В соответствии с этой формулой цунамириск становится нулевым в случае равенства нулю любого из множителей, т. е. цунамиопасности (отсутствия воздействия волн цунами), уязвимости (например, все сооружения обеспечены специальной инженерной защитой), или отсутствия строений и вообще материальных ценностей на побережье.

Очевидно, что при цунамирайонировании важно учитывать не только цунами максимальной возможной высоты, но и частоту повторения волн меньшей высоты — их *повторяемость*. В связи с этим одним из наиболее важных понятий в задаче цунамирайонирования является понятие *повторяемости цунами различной высоты в данной точке побережья*, под которой понимается средняя частота $F = N/T$ случаев цунами с высотой h или более в данном пункте побережья в течение времени T .

Также очевидно, что следует отличать *повторяемость возникновения цунамигенных событий* данной интенсивности (магнитуды) в очаговой области от *повторяемости высот цунами* в данном пункте побережья. В сейсмологии для этих целей используются понятия *сейсмической активности* как характеристики очаговой деятельности землетрясений [5] и *сейсмической сотрясаемости* как характеристики поверхностного эффекта землетрясений [6], измеряемой в баллах по той или иной шкале. *Сейсмическая активность* A , как известно, это повторяемость, т. е. средняя частота $A = A(K)$ повторения землетрясений определенной силы (измеряемой величиной энергетического класса K или магнитуды M) в очаговой области определенного размера [5]. *Сейсмическая сотрясаемость* B — это средняя частота $B = B(I)$ повторения в данном пункте сейсмических сотрясений данной интенсивности I или более [6].

По аналогии с этими понятиями, наиболее подробно рассмотренными в работе [7], можно ввести понятия *цунамиактивности*, определив его как среднюю частоту $TA = A(I)$ возникновения цунамигенных событий определенной силы (интенсивности) в данной очаговой зоне и понятие *заливаемости*, определив ее как среднюю частоту повторения $TR = R(h)$ в данной точке волн определенной высоты h . Обратная к ней величина $T = 1/TR$ — *средний период повторения* волн высотой h и более в данном береговом пункте (*return period*). Однако в литературе по проблеме цунами понятие *заливаемости* не получило распространения, взамен его используется понятие *повторяемости цунами*, при этом не всегда четко оговаривается [8], о какой повторяемости идет речь: повторяемости цунамигенных событий в очаговой зоне или повторяемости высот цунами в конкретной точке побережья.

Графики заливаемости, т. е. графики распределения числа заливаний N по высоте волн h $N = F(h)$ формально похожи на графики повторяемости цунамигенных событий $N = F(I)$ в зависимости от их интенсивности I , но имеют несколько другой геофизический смысл. График заливаемости отражает не только общую сеймотектоническую закономерность возникновения цунами (заключенную в графике повторяемости цунамигенных событий), но и локальные условия распространения и набегания волн, среди которых наиболее важным является конфигурация берега и рельеф прилегающих участков дна.

Подобно сейсмической активности, цунамиактивность всегда относится к величине области, где располагаются очаги цунами — к некоторой единице ее объема или площади. Иная ситуация имеет место для понятия заливаемости, которая является характеристикой конкретной точки побережья (вместе с ее некоторой окрестностью). В принципе, каждая точка побережья подвержена воздействию волн от каждого очага в пределах данного бассейна. Вопрос состоит в том, как часто она заливается волнами той или иной высоты. При этом очевидно, что небольшие локальные очаги могут дать в точке такой же эффект заливания, как и более удаленные, но сильные цунами. В корректном учете вклада всех возможных очагов цунами в колебания уровня на данном участке побережья и заключается одна из главных проблем расчета заливаемости.

Основная задача цунамирайонирования состоит в том, чтобы по известному распределению очагов в некоторой области океана найти заливаемость в любой заданной точке побережья. В этом смысле постановка задачи цунамирайонирования полностью аналогична задаче сейсморайонирования с той разницей, что при ее решении необходимо учитывать весьма удаленные (на расстояния в несколько тыс. и более км) очаги, вкладом которых в локальную сотрясаемость в задачах сейсморайонирования обычно пренебрегается. Другим отличием является необходимость учета цунами несейсмического происхождения (оползневых, вулканогенных, метеорологических), вклад которых в общую цунамиопасность побережья в ряде районов может быть сопоставимым или даже преобладающим. Важным дополнительным отличием является также трудоемкость пересчета параметров источника, заданных в очаговой области в интенсивность воздействия в заданной точке. В сейсмологии этот пересчет осуществляется на основе достаточно простых инженерных формул, реализующих зависимость «магнитуда-балл», полученных на основе корреляционных соотношений или простых модельных представлений о распространении сейсмических волн в однородной (как правило) среде. В задачах распространения цунами неоднородность глубин морского дна является наиболее существенным фактором, влияющим на кинематику и динамику процесса распространения, поэтому подобный пересчет требует решения системы уравнений в частных производных (в простейшем случае — линейной модели мелкой воды), поэтому расчет каждого сценарного варианта является существенно более затратным.

Существующие подходы к задаче цунамирайонирования побережья. Несмотря на то что официальная карта цунамирайонирования побережья РФ до настоящего времени отсутствует, имеющиеся работы по этой проблеме весьма многочисленны. Вся совокупность отечественных публикаций может быть разделена на две примерно равные группы, соответствующие двум различным подходам к проблеме цунамирайонирования, которые могут быть условно названы *историко-вероятностным* и *детерминированным*.

В России исторически первым начали применять *детерминированный* подход, в рамках которого в начале 1960-х гг. были получены первые оценки возможных высот цунами на Дальневосточном побережье СССР. В основе его лежит применение расчетных моделей возбуждения и распространения цунами для одного или серии гипотетических источников, представляющих очаги цунамигенных землетрясений. Он позволяет при задании некоторого набора параметров источника и наличии цифровой батиметрии исследуемой области получить распределение высот волн вдоль берега, на основании которого можно судить об относительной опасности его различных участков. К этому направлению могут быть отнесены работы [9—19].

