

УДК: 550.344.42+550.34.013.4

Экспресс-оценка цунамиопасности побережья

*Г. В. Шевченко, Д. Е. Золотухин*¹

Под оценкой цунамиопасности побережья обычно понимается расчет высот волн цунами редкой повторяемости (чаще всего востребованы высоты, возможные один раз в 100 лет). В данной работе при расчете высот цунами заданного периода повторяемости применялось численное моделирование с использованием характерных для данного района параметров землетрясения. С использованием предложенной методики были получены оценки цунамиопасности побережья Курильских островов – наиболее опасных с точки зрения угрозы цунами территорий Дальнего Востока России. Такую оценку можно получить быстро при сравнительно небольших трудозатратах.

Express-estimation tsunami-danger of coast. *Georgy V. Shevchenko, Dmitry E. Zolotukhin. Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk.*

Estimation of tsunami-danger of coast usually is understood as account of heights of waves of a tsunami of rare repeatability (heights, possible 1 time per 100 years are claimed more often). In this work at account of heights of a tsunami of the necessary period of repeatability use the numerical modeling with characteristic for this area parameters of earthquake. In work was applied simplified «macroseismic source» a tsunami. With use of the offered technique the estimations tsunami-danger of coast of Kuril Islands – most tsunami-dangerous territories of Far East of Russia. Such estimation can be received quickly at rather small expenditures of labor.

Введение

Под оценкой цунамиопасности побережья обычно понимается расчет высот волн цунами редкой повторяемости (чаще всего востребованы высоты, возможные один раз в 100 лет). Эти оценки необходимы для наиболее рационального размещения новых и разработке мер по защите имеющихся населенных пунктов и промышленных объектов на побережье Дальнего Востока России.

Наиболее развитой является методика определения цунамиопасности, основанная на анализе проявлений исторических цунами в нескольких пунк-

¹ *Шевченко Георгий Владимирович* – заведующий лабораторией цунами, доктор физико-математических наук; *Золотухин Дмитрий Евгеньевич* – научный сотрудник Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, кандидат географических наук, г. Южно-Сахалинск.

тах изучаемого района. Для распространения оценок цунамиопасности, полученных для этих пунктов, на прилегающие участки побережья, выполняется численное моделирование наиболее сильных цунами, отмеченных в изучаемом районе [4, 11]. Данный подход обеспечивает надежные результаты, но является достаточно сложным и трудоемким. В то же время во многих случаях необходимо быстро получить предварительные оценки цунамиопасности для некоторого участка побережья.

В данной работе при расчете высот цунами заданного периода повторяемости применялось численное моделирование с использованием характерных для данного района параметров землетрясения – средних координат и глубины эпицентра. Так как для усредненного источника невозможно указать параметры очага по [12], в данной работе применялся упрощенный «макросейсмический очаг» [7, 8], в котором определяющими параметрами являются магнитуда и глубина землетрясения.

С использованием предложенной методики были получены оценки цунамиопасности побережья Курильских островов – наиболее опасных с точки зрения угрозы цунами территорий Дальнего Востока России.

Методика расчета

Для расчетов использовался региональный каталог землетрясений в Курило-Камчатской зоне за период 1900–2008 гг., в который были включены события с магнитудой не менее 4,5, афтершоки из каталога не исключались [1]. Данные о землетрясениях были разбиты на три области, прилегающие к северным, средним и южным Курилам. Для каждой области определялись средние значения широты $\bar{\varphi}$ и долготы $\bar{\lambda}$ эпицентра, которые использовались для задания координат начального возмущения при численном моделировании. Кроме того, рассчитывались среднеквадратические отклонения $\sigma_{\lambda, \varphi}$ данных параметров для каждого района, и численное моделирование проводилось также для эпицентров, смещенных вдоль гряды в юго-западном и северо-восточном направлениях:

$$\{ \bar{\varphi} \pm \sigma_{\varphi}, \bar{\lambda} \pm \sigma_{\lambda} \}.$$

В работе [7] была получена оценка «эквивалентной глубины» источника цунами h_0 равная 36 км, которую рекомендовалось использовать в качестве априорной при моделировании цунами в области Курильской гряды. Эта величина использовалась в настоящей работе при задании начальных условий в гипотетическом очаге цунами.

