

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАТУРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ЦУНАМИРАЙОНИРОВАНИЯ*

Е. Н. ЛИТВИН

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН
Южно-Сахалинск, Россия*

К. В. ПОКАЗЕЕВ

*Московская государственная академия прикладной биотехнологии,
Россия*

В. Н. ТУПОРШИН

*Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН
Южно-Сахалинск, Россия*

Обсуждается возможность определения резонансно-частотных характеристик акватории на основе анализа измерений уровня моря с целью оценки цунамиопасности конкретных участков побережья. Приведен анализ данных, полученных в Камчатском заливе и на шельфе Шикотана, которые могут быть использованы в локальном цунамирайонировании.

При планировании мероприятий по обеспечению безопасности населения и устойчивой работы предприятий в районах, подверженных действию цунами, актуальным является определение максимальной опасности волн цунами для конкретного участка побережья. Эта проблема непосредственно связана с задачами цунамирайонирования, включающими оценку вероятности возникновения цунами заданной высоты, представляющей опасность для данного участка побережья, и определение зоны возможного затопления в зависимости от параметров волны цунами [1, 2].

Методика локального цунамирайонирования включает следующие этапы.

1. Исторический ряд цунами применяется для получения эмпирической зависимости частоты появления цунами, превышающих заданную пороговую высоту волны. Построенная зависимость используется для получения оценки вероятности возникновения цунами интересующей нас высоты волны цунами за определенный период времени. Подобного рода долгосрочный прогноз имеет значительную погрешность ввиду недостатка инструментальных данных, которые стали доступными лишь в последние 30–40 лет.

2. На основе данных сейсморайонирования определяются очаги цунамигенных землетрясений, устанавливаются потенциальные очаги цунами и их характеристики.

3. Путем численного моделирования проводятся расчет волнового поля с учетом воз-

*© Е. Н. Литвин, К. В. Показеев, В. Н. Тупоршин, 1997.

возможных движений в очаге и реальной топографии дна, определение передаточных характеристик трассы волны цунами, расчет подъема уровня и наката волны на берег [1]. При реализации этого этапа возникают определенные трудности: недостаточные знания структуры очага и движений в нем не позволяют достоверно задать начальные условия для решения задачи генерации цунами, а изрезанность береговой линии и недостаточные морфологические и гидрологические сведения вдоль вероятной трассы усложняют задачу расчета подъема уровня цунами и наката волны на берег.

4. В значительной мере избежать эти трудности позволяет натурный эксперимент, при проведении которого возможно определение резонансно-частотных характеристик акватории по данным натуральных наблюдений за уровнем моря [3]. Натурный эксперимент допускает также проверку некоторых результатов численного моделирования.

Для оценки цунамиопасности участков побережья существенными оказываются два следующие фактора: геометрическое положение заданного участка берега относительно очага цунами и особенности рельефа дна на трассе движения волны цунами. По положению относительно побережья очага цунами разделяются на два типа: удаленные — в случае, когда волны приходят к берегу из открытого океана, и близкие — когда очаг цунами находится в пределах шельфа или материкового склона и имеет размеры, сравнимые с расстоянием от источника волны до берега [1, 2].

Для Тихоокеанского побережья России потенциальные удаленные источники цунами расположены в пределах Японской, Алеутско — Аляскинской и Чилийской цунамигенных зон, а потенциальные близкие находятся в Курило — Камчатской сейсмической зоне. Зависимость формы проявления цунами в прибрежной зоне от типа очага исследована в [1]. Цунами от удаленного источника, находящегося от очага на расстоянии, в 10 и более раз превышающем характерный размер очага, проявляется в форме цуга волн. При этом наибольшую опасность представляют волны с частотами, соответствующими резонансным частотам шельфа. При близких источниках волна цунами обычно представляет собой одиночный импульс, форма которого определяется структурой сейсмического очага, поэтому анализ передаточных характеристик шельфа для близкого очага становится неэффективным. В промежуточных случаях, когда очаг от берега удален на расстояние от одного до десяти характерных размеров очага, цунами проявляется в виде захваченных волн, распространяющихся вдоль шельфа.