Важным преимуществом этого подхода является возможность его применения для любых участков побережья, вне зависимости от степени полноты и качества имеющихся для него исторических наблюдений. Наиболее уязвимым местом его является обоснование выбора параметров проектного события (*design earthquake*) либо (в более ранних работах) начальных высот волн в источнике цунами, который часто задавался в виде плоской полусинусоидальной волны [14]. Выбор параметров таких источников обычно делается на основе экспертных суждений без четких критериев оценки их качества,

а также без анализа чувствительности конечного результата к вариациям в значениях исходных параметров. Недостатком подхода является также невозможность получения данных об обеспеченности (вероятности превышения в течение заданного промежутка времени) высот меньших, чем максимально возможные.

Историко-вероятностный подход базируется на обработке имеющихся исторических данных о проявлениях всех цунами, включая слабые, на исследуемом участке побережья с целью нахождения закона повторяемости высот в данном пункте и определения на этой основе вероятности превышения некоторой заданной высоты в будущем. В отечественной литературе это направление представлено, в основном, работами дальневосточной группы сейсмологов и специалистов по цунами [8, 20—30].

Этот подход не требует знаний сеймотектонических механизмов, лежащих в основе возбуждения цунами, рассматривая наблюдаемые высоты просто как поток случайных событий, удовлетворяющий некоторым гипотезам об их статистических свойствах. В основе его лежит предположение о том, что развитие событий в будущем будет статистически подобно их развитию в прошлом (гипотеза стационарности), а также применение статистик Пуассона или Гумбеля для вычисления вероятности превышения высотами волн некоторого заданного уровня. Одновременно это означает допущение существования долговременных средних для величин, называемых «повторяемостью» цунамигенных событий либо высот волн, что опирается на предположение о постоянстве физического механизма, ответственного за возникновение цунами, т. е. неизменности сеймотектонического режима региона.

При практическом применении историко-вероятностного подхода часто приходится экстраполировать график повторяемости высот волн в область больших значений, соответствующих повторяемости в 100, 200 или 500 лет. Недостаток данных, однако, приводит к тому, что эмпирический график повторяемости часто бывает представлен ломаной линией, обрывающейся на значениях обеспеченности 30—50 лет, экстраполяция которой в область значений в 100 и более лет является весьма ненадежной. Как подчеркивается в работе [31], посвященной критическому разбору методик общего сейсмического районирования, переход от повторяемостей, полученных по рядам в 30—50 лет, к повторяемостям в 200—500 лет «на основе веры в стационарность небезопасен и в ряде случаев явно ведет к реальным искажениям долговременных оценок».

В то же время историко-вероятностный метод позволяет получать оценки цунамиопасности, не делая никаких предположений о типе источников цунами и характере сеймотектонического процесса (кроме стационарности). Одним из достоинств этого подхода является также то, что в нем естественным образом комбинируются оценки риска как от близких (региональных), так и от удаленных (трансокеанских) цунами. Такие комбинации, однако, необходимо тщательно отслеживать, особенно для участков с ограниченным набором данных, иначе возможно смещение оценок опасности (чаще всего в сторону завышения) в случаях попадания данных от удаленного события (характеризующегося, возможно, совсем другой повторяемостью) в набор высот от региональных событий.

Более существенным недостатком историко-вероятностного подхода является то, что он не принимает во внимание фактические геофизические механизмы, являющиеся причиной возникновения цунами, главными среди которых являются сеймотектонический и обвальный. Вместо этого он базируется на весьма произвольных, выбираемых лишь из соображений математического удобства постулатах о предполагаемых вероятностных механизмах, описывающих явление. Следовательно, к нему вполне можно отнести замечание В. Клемеша [32], высказанное по поводу обоснованности гидрологических прогнозов о том, что «результаты такого анализа отражают не то, что реально случается в природе, а то, что случилось бы, если бы эти постулаты были верны».

Вероятность превышения некоторой высоты волн в этом подходе рассматривается как предел ее относительной частоты, наблюдаемой в исторических данных. При этом делаются два существенных допущения: 1) процесс является *стационарным во времени*; 2) он реализуется в *эргодическом стохастическом процессе*. Первое допущение означает постоянство физического механизма, ответственного за возникновение цунами (в нашем случае — подводных землетрясений). Последнее, по-видимому, неверно [31] и, более того, его отклонение от реальности возрастает с увеличением рассматриваемого промежутка времени. Это ведет к парадоксальной ситуации, когда оценки вероятностей, полученные на основе длинных рядов наблюдений гораздо легче обосновываются для коротких рядов. Второе допущение, в большинстве случаев не упоминаемое вовсе, означает, что исторический ряд наблюдений в какой-либо точке является реализацией одной из равновероятных возможностей случайного процесса,

в котором среднее по ансамблю равно среднему по времени [33]. Это наиболее фундаментальное предположение, на котором базируется, например, вся концепция прогнозирования экстремальных гидрологических явлений [34, 32].

С геофизической точки зрения оба этих предположения, по-видимому, весьма спорны, ибо они полностью игнорируют тот факт, что каждое отдельное событие есть следствие конкретной комбинации сейсмотектонических условий, которые изменяются в результате этого события и, следовательно, физически не могут быть воспроизведены (по крайней мере, с такой же вероятностью) в будущем. Принятие *гипотезы стационарности* и допущение вслед за этим *пуассоновости процесса*, означающие, что мгновенные вероятности, вычисляемые как пределы исторических частот возникновения события, не зависят от времени, с методологической точки зрения есть не что иное, как «отрицание исторического хода природных процессов и взаимосвязи механизмов их возникновения» [35].