Для оценки магнитуд землетрясений редкой повторяемости применялся стандартный подход, основанный на статистике экстремальных значений [2].

Эта статистика опирается на использование двойного экспоненциального распределения, которое справедливо для экстремумов, выбранных за

определенные промежутки времени, вне зависимости от того, какому закону подчиняется распределение изучаемого параметра:

$$1 - P(M) = EXP(-EXP(-y)), \quad (1)$$

где $P(M)$ – вероятность превышения магнитуды M , y – приведенная переменная, линейным образом связанная с исследуемой статистической переменной.

Эмпирические вероятности для ранжированных по возрастанию ряда максимальных магнитуд (выборка формировалась для наиболее сильных событий с магнитудой $M \geq 6,5$, более слабые события мало информативны с точки зрения изучения генерации цунами) [2]:

$$1 - P_i = i / N + 1, \quad (2)$$

где N – длина используемого интервала наблюдений, i – номер данного максимума в ранжированном ряду.

В зависимости от характера эмпирического распределения максимальных магнитуд выбирался расчет магнитуды M_{100} , отвечающей 100-летнему периоду повторяемости, по второму или третьему предельному распределению [2].

В данной работе при численном моделировании цунами применялся упрощенный «макросейсмический очаг» [7, 8], параметры которого определяются в зависимости от магнитуды и глубины землетрясения. Длина разлома L и большие полуоси a и b эллипсоида – модельного источника цунами – выражаются через магнитуду M и фокальную глубину h_0 землетрясения следующим образом:

$$\begin{aligned} \lg L(\text{км}) &= 0,5M - 1,8, \\ a(\text{км}) &= \frac{L + 2h_0}{2}, \\ b(\text{км}) &= h_0. \end{aligned} \quad (3)$$

Малая полуось η_0 эллипсоида – модельного источника цунами (максимальное начальное возвышение уровня) – выражается через максимальный балл интенсивности сотрясений [7].

$$\lg \eta_0(\text{м}) = B(m \cdot M - p \cdot \lg h - s \cdot h + q - A), \quad (4)$$

где $B = 0,97$, $A = 8,95$, $m = 1,5$, $p = 4,5$, $q = 4,5$, $s = 0$ – эмпирические константы.

Эти параметры использовались при задании начальных условий в процессе численного моделирования цунами.

Результаты и обсуждение

Северные Курильские острова

Для северных Курильских островов средние значения широты и долготы $\bar{\varphi}$ эпицентра землетрясения составили $\bar{\varphi} = 50,4^\circ$ с. ш. и $\bar{\lambda} = 157,3^\circ$ в. д., вариации положения эпицентров весьма велики, что отражается в значениях среднеквадратических отклонений ($\sigma_\varphi = 0,8^\circ$, $\sigma_\lambda = 1,5^\circ$). Средняя глубина очага для выборки с $M \geq 6,5$ составила 47 км, хотя для наиболее сильных цунамигенных землетрясений с $M \geq 7,5$ она совпадает с эффективной глубиной h_0 согласно [7], что подтверждает разумность выбора последней в качестве начального условия.

Расчетные значения магнитуд редкой повторяемости составляют $M_{100} = 8,2$, резко выделяющийся максимум – Камчатское землетрясение 5 ноября 1952 г. ($M = 8,5$) отвечает периоду повторяемости 200 лет.

Характеристики источника, отвечающего магнитуде M_{100} и средним значениям широты и долготы (вариант 1.1; представлен на рис. 1), а также источника, смещенного на σ в юго-западном направлении (вариант 1.2).

