

*Хвостова О.Е., аспирантка кафедры «Прикладная математика»,
Куркин А.А., д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры «Прикладная математика».
Нижегородский Государственный Технический Университет им. Р.Е. Алексеева*

ОЦЕНКА ЦУНАМИОПАСНОСТИ ПОБЕРЕЖЬЯ ОСТРОВА САХАЛИН

olga.khvastova@gmail.com

В настоящей работе представлены результаты моделирования исторических цунами в Охотском и Японском морях. Обсуждаются сравнительные характеристики высот волн цунами вдоль побережья острова Сахалин от исторических источников. Для расчетов использовался программный код AVI-NAMI, основанный на нелинейных уравнениях теории мелкой воды. Представлено распределение рассчитанных высот волн вдоль Сахалинского побережья. Обнаружены общие свойства распределения высот волн вдоль восточного и западного побережья острова, что позволяет сделать предварительный прогноз о высотах волн в различных точках побережья Сахалина в случае будущих возможных цунами.

Ключевые слова: цунами, землетрясение, теория мелкой воды, батиметрия, распределение высот волн, оценка цунамиопасности побережья.

Одна из основных цунамогенных зон Тихого океана – Курило-Камчатский глубоководный желоб. К зонам, наиболее подверженным воздействию цунами, относится тихоокеанское побережье полуострова Камчатка, Курильских островов и о. Сахалин [1].

В Охотском море сильные землетрясения редки и не вызывают цунами. Дно Охотского моря покрыто мощным слоем отложений, что служит надежным амортизатором. Тихоокеанское побережье Курильских островов принимает на себя основную энергию цунами, идущих с Тихого океана. Однако хорошо известны и катастрофические землетрясения на о. Сахалин, например, Нефтегорское землетрясение в 1995 г. с магнитудой 7,1 и Углегорское – 2000 г. с магнитудой 7,0 [2].

Сильное землетрясение (8-9 баллов) произошло 5 октября 1994 г. в районе о. Шикотан. От стихии погибло 11 человек. Волны цунами, вызванные этим землетрясением, привели к затоплению значительных участков тихоокеанского побережья Курильских островов. Максимальная высота волны, равная 10 м, наблюдалась на самом о. Шикотан. На Сахалине волны цунами практически не наблюдались [3].

В Охотское море цунами проникает через глубоководные Курильские проливы, которые являются самостоятельными источниками вторичных волн. За период 1958-1998 гг. на Сахалине и Курилах было зарегистрировано 67 землетрясений, 42 случая цунами, из них восемь тревог по цунами, возникшим в отдаленных районах Тихого океана [4]. Тридцать четыре события, произошедших в Курило-Камчатской зоне, Охотском и Японском морях, сопровождались цунами различной силы (например, коле-

бания уровня воды 7 ноября 1958 г. по визуальным оценкам на островах Итуруп и Уруп составляло 7-8 м).

Уже из этого краткого описания следует, что опасность цунами для разных участков побережья о. Сахалин различна. Также немаловажную роль играет положение источников цунами. Так, основным источником заметных цунами являются локальные землетрясения типа Монеронского, а также источники в северной части Японского моря. Высота волны вдоль побережья острова меняется неравномерно, заметные высоты волн наблюдаются в основном в юго-западной и юго-восточной части острова. Ниже мы используем методы численного моделирования исторических цунами для сравнительной оценки цунамиопасности побережья о. Сахалин.

В настоящей работе представлены результаты моделирования исторических цунами в Охотском и Японском морях. Используемые в работе данные о цунами систематизированы в базе данных исторических цунами для Тихого океана, разработанной в Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН под руководством Гусякова В.К. [4]. Для каждого отдельно взятого землетрясения было произведено моделирование генерации и распространения волны цунами. На основании полученных данных проводится анализ цунамиопасности побережья о. Сахалин.

Для расчетов использовался программный код AVI-NAMI – программное обеспечение для моделирования генерации и распространения цунами. AVI-NAMI официально рекомендована Океанографической комиссией ЮНЕСКО для расчетов генерации и распространения цунами.

Разработкой и поддержкой AVI-NAMI и его модификаций (например NAMI-DANCE и two-layer) на протяжении ряда лет занимаются сотрудники Лаборатории математического моде-

лирования геофизических и экологических процессов Нижегородского Государственного Технического Университета им. Р.Е. Алексева.