Другая не менее важная причина, по которой к вероятностным оценкам, полученным только на основе наблюдаемых данных, следует относиться с большой осторожностью, заключается в том, что за пределами используемого интервала времени, внутри которого, возможно, существовало свое предельное значение для уровня заливания, система могла подвергаться действию совсем другого механизма, способного дать гораздо более сильный максимум. Для оценок цунамириска таким механизмом в первую очередь является обвальный механизм возбуждения цунами, дающий для многих пунктов действительно максимальные заплески (классическим примером здесь служит 525-метровое цунами 1958 г. в бухте Литуйя на Аляске, возникшее как результат берегового сейсмотектонического обвала). Цунами, порожденные обвалами, имеют совершенно другой механизм возникновения и, следовательно, другие энергетические уровни и частоты повторяемости. Учет их возможного вклада в суммарные оценки цунамиопасности возможен только на основе тщательного изучения физических и геологических процессов, ответственных за возникновение нестабильности береговых склонов и прибрежных участков дна океана с привлечением данных смежных наук, таких как океанология, морская геология, геоморфология, геомеханика.

В нашей стране оба подхода практически независимо развивались в течение длительного времени (более 40 лет) и продолжают применяться для анализа цунамиопасности различных участков российского побережья (Курило-Камчатская зона, Японское и Черное море).

Между тем еще в 1968 г. С. Л. Соловьевым [36] был указан другой подход к решению задачи цунамирайонирования, являющийся комбинацией положительных моментов обеих методик и основанный на использовании сейсмотектонических представлений и физических законов, определяющих возбуждение и распространение цунами. Основные элементы этого подхода (в изложении его автора):

1) оценка по сейсмологическим данным вероятности вертикальных подвижек разной интенсивности и разной протяженности во всех точках Курило-Камчатской сейсмогенной зоны, заключенных между краем шельфа и осью глубоководной впадины;

2) пересчет деформаций дна в деформацию поверхности океана;

3) переход путем построения рефракционных диаграмм, от вероятностных характеристик подъема воды в зоне источника к вероятностной характеристике высоты цунами на некоторой близкой к побережью изобате;

4) нахождение с учетом особенностей прибрежного рельефа вероятностных характеристик высоты подъема воды на урезе и ширину зоны затопления.

Несмотря на значительное продвижение в понимании механизмов возбуждения цунами и в численных методах расчета распространения и набегания на берег, предложенная С. Л. Соловьевым методика оценки цунамиопасности в нашей стране так и не была реализована до самого последнего времени.

Стоит отметить, что такой подход по сути равнозначен методике «сейсмотектонического пробабиллизма» (в терминологии работы [37]), основы которой были заложены в опубликованной в том же году работе [38], заложившей фундамент методики PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment*), ссылку на которую можно найти практически в любой работе, использующей эту методику. Исходным пунктом для развития методологии PSHA послужило отчетливое осознание сейсмологами опасности полагаться только на имеющиеся исторические сведения о сейсмичности территории и необходимости привлечения данных о палеосейсмичности, современных разрывных нарушениях, а также сейсмотектонических моделей возникновения землетрясений. Комбинация этих достаточно разнородных данных может быть осуществлена только на основе использования сейсмических моделей источников и наличия методов

расчета сотрясаемости в данной точке от сейсмических очагов с заданными параметрами. В качестве меры осознания неопределенности значений и экспертных суждений, привлекаемых для получения значений ряда исходных данных, все параметры при этом подходе используются в форме интервальных значений, достигаемых с определенными вероятностями, представляемыми в форме так называемых логических деревьев. Эта методика легла в основу расчета глобальной карты сейсмической опасности, созданной в рамках международного проекта GSHAP (*Global Seismic Hazard Assessment Program*) [39]. Для оценки сейсмической опасности территории России методика PSHA начала применяться только в начале 2010-х гг. при создании карты ОСП-2012 [40], хотя ее отдельные элементы были использованы при создании карт ОСП-1997 (под ред. В. Н. Страхова и В. И. Уломова).

Применительно к задаче оценки цунамиопасности, использование этого подхода включает в себя следующие основные этапы:

1) определение района исследования, составление списка защищаемых объектов и определение их приоритетов, обоснование выбора масштабов карт оценки риска, сбор батиметрической и топографической информации на район исследований;

2) создание сейсмо-структурной схемы региона (разбиение области возможных очагов тектонических цунами на условно-однородные зоны (УОЗ)).

3) определение для каждой зоны магнитудно-частотной (желательно в терминах магнитуды M_w) характеристики (закона повторяемости землетрясений) и оценка максимально возможной для этой зоны магнитуды M_{max} ;

4) создание для каждой УОЗ модельного каталога землетрясений на период 50—100 тыс. лет, проверка его статистических свойств на соответствие имеющимся сейсмическим каталогам для данного района;

5) применение моделей распространения (и при необходимости, набегания) цунами для расчета параметров волн (высота, период, скорость течения) на некоторой изобате (10—20 м) вблизи побережья либо на сухом берегу (в зависимости от задач и масштабов картирования);

6) расчет $h(M, r)$ для каждой береговой точки от событий модельного каталога, построение модельного каталога высот волн; проверка его свойств на соответствие имеющимся историческим наблюдениям;

7) применение вероятностных моделей для расчета закона повторяемости высот в каждой точке вида $h = a + b(f)$ и определения на этой основе h_{100} или h_{500} , построение карт заливания в изолиниях h_{100} или h_{500} ;

8) определение вероятности комбинации воздействия цунами с воздействием других стихийных бедствий (сильный шторм, наводнение, высокий прилив);

9) оценка возможного вклада от других механизмов возбуждения цунами (обвального и оползневого);

10) исследование точности полученных оценок риска и их чувствительности по отношению к неопределенностям моделей и параметров сейсмического режима.

Вопрос о выборе структурной схемы региона, выделения УОЗ, определение для каждой из них закона повторяемости землетрясений и M_{max} решается на уровне экспертных оценок с привлечением всей совокупности имеющихся данных (каталоги землетрясений, данные о палеоцунами, разломная тектоника, палеосейсмодислокации, результаты геоморфологического анализа донных структур). Стоит отметить, что выделение и параметризация таких зон является достаточно сложной задачей даже при исследовании сейсмоактивных зон (зон ВОЗ) на суше. Сложность ее многократно возрастает при изучении зон возникновения подводных землетрясений. Положительным обстоятельством здесь является то, что в океанических областях такие зоны, как правило, относятся к наиболее сейсмически активным районам, где сильные землетрясения происходят достаточно часто. Они наиболее полно обеспечены данными наблюдений, по крайней мере, за инструментальный период. Для многих из них имеются результаты глубоководного бурения, выполненного судном «Гломар Челленджер» по программе DSDP, при котором анализ полученных осадочных колонок позволяет достаточно уверенно выявлять и датировать следы палеоземлетрясений, например, в виде прослоев турбидитов [41, 42].