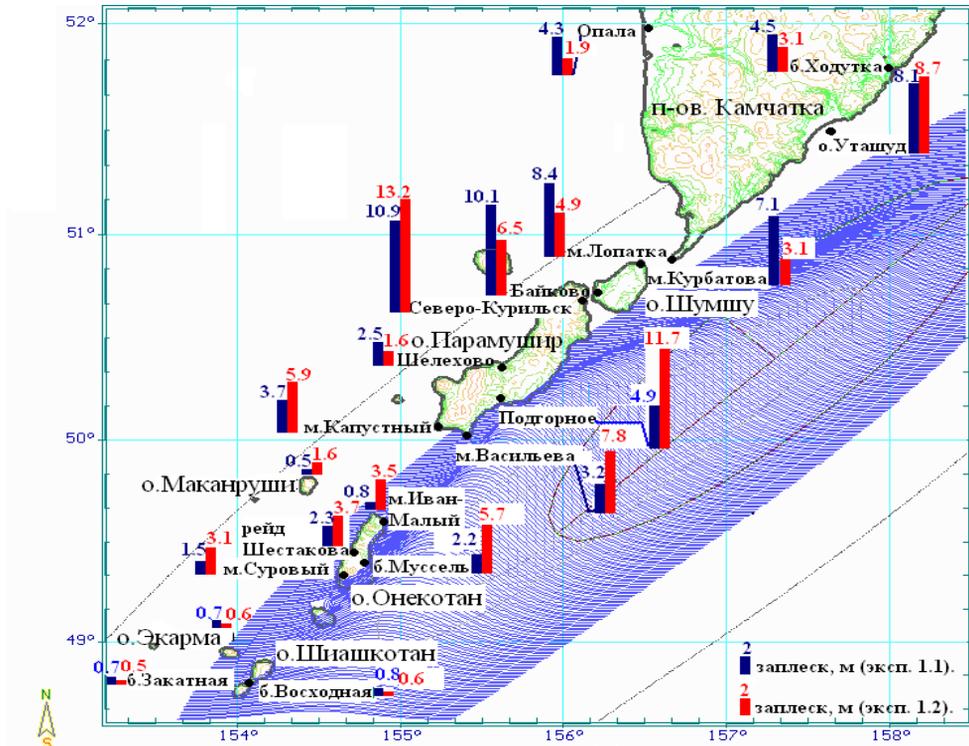
Таблица 1
Параметры модельных макросейсмических источников цунами

№	координаты		Магнитуда, М	Глубина очага h_0	Горизонтальные оси		Возвышение в источнике η , м
	φ , с. ш.	λ , в. д.			А, км	В, км	
1.1	50°24'	157°18'	8,2	36	272	72	6,63
1.2	49°36'	155°48'	8,2	36	272	72	6,63
2.1	46°48'	153°36'	8,1	36	250	72	4,73
2.2	47°24'	154°30'	8,1	36	250	72	4,73
2.3	46°12'	152°42'	8,1	36	250	72	4,73
3.1	44°12'	148°48'	8,3	36	296	72	9,26
3.2	42°42'	148°00'	8,3	36	296	72	9,26

Значения расчетных высот волн в основных пунктах побережья для данных источников приведены на рис. 1.

Наибольшие высоты волн 9–11 м отмечены на побережье Второго Курильского пролива, здесь они примерно в 1,5–2 раза больше чем на открытом тихоокеанском побережье северных Курил и юго-восточной Камчатки. Это наиболее цунамиопасный участок в данном районе, что согласуется с результатами цунамирайонирования по более точной методике, приведенными в [1]. Еще один участок, на котором наблюдалось локальное усиление цунами при крайнем юго-западном положении источника – юго-восточное побережье о. Парамушир, между м. Океанский и м. Васильева (б. Океанская, Подгорное), что также отмечено в [1]. Довольно высока степень опасности цунами на о. Онекотан (б. Муссель с океанской стороны), но также при варианте очага 1,2. На охотоморском побережье северных Курильских островов расчетные

значения высот волн повторяемостью один раз в 100 лет невелики для всех вариантов источника.