В основе программы AVI-NAMI лежит усовершенствованная численная модель, построенная в рамках уравнений нелинейной теории мелкой воды [5]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{k}{2D^2} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{k}{2D^2} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

где η – смещение водной поверхности, t – время, x и y – горизонтальные координаты, M и N – потоки вдоль осей x и y , $D = h(x, y) + \eta$ – полная глубина и $h(x, y)$ – невозмущенная глубина воды, g – гравитационная постоянная, $k = 0.0025$ – коэффициент турбулентного трения о дно.

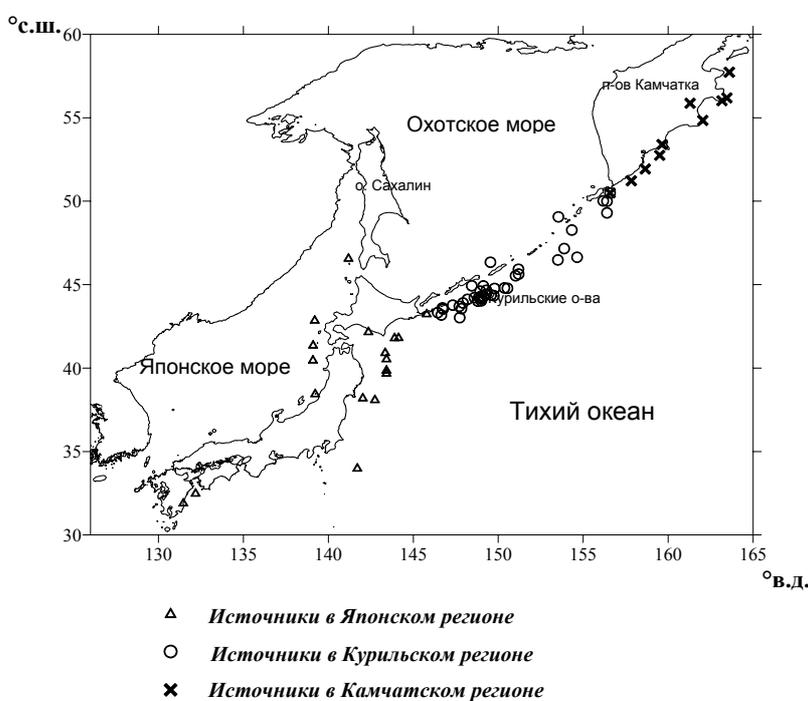


Рис. 2. – Область расчета с указанием эпицентров землетрясений в разных регионах



Рис. 2. – Расположение компьютерных мареографов

Для моделирования использована батиметрия Курило-Камчатского региона (GEBCO Digital Atlas) с разрешением по обеим координатам 1500 м. Общая область моделирования представлена на Рис. 1. Число узлов численной схемы равно $2341 \times 1801 = 4\,216\,141$. Моделирование проводилось с временным шагом в 2 с, обеспечивающим стабильность численного алгоритма. В последних мористых точках (вблизи берега на глубине 5 м) ставится условие вертикальной стенки, соответствующее полному отражению. Такая мо-

дель, не учитывающая накат волн на берег, часто используется в расчетах. Она позволяет сравнивать высоты волн на различных участках побережья, а также выдать исходную информацию для расчета наката волн на берег [5].

В настоящей работе моделировались исторические события, произошедшие после 1950 г. Всего было промоделировано 69 случаев волн цунами. Все моделируемые события были разделены по регионам, которые выбирались исходя из месторасположения землетрясений, вызвавших цу-

нами. Это Японский (18 событий), Курильский (41 событие) и Камчатский (10 событий) регионы [4]. Положение эпицентров всех моделируемых землетрясений (по регионам) показано на Рис. 1.

Вблизи населенных пунктов о. Сахалин были расставлены компьютерные мареографы (см. Рис. 2), в т.ч. Горнозаводск, Невельск, Холмск, Ильинский, Красногорск, Углегорск, Александровск-Сахалинский, Оха, Поронайск, Макаров, Восточный, Долинск, Корсаков, Анива.

На Рис. 3 и 4 представлено максимальное распределение высот волн вдоль западного и восточного побережья о. Сахалин соответственно. Все результаты сведены воедино для демонстрации общих свойств распределения высот волн вдоль восточного и западного побережья о. Сахалин. Поскольку очаги цунами расположены на различных расстояниях от побережья, высоты волн от более близких очагов, как правило, оказываются большими, чем от далеких. Чтобы исключить этот эффект, функция распределения высот волн, рассчитанная для каждого события, нормализовывалась на максимальное значение для каждого случая, отдельно для западного и восточного побережья Сахалина.