Многие из этих областей покрыты густой сеткой трасс сейсмопрофилирования, выполненного в связи с работами по поиску месторождений нефти, природного газа и газогидратов на морском дне. Анализ этих данных дает весьма ценную информацию о наличии разрывных нарушений в осадочном

чехле и подстилающих породах, позволяя в ряде случаев оценивать возраст и амплитудные характеристики дислокаций [43, 44]. В последние годы появляется также все большее количество высокоточных батиметрических карт, выполненных с помощью технологии MULTIBEAM (цифровых локаторов бокового обзора). Детальность таких карт даже на глубинах 1000—2000 м достигает первых метров по горизонтали с разрешением до долей метра по глубине, что позволяет получать трехмерные цифровые изображения участков морского дна, пригодные для детального морфологического анализа, в частности, для идентификации следов разрывных нарушений, свидетельствующих о происшедших ранее сильных землетрясениях [45].

В зарубежных работах такой подход к оценке цунамиопасности получил реализацию в рамках методики РТНА (*Probabilistic Tsunami Hazard Assessment*), которая в различных модификациях с середины 2000-х гг. используется в таких странах как США, Канада, Австралия, Новая Зеландия, в западной Европе и других регионах [46—50]. На ее основе выполняется как обзорное цунамирайонирование побережья целых стран, так и рассчитываются детальные карты заливания для отдельных портов и гаваней. При всех известных недостатках этой методики, как принципиальных, так и технологических (критика методики PSHA, приведенная в работах [51, 52], в полной мере может быть отнесена также и к методике РТНА), она после необходимой адаптации может и должна быть использована при создании карты цунамиопасности побережья России.

Примером реализации подобной методики для арктического побережья нашей страны является работа [53]. В 2016 г. в рамках этой методики были получены обзорные карты цунамиопасности Дальневосточного и Черноморского побережья РФ как результат выполнения гранта РНФ 14-17-00219 «Оценка цунамиопасности побережья Курило-Камчатского региона, Японского, Охотского и Черного морей» (руководитель Л. Б. Чубаров).

Следует, однако, ожидать, что применение этого подхода для многих участков протяженного побережья нашей страны будет затруднено по причине отсутствия сведений о разломной тектонике на морском дне и достаточно представительных каталогов очагов землетрясений, т. е. той наиболее значимой информации, на основе которой производится выделение условно-однородных зон и получение графиков повторяемости землетрясений в каждой из них.

В этих условиях возможно применение упрощенной методики, состоящей в использовании численных моделей возбуждения и распространения цунами для заполнения пространственных пропусков в каталогах наблюдений высот по известным сильным и сильнейшим событиям в регионе. Детали механизмов очагов таких событий, происшедших в доинструментальную эпоху, остаются неизвестны. Однако они не столь важны для получения распределения высот волн на берегу, которое в основном определяется рельефом прибрежной зоны. Имеющиеся наблюдения высот от таких событий могут быть использованы в качестве реперных величин для калибровки общей мощности источника цунами (как это делалось, например, в работе [54]). Такие «модельные» высоты могут быть добавлены в каталог имеющихся наблюдений, после чего к полученному «синтетическому» каталогу возможно применение вероятностно-статистических методов для оценки повторяемости.

О выборе масштабов карт цунамиопасности. Вопрос о рациональном выборе масштаба карт цунамиопасности достаточно сложен, его решение зависит в первую очередь от конкретных задач исследования, а также используемого метода оценки цунамиопасности. Очевидно, что если применяемая методика районирования основывается на вероятностном анализе фактических наблюдений цунами, то вопрос выбора масштаба в значительной мере теряет смысл, поскольку такой анализ носит локальный характер и фактически применим лишь к конкретной точке побережья, где имеется ряд наблюдений над высотами цунами. Здесь речь может идти лишь об определении размера окрестностей данной точки (бухты, залива, населенного пункта), в которой результаты такого анализа могут считаться справедливыми. Как правило, наиболее полные ряды наблюдений имеются для длительно существующих на побережье поселений. Вне населенных пунктов такие данные носят отрывочный характер. Например, для всего юго-восточного побережья Камчатки, протяженностью около 250 км от мыса Лопатка до Авачинской бухты, имеется не более десяти наблюдений высот, относящихся всего к трем событиям — цунами 1737, 1952 и 1960 гг. Поэтому говорить о построении карт цунамирайонирования определенных масштабов можно лишь при применении некоторых расчетных методик, основанных, например, на сценарном подходе или методе «сейсмотектонического пробабилизма».

Единственная известная до настоящего времени попытка рассмотрения вопроса о рациональном выборе масштаба карт цунамирайонирования была сделана в 1980 г. в работе [55]. Исходя из предположения, что карта цунамирайонирования строится в терминах локальной интенсивности цунами I и является читаемой при расстоянии (на карте) между изолиниями, построенными с шагом $\Delta I = 1$ не менее 0.5 см, и принимая во внимание максимально известный (на тот момент) горизонтальный (т. е. вдоль берега) градиент высот цунами равный 0.04 (наблюдение цунами 1.04.1946 г. в местечке Палолу на о-ве Гавайи) авторы приходят к выводу, что оптимальный масштаб районирования, пригодного для инженерных целей должен быть 1:5.000—1:10.000. В работе отмечается также необходимость создания карт обзорного цунамирайонирования в масштабе 1:2.500.000—1:5.000.000, которые должны строиться для высот цунами на какой-либо близкой к берегу изобате (10 или 20 м).