2

Рис. 1. Положение модельного источника цунами, отвечающего расчетной магнитуде M_{100} , и пунктов, для которых определялись высоты волн цунами. Северные Курилы

Таким образом, можно констатировать, что результаты расчета по упрощенной методике как по характеру пространственного распределения расчетных высот волн повторяемостью один раз в 100 лет, так и по их величинам хорошо согласуются с результатами, полученными на основе более точного подхода. Приходится констатировать, что основная часть населения северных Курил проживает на наиболее цунамиопасном побережье, сравнительно безопасные участки при этом практически безлюдны.

Средние Курильские острова

В центральной части Курильской островной гряды повторяемость сильных землетрясений заметно ниже, чем в северной – в выборку с магнитудой $M \geq 6,5$ попало всего 38 событий. Расчетная величина $M_{100} = 8,1$ хорошо согласуется с магнитудой сильнейшего землетрясения в данном районе 13 января 2007 г. (при этом максимальные высоты цунами были вызваны землетрясением 15 ноября 2006 г., магнитуда которого была меньше).

Для центральной части Курильской гряды средние значения широты и долготы $\bar{\varphi}$ эпицентра землетрясения составили $\bar{\varphi} = 46,8^\circ$ с. ш., $\bar{\lambda} = 153,6^\circ$ в. д. Вариации координат землетрясений в данном районе существенно меньше, чем на северных Курилах ($\sigma_\varphi = \pm 0,6^\circ$, $\sigma_\lambda = \pm 0,9^\circ$), что, вероятно, обусловлено меньшим объемом выборки. Глубина очага выбиралась равной эффективной глубине $h_0 = 36$ км.

Численное моделирование цунами выполнялось с использованием источников со средними и смещенными на σ к северо-востоку и юго-западу координатами, эквивалентной глубиной, для расчетного значения магнитуды $M_{100} = 8,1$ (эксперименты 2.1–2.3). Характеристики источников представлены в табл. 1. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

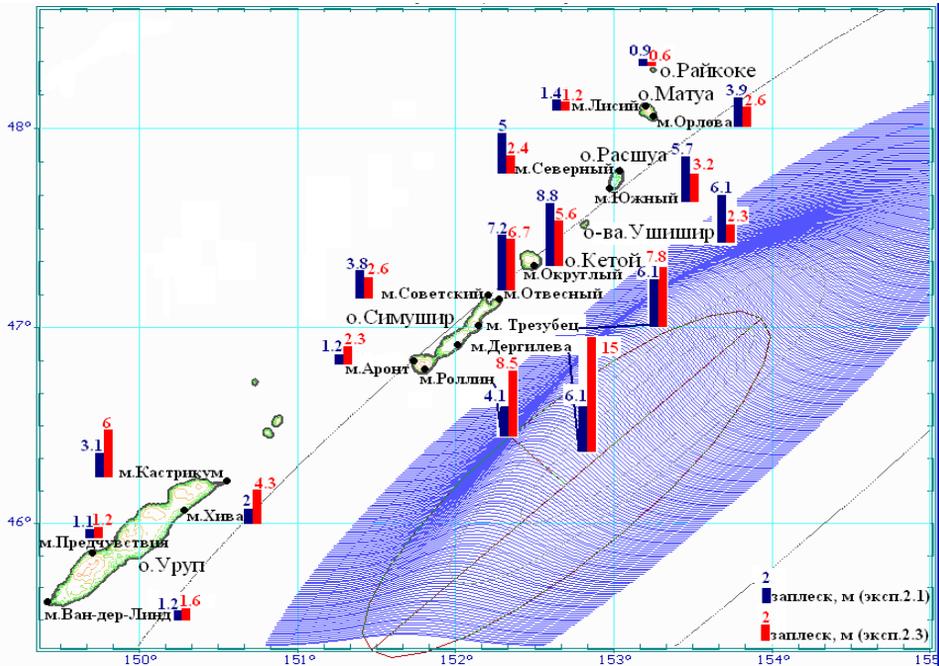


Рис. 2. Положение модельного источника цунами, отвечающего расчетной магнитуде M_{100} (варианты 2.1, 2.3), и пунктов, для которых определялись высоты волн цунами. Средние Курилы