Таким образом, во многих случаях возникновения цунами для оценки локальной цунамиопасности необходимо знание резонансных частот шельфа и передаточных характеристик трассы волны цунами. В открытом океане волноводом цунами часто служат подводные хребты. В прибрежной зоне роль волновода выполняет шельф. Залив и эстуарий являются локальными элементами трассы цунами. Акватории подобного типа при численном моделировании представляют наибольшую трудность из-за сложности учета эффектов диссипации и рассеяния волн и отсутствия необходимой гидро- и морфологической информации. Натурный эксперимент проявляет свои преимущества при исследовании именно сложных акваторий.

Определение частотных характеристик акватории вдоль трассы распространения цунами методом натурального эксперимента заключается в следующем. Располагая многоточечными данными наблюдений за ходом уровня моря, на основе спектрального анализа можно определить резонансные частоты акваторий и передаточные характеристики трассы цунами. Каждая гармоника длинных волн, имевшая в открытом океане амплитуду $X(\omega)$, при нормальном подходе к берегу преобразуется в гармонику $Y(x, \omega) = K(x, \omega)X(\omega)$, где $K(x, \omega)$ — функция, описывающая трансформацию проходящей волны в зависимости от

частоты и расстояния от берега x . Функция $K(x, \omega)$ является резонансной характеристикой данной акватории, описывающей влияние рельефа на волновое поле. В случае, если двумерным характером волновых колебаний пренебречь, это представление можно использовать для узких бухт и заливов [4, 5].

Роль входного сигнала $X(\omega)$ в натурном эксперименте играет естественный длинноволновый шум. В открытом океане спектр длинных волн обладает высокой стабильностью. При приближении к берегу возрастает волновая энергия, на спектре появляются индивидуальные особенности, характеризующие частотные свойства акватории [6]. В отдельных случаях на общем фоне длинноволнового шума удается выделить цуг прогрессивных волн и проследить его трансформацию в акватории [3].

В настоящее время имеются немногочисленные примеры исследования частотных свойств акваторий посредством натурального эксперимента [3–5, 7–9]. Например, в цикле работ [4, 5, 7, 8] приведены взаимный спектральный анализ уровня в заливе Онагава и напротив входа в залив, сравнение оценок коэффициента передачи волновой энергии в залив для длинноволнового шума и для реальной волны цунами, а также сравнение теоретического расчета передаточной функции для одномерной модели залива с данными натурального эксперимента.

Рассмотрим результаты натурального эксперимента, проведенного в Камчатском заливе. В сентябре — октябре 1988 г. экспедицией ИМГиГ ДВО РАН были осуществлены постановки семи донных кабельных станций. Каждая станция состояла из датчика давления вибротронного типа, кабельной линии и цифровой регистрирующей аппаратуры, расположенной на берегу. Три датчика (N, L, R) были расположены в вершинах залива; расстояние между ними составляло около 20 км. Датчик R находился перед устьем р. Камчатка. Четвертый датчик (F) был расположен в протоке Озерная, соединяющей устье р. Камчатка, озеро Нерпичье и Камчатский залив недалеко от мареографа. Регистрация колебаний уровня этими датчиками осуществлялась с дискретностью 1 мин. Система трех датчиков, размещенных в устье, измеряла колебания уровня моря с дискретностью 1 с. Результаты измерений, выполненных с помощью этой системы датчиков, опубликованы в [10].