Из Рис. 3 и 4 хорошо видно, что высота волны вдоль побережья меняется весьма неравномерно. Максимальные высоты волн приходятся на южную часть острова, а также на центральную часть восточного побережья. Основным источником цунами для Сахалинского побережья являются Курильские землетрясения. Хотя высоты волн в этих случаях не самые большие, почти в половине случаев (в 20 из 41, 49%) зарегистрированы волны более полуметра. Для Японских цунами волны более 0.5 м были зарегистрированы в 7 случаях из 18 (39%), а для Камчатских не зарегистрированы вовсе.

Рассмотрим распределение максимальных высот волн для западного побережья острова. Из проведенных расчетов вытекает, что наиболее опасными зонами здесь являются районы Красногорск – Ильинский и Невельск – Горнозаводск (юго-западная часть острова, волны высотой 90-100% от максимальных), а также мыс Крильон на южной оконечности Сахалина. На севере, в районе Амурского Лимана, а также в районе Александровска-Сахалинского волны практически не зарегистрированы. Волны средней величины (20-45% от максимальных) наблюдались в районе м. Елизаветы, залива Тык, м. Мосия – Бошняково – Шахтерск – Орлово – м. Ламанон. Заметное снижение высот волн (с 80-100% до 20-30% от максимальных) зарегистрировано в районе южнее Холмска, а также в районе Лужков. Это означает,

что эти части побережья хорошо защищены от волн цунами.

В целом заметно повышение высот волн в районе мысов: м. Елизаветы, м. Тук, м. Мосия, м. Ламанон, м. Крильон. На мысах происходит фокусирование распространяющихся волн. Исключением является небольшая часть побережья в районе Ильинского. Эта часть побережья достаточно сильно вдается внутрь острова, а волны достигают 90-100% от максимальных.

Распределение максимальных высот волн вдоль восточного побережья о. Сахалин гораздо более равномерно. Максимальные волны были зарегистрированы в районе Пограничного, а также в южной части острова – м. Анива. Небольшие волны, 20-25% от максимальных, наблюдались в районе Охи, и Ногликов. Средние высоты – 40-50% – были зарегистрированы в районе залива Чайво, а также в юго-восточной части острова: от Макарова до м. Острый. В целом можно отметить, что северо-восточная часть о. Сахалин со своими длинными косами, заливами и узкими островами, расположенными вдоль берега, достаточно хорошо защищена от цунами. Средняя же часть восточного побережья получает максимальный урон. Но необходимо отметить, что эта часть побережья острова представляет собой обрыв, и на очень большом протяжении и населенных пунктов здесь практически нет.

В Табл. 1 представлены максимальные и средние высоты волн, наблюдаемые на восточном и западном побережьях о. Сахалин во время цунами, пришедших из разных регионов. Наиболее значительные волны были зарегистрированы для Японских цунами: максимальное значение волны – 6.66 м на западном побережье и 3.132 м на восточном. Хотя в среднем максимальные высоты волн не превышают 1.5 м на западном и 0.5 м на восточном побережье острова. Менее опасными (относительно Японских цунами) можно считать цунами, вызванные землетрясениями в Курильском регионе. В отличие от Японских цунами, здесь наиболее подвержено опасности восточное побережье о. Сахалин, которое расположено по ходу распространения волны цунами. Максимальное значение волны – 1.98 м для западного и 5.9 м для восточного побережья. Средние же значения соответственно 0.295 м и 1.072 м для западного и восточного побережий острова. Наиболее слабо себя проявляют на Сахалинском побережье Камчатские цунами: средние значения волн – 0.3 см и 4.5 см для западного и восточного побережий соответственно. Такие данные подтверждают исследование, проведенные для п-ова Камчатка [2].