Для тихоокеанского побережья средних Курил расчетные высоты волн составили 5–10 м, что заметно меньше, чем было получено по результатам обследования побережья после сильнейшего в данном районе землетрясения 15 ноября 2006 г. (12–15 м). Волны, близкие к реально наблюдавшимся, были получены только в эксперименте 2.3 (рис. 2), при крайнем юго-западном положении источника. Координаты землетрясения 15 ноября 2006 г. ($\varphi = 46^\circ 24'$; $\lambda = 154^\circ 18'$) близки к заданным в варианте 2.1, но глубина очага была существенно меньше эквивалентной (около 10 км). Наиболее вероятно, именно это

обстоятельство явилось причиной более низких значений расчетных высот волн по сравнению с наблюдавшимися при сильнейшем в данном районе цунами. Но в рамках предлагаемой экспресс-методики оценки цунамиопасности учесть подобные тонкости невозможно.

Южные Курильские острова

Число землетрясений с магнитудой $M \geq 6,5$ в данном районе было наибольшим – 128 событий. В частности, для южных Курил характерна стабилизация магнитуд в области больших значений – здесь отмечено несколько событий с $M = 8,2$, и не было событий с более высокими значениями. В таких случаях линейная аппроксимация дает явно завышенные оценки ($M_{100} = 8,5$), поэтому для описания эмпирического распределения теоретической зависимостью применяют третье предельное распределение, имеющее верхний предел ω . Оно не вполне адекватно отражает сложный характер эмпирического распределения, расчетное значение $M_{100} = 8,3$ представляется вполне приемлемой, хотя, возможно, и несколько завышенной оценкой. Эта величина и использовалась в процессе численного моделирования. Отметим, что это самое высокое значение M_{100} для Курильской гряды, соответственно и расчетные высоты волн цунами должны быть в этом районе максимальными.

Для южной части Курильской гряды средние значения широты и долготы $\bar{\lambda}$ эпицентра землетрясения составили $\bar{\varphi} = 44,2^\circ$ с. ш., $\bar{\lambda} = 148,8^\circ$ в. д., источник расположен прямо напротив о. Итуруп (рис. 3). Вариации координат землетрясений в данном районе примерно такие же, как и на северных Курилах ($\sigma_\varphi = 1,5^\circ$, $\sigma_\lambda = 0,8^\circ$). Численное моделирование цунами выполнялось с использованием источников со средними и смещенными на величину σ к юго-западу координатами, эквивалентной глубиной, для расчетного значения магнитуды $M_{100} = 8,1$ (эксперименты 3.1, 3.2). Результаты расчетов по двум положениям очага приведены на рис. 3.

Для варианта источника 3.1 максимальные высоты волн 16–18 м получены на океанском побережье о. Итуруп, непосредственно напротив источника – м. Бешеный, м. Рогатый, м. Дракон, Буревестник, м. Урумбет. Это заметно больше, чем получилось по более точной методике [1], по которой для океанского побережья о. Итуруп расчетные высоты цунами составили 8–10 м. Очевидно, причина этого завышения связана с тем, что реально землетрясений с $M = 8,3$ в районе южных Курильских островов за анализируемый период времени не отмечалось, к тому же источники наиболее сильных цунами не находились напротив острова, как это закладывалось в качестве начальных условий варианта 3.1. Тем не менее, полученные результаты можно использовать в качестве грубой предварительной оценки опасности цунами в этом районе.

При втором варианте источника интенсивность цунами на побережье о. Итуруп уменьшается, максимальные высоты отмечены на океанском побе-

режье о. Шикотан (16–20 м). Данные оценки также несколько завышены, хотя и в меньшей степени, чем в первом варианте для о. Итуруп, так как при Шикотанском цунами 5 октября 1994 г. здесь наблюдались близкие значения заплесков [3].