Со времени опубликования этой работы появилось много новых данных по распределению высот цунами вдоль берега, в частности, полученных в ходе международных экспедиционных исследований последствий разрушительных цунами, проводимых с 1992 г. [56]. Качество и детальность материалов исследований, получаемых в таких экспедициях, намного превосходит качество имевшихся ранее материалов. Анализ результатов измерений распределений высот цунами 1992—2015 гг. вдоль берега показывает, что горизонтальные градиенты высот могут превышать максимальное значение принятое в работе [55]. При цунами 12 июля 1993 г. максимальный заплеск равный 30.7 м наблюдался на о-ве Окушири лишь в одной точке — вершине узкого распадка, выходящего в небольшую (шириной не более 400 м) бухту Монай. Непосредственно вне этой бухты уровень заливания был на уровне 10—12 м. Таким образом, максимальный градиент высот в этом случае составил $20 \text{ м}/200 \text{ м} = 0.1$. Стоит отметить, что такой достоверно зафиксированный локальный всплеск оказалось возможным воспроизвести путем численного моделирования при использовании детальной батиметрии (с шагом до 5 м) прилегающих к бухте участков дна, а также подробных (с детальностью до 1 м) фотограмметрических данных о рельефе сухого берега [57].

Высокие градиенты высот (в интервале 0.05—0.1) наблюдались также при цунами 26.05.1983 г. в Японском море [58], 12.12.1992 г. в Индонезии [59], 17.07.1998 г. на Новой Гвинее [60] и, в особенности, при цунами 11.03.2011 г. в Японии [61]. Исходя из этих данных, можно предположить, что нижним пределом для карт детального цунамирайонирования должны быть масштабы порядка 1:2.000—1:2.500. Именно такие карты должны использоваться при выборе площадок, проектировании и строительстве в береговой зоне в цунамиопасных районах.

Идентификация таких районов должна делаться на основе обзорных карт цунамирайонирования, строящихся в масштабах от 1:500.000 до 1:2.000.000 и показывающих, например, вероятности превышения заданной высоты (5—10 м) в течение определенного периода (100—1000 лет). Высоты волн на них рассчитываются для уреза воды или на некоторой близкой к берегу изобате (10—30 м). Исходным материалом для таких карт должны служить данные о повторяемости близких цунамигенных землетрясений и наблюдаемых высотах цунами. При их построении выполняется основной объем работы по идентификации цунамигенных зон и созданию их сеймотектонических моделей. Такие карты необходимы для сравнения различных участков побережья по степени их цунамиопасности, а также в качестве исходного материала для работ по детальному цунамирайонированию.

Наконец, на верхнем уровне необходимы, по-видимому, обзорные карты цунамиопасности для Тихого и других океанов в масштабах 1:10.000.000—1:20.000.000. Основное назначение таких карт — компактное представление информации об относительной цунамиопасности различных регионов мирового океана. В качестве сейсмологического аналога такой карты можно указать на глобальную карту сейсмической опасности [39], подготовленную в результате выполнения международного проекта GSHAP. Карта построена в масштабе 1:35.000.000 и показывает 10 % вероятности превышения расчетных пиковых ускорений почвы в течение 50 лет при периоде повторяемости сотрясений в 475 лет. Такие карты, естественно, не могут быть использованы для нужд строительства, однако они позволяют сравнивать различные территории по уровню сейсмической опасности. Аналогичные обзорные карты цунамиопасности для Тихого и других океанов до настоящего времени отсутствуют.

О наборе картируемых параметров. С точки зрения оценки цунамиопасности наиболее важным параметром является конечно высота (и связанная с ней дальность) заплеска на сухом берегу. Она определяется как параметрами волны на уресе (высотой и периодом), так и рельефом берега. Именно этот

параметр картируется при использовании историко-вероятностного подхода, поскольку в каталогах и базах данных большинство исторических наблюдений цунами составляют измерения высот заплеска. Однако разрушительная способность цунами определяется не только ее высотой, но и в значительной степени скоростью потока (т. е. горизонтальной скоростью движения частиц воды), возникающего при накате волны цунами на берег. Эта величина в наблюдениях практически отсутствует и может быть получена только расчетным путем. Этот параметр также критически важен для оценки жизнеспособности людей, оказавшихся в зоне воздействия цунами.

Для безопасности судов в гаванях и работы водозаборов электростанций очень важны оценки максимального понижения уровня воды, которое может быть сопоставимо по величине с максимальным повышением уровня (пиковой амплитудой цунами) на урезе, а в некоторых случаях даже превышать ее. Для планирования защитных мероприятий важным параметром также является продолжительность заливания берега либо осушки дна гаваней, которая определяется в основном длиной (периодом) подходящей к берегу волны цунами.

Все эти параметры, хотя и в различной степени, определяют опасность волны цунами, понимаемую в инженерном смысле, т. е. как степень воздействия на население, здания и сооружения.

Поскольку расчет заплесков на сухом берегу является существенно более затратной операцией по сравнению с расчетами высот волн на урезе, он не может выполняться при обзорном цунамирайонировании, однако должен быть обязательной составной частью детального районирования.

Об учете вклада сильнейших землетрясений. При создании сейсмотектонической модели цунамигенной зоны важнейшую роль играет реалистичная оценка предельной магнитуды максимального ожидаемого землетрясения (возможно, отсутствующего в историческом каталоге данной зоны), поскольку именно такие события определяют предельные заплески на ближайшем побережье [62]. В некоторых работах по оценке цунамиопасности с использованием методики РТНА учитывается возможность возникновения мега-землетрясений [49], но только по тем зонам, где они уже происходили в прошлом. Возможность же возникновения такого землетрясения на любом (в том числе ближайшем к рассматриваемому участку побережья) сегменте субдукционной зоны, по-прежнему, часто игнорируется. Такой подход в значительной степени обесценивает полученные карты цунамиопасности, поскольку исключение из рассмотрения сильнейшего события приводит к существенной недооценке ожидаемых высот цунами.