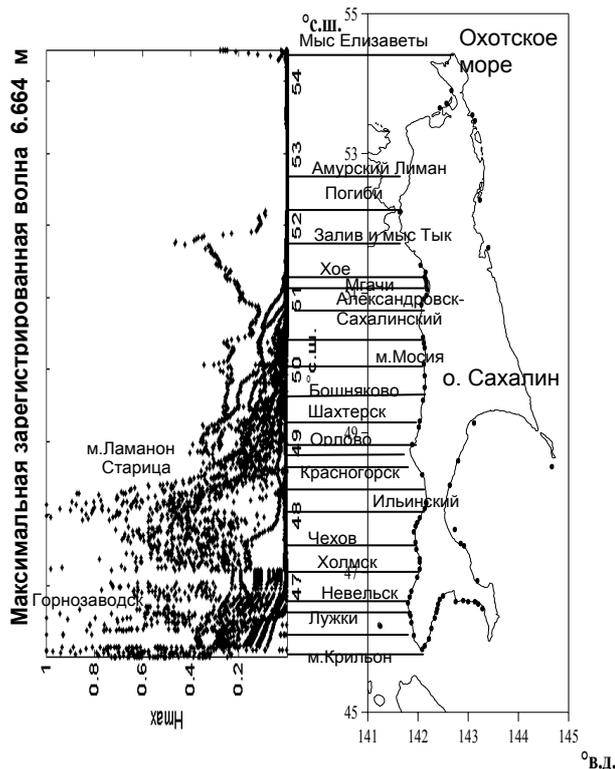


Рис. 4 – Распределение максимальных высот волн вдоль западного побережья о. Сахалин

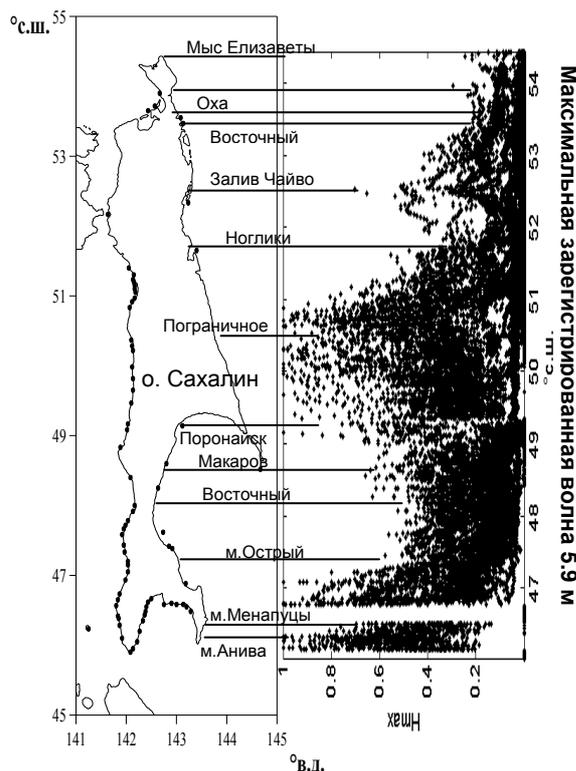


Рис. 4 – Распределение максимальных высот волн вдоль восточного побережья о. Сахалин

Таблица 1.

Максимальные и средние высоты волн для цунами, возникших в различных регионах

Регион	Максимальная высота волн		Средняя высота волн	
	Западное побережье, м	Восточное побережье, м	Западное побережье, м	Восточное побережье, м
Японские цунами	6.664	3.132	1.485	0.472
Курильские цунами	1.985	5.9	0.295	1.072
Камчатские цунами	0.013	0.375	0.003	0.045

Согласно расчетам, высоты волн в различных населенных пунктах были следующими. На западном побережье высокие волны (до 60% от максимальных) наблюдались Холмске (до 4.1 м), Горнозаводске (до 3.9 м), Ильинске (до 3.95 м). Немного меньшие (до 50%) – в Невельске (до 2.8 м), Чехове (до 2.8 м), Томари (до 3.1 м), Красногорске (до 2.9 м). В Александровске-Сахалинском высоты волн не достигают и 10% от максимальных (до 0.8 м). На восточном побережье острова наименее защищенным оказывается Поронайск (до 60% от максимальных высот волн, до 2.2 м). Более благополучно ситуация обстоит для Макарова (до 2.4 м), Восточного (до 2.5 м) и Долинска (до 2.1 м). При этом значения средних высот волн показывают, что цунами, пришедшие из Японского региона, дают больший вклад на западном побережье, в то время как Курильские цунами большую роль

играют на востоке острова. Это подтверждает картину распределения высот волн, описанную выше. Также надо отметить слабую защищенность населенных пунктов, которые расположены в южной части острова. Как в случае Японских, так и при Курильских цунами наблюдаемые высоты волн здесь достаточно большие: до 3.8 м в Корсакове и в Аниве.