Заключение

Выполненные расчеты показали, что для северных Курильских островов предлагаемая экспресс-методика дает хорошее согласие с более точной, как по характеру пространственного распределения, так и по полученным значениям расчетных высот волн цунами повторяемостью один раз в 100 лет [1]. Самая высокая степень цунамиопасности отмечена на берегах Второго Курильского пролива, где проживает основная часть населения района и где сосредоточены портовые сооружения и промышленные объекты. Еще один участок с высокими значениями высот цунами расположен на юго-востоке о. Парамушир, между мысами Океанский и Васильева.

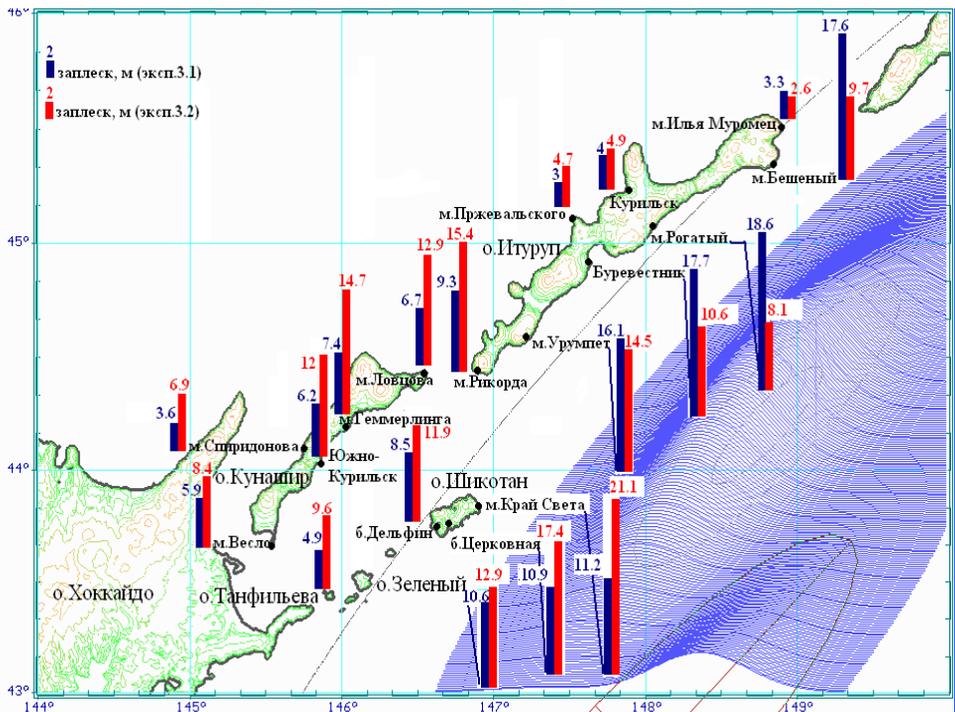


Рис. 3. Положение модельного источника цунами, отвечающего расчетной магнитуде M_{100} (вариант 3.1), и пунктов, для которых определялись высоты волн цунами. Южные Курилы

Для тихоокеанского побережья средних Курил расчетные высоты волн составили 5–10 м, что существенно меньше, чем было получено по результатам обследования побережья после сильнейшего в данном районе землетря-

сения 15 ноября 2006 г. (12–15 м). Это занижение обусловлено использованием в расчетах так называемой эквивалентной глубины очага землетрясения, равной 36 км [7], в то время как в 2006 году глубина была около 10 км. Волны, близкие к реально наблюдавшимся, были получены только в эксперименте 2.3, при крайнем юго-западном положении источника.

Для тихоокеанского побережья о. Итуруп расчетные высоты составили 16–18 м, что существенно выше чем по более точной методике [1] (8–10 м). Причина этого завышения связана с тем, что землетрясений с $M = 8,3$ в районе Южных Курильских островов за анализируемый период времени не отмечалось, к тому же источники наиболее сильных цунами не находились напротив острова Итуруп, как это закладывалось в качестве начальных условий. Близкие к реально наблюдавшимся волны в районе острова Шикотан [3] были получены только в эксперименте 3.2, при крайнем юго-западном положении источника.