Средний период повторяемости мега-землетрясений в одной субдукционной зоне составляет порядка 600—800 лет [63]. Фактический интервал времени между двумя последовательными мега-событиями изменяется в весьма широких пределах — для уже известных исторических событий от 215 лет (Камчатка 17.10.1737 г. и 4.11.1952 г.) до 1142 лет (Тохоку 13.07.869 г. и 11.03.2011 г.). Более точная и реалистичная оценка ожидаемого периода повторяемости предельных высот является достаточно проблематичной в связи с недостаточной длиной исторических каталогов цунами в большинстве цунамигенных регионов Мирового океана. Помочь здесь могут только геологические методы поиска и трассирования следов палеоцунами, сохраняющихся в береговых осадочных толщах [64].

Главная проблема оценки цунамиопасности конкретного участка 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 задачу и фактически сводится к решению проблемы долгосрочного прогноза сильнейших землетрясений. Карты цунамиопасности любого масштаба, построенные без учета возможности и вероятности возникновения мега-землетрясений, будут значительно недооценивать реальную опасность цунами и приводить к неверным инженерным решениям по застройке прибрежной полосы.

Предварительное цунамирайонирование побережья — это получение и картирование долговременных оценок максимальных ожидаемых высот цунами на участках побережья и их обеспеченности (повторяемости). Оценки опасности цунами необходимы для обеспечения безопасной и рациональной жизнедеятельности на угрожаемой территории; перспективного планирования ее развития; выполнения оперативных мероприятий по защите населения при угрозе цунами (выбор безопасных убежищ и маршрутов эвакуации).

Задача оценки долгосрочной цунамиопасности во многом аналогична задаче оценки сейсмоопасности. Последняя во всех странах решается сейчас на основе методики PSHA (*Probabilistic Seismic Hazard Assessment*), положенной также в основу проекта создания карты общего сейсмического районирования территории России ОСР-2016 [40]. 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. Она широко используется в США, Канаде, Австралии, Новой Зеландии, в западной Европе и других странах. На ее основе выполняется как обзорное цунамирайонирование побережья крупных регионов, так и рассчитываются детальные карты заливания для отдельных населенных пунктов, гаваней и портов. При всех имеющихся недостатках этой методики, как принципиальных, так и технических, на сегодняшний день она является адекватным инженерным инструментом для создания карт цунамиопасности различных масштабов и после необходимой адаптации может и должна быть использована при картировании опасности цунами на побережьях России.

В силу большой изменчивости высот цунами вдоль берега, карты цунамиопасности, пригодные для практического (инженерного) использования должны строиться в достаточно крупных масштабах (1:2.000—1:10.000). Наличие обзорных карт цунамиопасности (в масштабах 1:2.000.000—1:4.000.000) необходимо для количественного сравнения уровня цунамиопасности различных побережий и определения участков берега, нуждающихся в детальном районировании.

Главная проблема оценки цунамиопасности конкретного участка 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. Карты цунамиопасности любого масштаба, построенные без учета возможности и вероятности возникновения мега-землетрясений, будут значительно недооценивать реальную опасность цунами и приводить к неверным инженерным решениям по застройке прибрежной полосы.

Для большинства цунамигенных регионов имеющиеся исторические каталоги подводных землетрясений и цунами имеют недостаточную длину (150—250 лет), которая едва превышает продолжительность основного сейсмического цикла в зонах субдукции (140±50 лет). Для изучения повторяемостей сильнейших подводных землетрясений и оценок максимальных возможных высот заплеска необходимо полномасштабное использование геологических методов поиска и исследования следов палеоцунами. Такие работы, выполняющиеся на Дальневосточном побережье РФ уже в течение почти тридцати лет, должны быть проведены и на других морских побережьях России.

Работа выполнена при поддержке проектов РНФ 14-17-00219 и РФФИ 16-05-000450.

Литература

1. *Robinson E., Rodriquez K., Smith M., Sponberg K.* Why the United States is becoming more vulnerable to natural hazards // EOS. 1998. V. 79, № 44. P. 533—537.
2. *Ramsay S., Hilbert M.* MONTY: A Monte Carlo method for quantitative risk assessment // The International Emergency and Management Conference TIEMES'94. 1994. Miami, Florida, USA, P. 91—96.
3. *Уломов В. И.* Основные положения общего сейсмического районирования территории Российской Федерации // Природные опасности России. Сейсмические опасности. Москва: «КРУК», 2000. С. 66—70.
4. *Hays W. W.* Hazard and risk assessment in the United States // Episodes. 1991. V. 14, № 1. P. 7—12.
5. *Ризниченко Ю. В.* Об изучении сейсмического режима // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1958. № 9. С. 1057—1074.
6. *Ризниченко Ю. В.* От активности очагов землетрясений к сотрясаемости земной поверхности // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1965. № 11. С. 1—11.
7. *Ризниченко Ю. В.* Сейсмическая активность и сотрясаемость // Сейсмическое районирование СССР. М.: Наука, 1968. С. 112—120.
8. *Бернштейн В. А., Го Ч. Н., Поплавский А. А.* Способ оценки повторяемости высот цунами у произвольного участка берега // Волны цунами: Труды СахКНИИ. 1973. Вып. 32. С. 183—187.