Что касается времени проявления максимальных волн, для Японских цунами оно приблизительно одинаково и для восточного, и для западного побережий (в среднем 100-112 минут). Для Курильских цунами ситуация несколько иная. На восточном побережье среднее время прихода максимальных волн значительно меньше, чем на западном: в среднем 45-60 минут. А на западном и южном – 135-55 минут.

В целом можно сказать, что большая часть моделируемых исторических событий относительно слабо проявилась на побережье о. Сахалин. Лишь для некоторых Японских (6 случаев) и Курильских цунами (7 случаев) высоты волн были значительными, т.е. превышали 1.5 м. Замечено также, что распределение высот волн зависит главным образом от особенностей морской и береговой топографии. В связи с этим выделены зоны с различной цунамиопасностью.

На западном побережье наиболее защищенными оказываются районы: северо-западное побережье о. Сахалин, берег Амурского Лимана; Погиби; Александровск-Сахалинский; часть побережья между Холмском и Невельском. Среди районов со средней защищенностью можно выделить: м. Елизаветы; залив Тык; часть побережья между м. Мосия и м. Ламанон; Лужки. Наименее защищенными районами на западном побережье являются: Красногорск; Ильинский; Холмск; Невельск; Горнозаводск; м. Крильон.

На восточном побережье также можно выделить зоны с различной защищенностью от волн цунами. Наиболее безопасными являются районы: Оха; Восточный (север о. Сахалин); Ноглики. Несколько более защищенными оказываются следующие районы: залив Чайво; Макаров; Восточный (юг о. Сахалин); м. Острый; Холмск; Анива. Наиболее опасными и незащищенными оказываются: побережье в районе Пограничного; м. Менапуцы; м. Анива.

Берега России омываются водами трех океанов и тринадцати морей. Более 80% запасов нефти и газа России сосредоточено на шельфе. Всевозрастающие объемы шельфового и берегового строительства в цунамиопасных регионах, таких как Дальний Восток, требуют качественно нового подхода к проблеме цунами, разработке подробной карты цунами-районирования, учету силы волн при проектировании конструкций и сооружений, оценке экологической опасности последствий разрушений.

В настоящей работе сделан предварительный анализ и оценка цунамиопасности побережья о. Сахалин. В результате было произведено моделирование 69 исторических событий. По полученным данным построено и проанализировано распределение максимальных высот

волн вдоль западного и восточного побережья о. Сахалин. Выделены зоны с различной цунами опасностью. Замечено, что для цунами из разных регионов (выделенных по расположению источников цунами) высоты волн для западного и восточного побережий о. Сахалин будут различными. Японские цунами проявляют себя в основном на южном побережье острова, распределение высот волн относительно равномерно в западной и восточной части. Курильские цунами же более всего заметны на восточном побережье острова. Камчатские – практически не заметны на Сахалине.

Но в целом характерно, что все кривые распределения имеют общее сходство вне зависимости от месторасположения источника. Это означает, что если в будущем возникнет волна в цунамигенной зоне Курил или Японии, то вне зависимости от месторасположения очага распределение волн вдоль побережья останется таким же, как и в проработанных расчетах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куркин, А.А. Сравнительная оценка цунамиопасности япономорского побережья России на основе численного моделирования / А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский, Б.Х. Чой, Д.С. Ли. // Физика моря / Океанология, - Т. 44, №2, 2004. - С. 179-188.
2. Lobkovsky, L.I. Generation and propagation of catastrophic tsunamis in the sea of Okhotsk basin: possible scenarios / L.I. Lobkovsky, R.Kh. Masova, L.Yu. Kataeva, V.V. Baranov // Doklady Earth Sciences, 2006, - Vol. 410, No. 7, - P. 1156-1159.
3. Иващенко, А.И. Шикотанское цунами 5 октября 1994 г. / А.И. Иващенко, В.К. Гусяков, В.А. Джумагалиев, и др. // ДАН, 1996, - Т 348, №4. - С. 532-538.
4. Historical tsunami database for the Pacific, 47 b.c. to present [Электронный ресурс] – Version 2.4, 2005 – Режим доступа: <http://tsun.sscc.ru/htdbpac/>
5. Пелиновский, Е.Н. Гидродинамика волн цунами. / Е.Н. Пелиновский – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1996.