Анализ полученных результатов показал, что, несмотря на определенные расхождения с более точным подходом, предлагаемая методика дает разумные оценки пространственного распределения и высот волн цунами редкой повторяемости, которые можно использовать в качестве упрощенной, предварительной оценки цунамиопасности побережья. Такую оценку можно получить быстро при сравнительно небольших трудозатратах.

Литература

1. Атлас Курильских островов / Редкол.: академик РАН В. М. Котляков (председатель), академик РАН П. Я. Бакланов, Н. Н. Комедчиков (гл. ред.) и др. отв. ред. – картограф Е. А. Федорова. – Российская академия наук. Институт географии РАН. Тихоокеанских институт географии ДВО РАН.– М. – Владивосток: ИПЦ «ДИК», 2009. – 516 с.
2. Гумбель Э. Статистика экстремальных значений. – М.: Мир, 1965. – 450 с.
3. Иващенко А. И., Гусяков В. К., Джумагалиев В. А., Йех Г., Жукова Л. Д., Золотухина Н. Д., Кайстренко В. М., Като Л. Н., Клочков А. А., Королев Ю. П., Кругляков А. А., Куликов Е. А., Куракин В. Н., Левин Б. В., Пелиновский Е. Н., Поплавский А. А., Титов В. В., Харламов А. А., Храмушин В. Н., Шельтинг Е. В. Шикотанское цунами 5 октября 1994 года // Докл. РАН. 1996. – Т. 348. – № 4. – С. 532–538.
4. Кайстренко В. М. Вероятностная модель заплесков цунами применительно к проблеме прогноза // Цунами и сопутствующие явления. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – С. 80–90.
5. Королев Ю. П., Жукова Л. Д., Золотухина Н. Д., Клочков А. А., Куликов Е. А., Куракин В. Н., Кругляков А. А., Левин Б. В., Поплавский А. А., Терентьев Н. С. Проявления цунами 4 октября 1994 года на побережье Курильских островов // Проявления конкретных цунами. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – С. 74–92.

6. Левин Б. В., Кайстренко В. М., Рыбин А. В., Носов М. А., Пинегина Т. К., Разжигаева Н. Г., Сасорова Е. В., Ганзей К. С., Ивельская Т. Н., Кравчуновская Е. А., Колесов С. В., Евдокимов Ю. В., Буржуа Д., Макиннесс Б., Фицхью Б., Проявления цунами 15 ноября 2006 г. На Центральных Курильских отсровах и результаты моделирования высот заплесков // Доклады РАН. – 2008. – Т. 419. – № 1. – С. 118–122.
7. Поплавский А. А., Храмушин В. Н. Методы оперативного прогноза цунами и штормовых наводнений. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 176 с.
8. Поплавский А. А., Храмушин В. Н., Непоп К. И., Королев Ю. П. Оперативный прогноз цунами на морских берегах Дальнего Востока России. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – 273 с.
9. Соловьев С. Л. Повторяемость землетрясений и цунами в Тихом океане // Волны цунами. Труды СахКНИИ. – Вып. 29. – Южно-Сахалинск, 1972. – С. 7–47.
10. Федотов С. А. О сейсмическом цикле, возможности количественного сейсмического районирования и долгосрочном сейсмическом прогнозе // Сейсмическое районирование СССР. – М.: Наука, 1968. – С. 121–150.
11. Kaistrenko V. M. Probability model of tsunami runup and long – term prediction of tsunami heights / Tsunamis: Treir Science and Hazards Mitigation Proceedings International Tsunami Symposium (July 31 – August 3, 1989). – Novosibirsk, 1990. – P. 249–253.
12. Okada Y. Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // Bul. Seism. Soc. Am. 1985. V. 75. – P. 1135–1154.
13. Yeh H., Titov V., Gusakov V., Pelinovsky E., Khramushib V., Kaistrenko V. The 1994 Shikotan earthquake tsunamis // PAGEOPH. – 1995. – Vol. 144, No 3 / 4. – P. 856–874.