9. *Иконникова Л. Н.* Атлас цунами. М.: ДВНИГМИ, 1963, 53 с.
10. *Иванов В. Ф., Ярошеня Р. А.* Расчет максимально возможного заплеска цунами для советского побережья Японского моря // Труды ДВНИГМИ. Вып. 62. Л.: Гидрометеиздат, 1976. С. 138—145.
11. *Иконникова Л. Н., Ярошеня Р. А.* Расчет рефракции волн цунами для Тихоокеанского побережья СССР // Теоретические и экспериментальные исследования по проблеме цунами. М.: Наука, 1976. С. 120—127.
12. *Соловьев С. Л., Некрасов А. В., Бухтеев В. Г., Пясковский Р. В.* Предварительное цунамирайонирование Курило-Камчатского побережья на основе гидродинамических расчетов // Теоретические и экспериментальные исследования по проблеме цунами. М.: Наука, 1977. С. 131—139.
13. Атлас максимальных заплесков цунами / Отв.ред. С. Л. Соловьев. Владивосток: МГИ АН УССР, ДВНИГМИ, 1978. 61 с.
14. *Пелиновский Е. Н., Плинк Н. Л.* Предварительная схема цунамирайонирования побережья Курило-Камчатской зоны на основе одномерных расчетов (модельный очаг) // Препринт ИПФ АН СССР. № 5. Горький, 1980. 18 с.
15. *Щетников Н. А., Го Ч. Н., Жигулина Н. Д., Ким Х. С.* Оценка некоторых параметров цунами у карибских берегов о-ва Куба // Распространение и набегание на берег волн цунами. 1981. С. 163—182.
16. *Бернштейн В. А.* О локальном цунамирайонировании (постановка задачи и состояние методов ее решения) // Оперативный и долгосрочный прогноз цунами. 1983. С. 143—149.
17. *Вялых В. Ф., Грошев Е. Б., Симонов К. В., Шевченко Г. В.* Оценка максимальной цунамиопасности побережья на основе гидродинамического моделирования // Нестационарные длинноволновые процессы на шельфе Курильских островов. 1984. С. 56—68.
18. *Карев В. Ю., Симонов К. В., Чубаров Л. Б., Шокин Ю. И.* Вычислительный эксперимент в проблеме цунами: детальное цунамирайонирование Тихоокеанского побережья Камчатки // Исследования цунами. № 4. М.: МГК при Президиуме АН СССР, 1990. С. 64—84.
19. *Пелиновский Е. Н., Зайцев А. И.* Оценка и картирование опасности цунами на черноморском побережье Украины // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2011. № 3. С. 44—50.
20. *Соловьев С. Л., Тулунов И. В.* Оценка возможной высоты цунами в некоторых пунктах юга Курильских островов // Физика Земли. 1981. № 5. С. 31—41.
21. *Го Ч. Н., Кайстренко В. М., Симонов К. В.* Локальный долгосрочный прогноз цунами и цунамирайонирование // Препринт СахКНИИ ДВНЦ АН СССР. Владивосток, 1982. 28 с.
22. *Го Ч. Н., Кайстренко В. М., Симонов К. В.* О возможности локального долгосрочного прогноза цунами // Оперативный и долгосрочный прогноз цунами. Владивосток: ДВО АН СССР, 1983. С. 150—162.
23. *Го Ч. Н., Кайстренко В. М., Симонов К. В.* Предварительные данные о цунамиопасности побережья Японского моря // Нестационарные длинноволновые процессы на шельфе Курильских островов. Владивосток: ИМГиГ ДВНЦ АН СССР, 1984. С. 138—141.
24. *Го Ч. Н., Кайстренко В. М., Пелиновский Е. Н., Симонов К. В.* Прогноз цунамиопасности для побережья Камчатки // Метеорология и гидрология. 1986. № 7. С. 74—81.
25. *Го Ч. Н., Кайстренко В. М., Пелиновский Е. Н., Симонов К. В.* Количественная оценка цунамиопасности и схема цунамирайонирования Тихоокеанского побережья СССР // Тихоокеанский ежегодник. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. С. 9—17.
26. *Го Ч. Н., Иванов В. В., Кайстренко В. М., Седяева В. М., Симонов К. В.* Проявление цунами в районе Усть-Камчатка и прогноз цунамиопасности // Природные катастрофы и стихийные бедствия в Дальневосточном регионе. Т. 1. Владивосток: ИМГиГ ДВО АН СССР, 1990. С. 142—178.
27. *Храмушин В. Н., Шевченко Г. В.* Метод детального цунамирайонирования на примере побережья Анивского залива // Океанология. 1994. Т. 34, № 2. С. 218—223.
28. *Кайстренко В. М., Иващенко А. И., Храмушин В. Н., Золотухин Д. Е.* Цунамиопасность Южных и Средних Курил. Карта. Масштаб 1:1.000.000 // Атлас Курильских островов. Владивосток: ИПЦ «ДИК», 2009. С. 134—135.
29. *Кайстренко В. М., Иващенко А. И., Храмушин В. Н., Золотухин Д. Е.* Цунамиопасность Северных Курил. Карта. Масштаб 1:1.000.000 // Атлас Курильских островов. Владивосток: ИПЦ «ДИК», 2009. С. 137.
30. *Кайстренко В. М., Храмушин В. Н., Золотухин Д. Е.* Оценка цунамиопасности для тихоокеанского побережья России // Мореходство и морские науки – 2012: избранные доклады Четвертой Сахалинской региональной морской научно-технической конференции (5—7 сентября 2012 г. и 12 февраля 2013 г.) / Под ред. В. Н. Храмушина. Южно-Сахалинск: 2013. С. 181—194.
31. *Гусев А. А., Шумилина Л. С.* Некоторые вопросы методики общего сейсмического районирования Северной Евразии. М.: ОИФЗ РАН, 1995. С. 289—299.
32. *Klemes V.* The improbable probabilities of extreme floods and droughts // Hydrology of Disasters / Staroslovzsky O., Medler O. (Eds). London, James and James, 1989. P. 43—51.
33. *Худсон Д.* Статистика для физиков. М.: Мир, 1970. 296 с.
34. *Соколовский Д. Л.* Речной сток. Л.: Гидрометеиздат, 1959. 527 с.
35. *Stewart I.* Nature and the monkey intellect (Review of “Mathematics and Unexpected” by I. Ekeland) // New Scientist. 1988. V. 119. P. 59—61.
36. *Соловьев С. Л.* Проблема цунами и ее значение для Камчатки и Курильских островов // Проблема цунами. М.: Наука, 1968. С. 7—50.
37. *Muir—Wood R.* From global seismotectonics to global seismic hazard // Annali di Geofisica. 1993. V. 36, № 3. P. 153—168.
38. *Cornell C. A.* Engineering seismic risk analysis // Bull. Seis. Soc. Am. 1968. V. 58. P. 1583—1606.
39. *Giardini D.* The Global Seismic Hazard Assessment Program (GHSAP) –1992/1999 // Annali di Geofisica. 1999. V. 42, № 6. P. 957—974.