После выделения приливов и низкочастотной фильтрации были рассчитаны функции спектральной плотности и когерентности датчиков N, L, R, F. Оказалось, что большая часть энергии (около 80 %) длинноволнового шума в диапазоне волн цунами в вершинах Камчатского залива (датчики N, L, R) приходится на две частотные составляющие: 0.017 и 0.026 цикл/мин. Наибольшая доля энергии приходится на частоту 0.026 цикл/мин, которая хорошо согласуется с резонансным периодом 30 мин, соответствующим собственной моде Камчатского залива [9]. Для анализа передаточных свойств акватории проанализируем связь колебаний уровня в вершине залива (датчик R, ряд уровня X) и протоке (датчик F, ряд уровня Y). Для датчика F также характерно наличие максимума на частоте 0.026 цикл/мин. Высокая когерентность между датчиками F и R и фазовое запаздывание между ними примерно в полтора порядка позволяют объяснить этот максимум как свидетельство проникновения прогрессивной волны из Камчатского залива в протоку. Для рядов уровня (датчик R) и Y (датчик F) проводилась полосовая фильтрация на частоте 0.026 цикл/мин, для отфильтрованных рядов рассчитывались огибающие G_x, G_y . Коэффициент передачи из залива в протоку на частоте 0.026 цикл/мин определялся как отношение соответствующих огибающих:

$$K = \frac{G_y}{G_x}.$$

Для проверки зависимости коэффициента передачи от фазы прилива была проанализирована связь между временным рядом (t) и низкочастотными составляющими ряда t , обусловленными колебаниями уровня приливного характера. Линейная регрессия между K и t имеет вид:

$$K = (0.50 \pm 0.04) + (0.0038 \pm 0.0013)t.$$

Коэффициенты регрессии соответствуют 95 %-му доверительному интервалу. Коэффициент корреляции между K и t равен 0.306. Для наших параметров выборки 5 %-й вероятности отсутствия связи между процессами K и t соответствует значение коэффициента, равное 0.121 [11]. Полученные данные указывают на необходимость принять гипотезу о зависимости коэффициента передачи от среднего уровня моря. О важности учета этой зависимости можно судить хотя бы по тому факту, что при разнице уровня в заливе в 1 м ($-0.5 - +0.5$ м относительно среднего уровня) коэффициент принимает соответственно значения 0.31 и 0.69, т.е. изменяется более чем в 2 раза.

Таким образом, коэффициент передачи на резонансной частоте 0.026 цикл/мин зависит от фазы прилива. Подобный эффект модуляции коэффициента передачи необходимо учитывать при цунамирайонировании, так как коэффициент усиления цунами в данной акватории будет зависеть от фазы прилива [12].

Наряду с оценками коэффициента K на частоте 0.026 цикл/мин с помощью расчета взаимных спектров были найдены коэффициенты передачи для рядов уровней X (датчик R) и Y (датчик F) в широком частотном диапазоне. Эти оценки показали, что коэффициент передачи в широком частотном диапазоне (и прежде всего на частотах 0.017 и 0.026 цикл/мин) зависит от фазы прилива.

Изучение длинноволнового шума на шельфе о. Шикотан проводилось путем анализа синхронных регистраций колебаний уровня моря в нескольких точках исследуемой акватории. Скорости измерялись при помощи специализированной автономной станции "Поток-2м". Проводилась также синхронная регистрация атмосферного давления в нескольких береговых пунктах. Для измерения уровня использовались датчики вибротронного типа. Постановка кабельных станций и все измерения выполнялись сотрудниками Гидрофизической лаборатории "Шикотан" ИМГиГ ДВО РАН. Полученные оценки частот собственных мод бухт Церковная, Димитрова, Малокурильская совпадают с оценками численного моделирования [13, 14]. В горле бухты Церковная измерялись также скорости течения. Регистрация уровня проводилась в бухте и на шельфе на расстоянии одной мили от горла. Спектр скорости течения в горле бухты свидетельствует о заметном присутствии в колебаниях скорости течения частоты, которая также является частотой максимума спектра колебаний уровня. Отмечена высокая когерентность, а следовательно, значимая связь между колебаниями уровня на шельфе и скоростью течения в горле. Близость частот максимума спектра колебаний скорости (0.05 цикл/мин) к частоте второй моды Курильского шельфа позволяет предположить резонансный механизм накачки низшей моды собственных колебаний бухты Церковная. Последняя является незамкнутой колебательной системой, и периодический поток воды через горло приводит к возбуждению низшей моды собственных колебаний водной массы бассейна [12]. Численные расчеты периода собственных колебаний низшей моды, проведенные в [14], дали значение около 19 мин, близкое к натурным данным.