40. Уломов В. И., Богданов М. И. Общее сейсмическое районирование территории Российской Федерации. Пояснительная записка к комплексу карт ОСР—2016 и список населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных зонах // Инженерные изыскания. 2016. № 7. С. 49—121.
41. Adams J. Paleoseismicity of the Cascadia Subduction zone: evidence from turbidites of the Oregon-Washington margin // *Tectonics*. 1990. V. 9, № 4. P. 569—583.
42. Griggs G. B., Kulm L. D. Sedimentation in Cascadia deep-sea channel // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1990. V. 81. P. 1361—1384.
43. Mercado A., McCann W. Evaluaton of the tsunami hazard for western Puerto Rico // Joint IOC-IUGG International Workshop «Tsunami Risk Assessment Beyond 2000: Theory, Practice and Plans. In memory of Professor S. L. Soloviev. Moscow, Russia, June 14 to 16, 2000.» Proceeding, Moscow, 2001. P. 23—33.
44. Rodriguez R., Trumbull J., Dillon W. Marine geologic map of the Isla de Mona area, Puerto Rico // *Misc. Map Inves. Ser. I*. 1977. P. 1063—1078.
45. Kasahara J., Sato T., Mochizuli K., Kobayashi K. Paleotectonic structures and their influence on recent seismo-tectonics in the south Kuril subduction zone // *Island Arc*. 1997. V. 6. P. 267—280.
46. Thio H., Somerville P., Ichinose G. Probabilistic analysis of strong ground motion and tsunami hazards in Southeast Asia // *J. Earthquake and Tsunami*. 2007. V. 01, No. 02. P. 119—132. doi: 10.1142/S1793431107000080.
47. Gonzalez F., Geist E., Jaffe B., Kanoglu U., Moffeld H., Synolakis C., Titov V., Arcas D., Bellomo D., Carlton D., Horning T., Johnson J., Newman J., Parsons T., Peters R., Peterson C., Priest G., Venturato A., Weber J., Wong F., Yalciner A. Probabilistic tsunami hazard assessment at Seattle, Oregon, for near- and far-field sources // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. C11023. DOI: 10.1029/2008JC005132.
48. 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.
49. Leonard L., Roger G., Mazotti S. Tsunami hazard assessment of Canada // *Nat. Hazards*. 2014. V. 70. P. 237—274. doi: 10.1007/s11069-013-0809-5.
50. 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.
51. Stein S., Geller R., Liu M. Why earthquake hazard maps often fail and what to do about it // *Tectonophysics*. 2012. V. 562—563. P. 1—25.
52. Mulargia F., Stark P. B., Geller R. J. Why is Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA) Still Used? // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2017. V. 264. P. 63—75. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pepi.2016.12.002>.
53. Куликов Е. А., Иващенко А. И., Медведев И. П., Яковенко О. И., Ковачев С. А. К вопросу о цунамиопасности арктического региона // *Арктика: экология и экономика*. 2016. Т. 23, № 3. С. 38—49.
54. Видулин А. В., Гусяков В. К., Туттов В. В. О природе максимального цунами // *Вычислительные технологии*. 1992. Т. 1, № 3. С. 131—134.
55. Соловьев С. Л., Тулунов И. В. Выбор масштаба цунамирайонирования побережья // *Океанология*. 1980. Т. 21, № 1. С. 38—41.
56. ITST (International Tsunami Survey Team) Post-Tsunami Survey Field Guide, 2nd Edition // *Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides*. № 37, UNESCO, Paris, 2014. 114 p.
57. Imamura F., Takahashi T., Lee H., Shuto N. The abnormally large run-up of the 1993 Okushiri tsunami at Monai // *Okushiri Tsunami/IJNR Workshop*, July 9—14, 1998, Okushiri-Sapporo, Japan, Abstracts, 1998. P. 79—80.
58. Kajiura K. Heights distribution of the tsunami generated by the Nihonkai-Chubu (Japan Sea, Central Region) earthquake // *Proceedings of the International Tsunami Symposium*, August 6 to 9, 1985. IOS, Sidney, British Columbia, Canada, 1985. P. 103—108.
59. Tsuji Y., Matsutomi H., Imamura F., Takeo M., Kawata Y., Matsuyama M., Takahashi T., Harjadi P. Damage to coastal villagers due to the 1992 Flores island earthquake tsunami // *Tsunamis: 1992—1994. Their Generation, Dynamics, and Hazards* / Edited by K. Satake and F. Imamura, *Pageoph Topical Volumes*. 1995. V. 144, № 3. P. 481—524.
60. Davies H. Tsunami PNG 1998 // *The University of Papua New Guinea*, Port Moresby, Papua New Guinea, 1999. 48 p.
61. Mori N., Takahashi T. The 2011 Tohoku Earthquake Tsunami Joint Survey Group. Nationwide post event survey and analysis of the 2011 Tohoku Earthquake Tsunami // *Coast. Eng. J.* 2012. V. 54. P. 1—27.
62. Гусяков В. К. Сильнейшие цунами мирового океана и проблема безопасности морских побережий // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2014. Т. 90, № 5. С. 496—507.
63. Atwater B. F., Nelson A. R., Clague J. J., Carver G. A., Yamaguchi D. K., Bobrowsky P. T., Bourgeois J., Darienzo M. E., Grant W. C., Hemphill-Haley E., Kelsey H. M., Jacoby G. C., Nishenko S. P., Palmer S. P., Peterson C. D., Reinhart M. Summary of coastal geologic evidence about past great earthquakes at the Cascadia subduction zone // *Earthquake Spectra*. 1995. V. 11, № 1. P. 1—18. doi:10.1193/1.1585800.
64. Пинегина Т. К., Разжигалева Н. Г. Исследования палеоцунами на дальневосточном побережье России // *Мировой океан. Т. I. Геология и тектоника океана. Катастрофические явления в океане*. М.: Научный мир, 2013. С. 488—498.