В заключение остановимся на еще одном эксперименте, проведенном с помощью трех датчиков уровня. Две донные станции были установлены на глубине около 40 м на расстоянии 2 км от берега, а третья — на глубине 65 м в 3 км от берега. Расстояние между датчиками составляло около 13 км. В ходе 10-дневных наблюдений на общем фоне

длинноволновых колебаний уровня моря был зарегистрирован цуг прогрессивных волн в диапазоне волн цунами. Вероятно, длинный цуг волн был вызван сильными длинноволновыми колебаниями метеорологического происхождения, так как в этот период сильных землетрясений, которые могли бы вызвать цунами на сейсмостанции “Шикотан”, зарегистрировано не было. Такие волны обычно называют метеоцунами. Волновые колебания на каждой из трех станций имели характерный период около 50 мин, максимальная амплитуда колебаний составляла 20 см. Волнение во всех трех точках хорошо коррелировано, изменение амплитуды в них, вероятно, обусловлено особенностями рельефа трассы. На записях колебаний уровня хорошо прослеживается время запаздывания, указывающее на прогрессивный характер волнения. Оценка групповой скорости, найденная по временному запаздыванию волнового фронта и расстоянию между датчиками, составляет 11 м/с. Период зарегистрированных волн согласуется с одной из частот Южнокурильского шельфа, полученных в [15]: 0.5 и 1.1 цикл/ч. Параметры волнового цуга и характер его распространения позволяют отнести обнаруженные волны к типу краевых волн.

Натурные эксперименты, проведенные в Камчатском заливе и на шельфе о. Шикотан, показали, что анализ естественного длинноволнового шума, зарегистрированного в различных точках акватории, позволяет получить ценную информацию о характере распространения длинных волн диапазона цунами и определить резонансно-частотные характеристики акватории. Таким образом, продемонстрирована эффективность натурального эксперимента для получения характеристик шельфа, которые могут быть использованы при цунамирайонировании.

Список литературы

- [1] Шокин Ю. И., Чубаров Л. Б., Марчук Ан. Г., Симонов К. В. *Вычислительный эксперимент в проблеме цунами*. Наука, Сиб. отд-ние, Новосибирск, 1989.
- [2] Пелиновский Е. Н. *Нелинейная динамика волн цунами*. ИПФ АН СССР, Горький, 1982.
- [3] Показеев К. В., Тупоршин В. Н. Натурный эксперимент и его место в методике локального цунамирайонирования. *Метеорология и гидрология*, №8, 1991, 84–88.
- [4] AIDA I. Estimation of the offshore form of tsunami waves. *J. Oceanogr. Soc. Jap.*, **22**, No. 5, 1972, 220–227.
- [5] AIDA I., KOYAMA M., HUSHIMOTO M. Observations of water surface in the vicinity of mouth of Onagawa and Okachi Bays. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **60**, No. 2, 1985, 135–146.
- [6] Ефимов В. В., Куликов Е. А., Рабинович А. Б., Файн И. В. *Волны в пограничных областях океана*. Гидрометеиздат, Л., 1985.
- [7] AIDA I., HATORI I., KOYAMA M., NAGASHIMA M., KAJIURA K. Long-period waves in the vicinity of Onagawa Bay. *J. Oceanogr. Soc. Jap.*, **28**, No. 5, 1972, 207–219.
- [8] ТАКАНАСИ R., AIDA I. Studies on the spectrum of Tsunami. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **39**, No. 3, 1961, 523–560.

- [9] Файн И. В., Богданов Г. С., Митрофанов В. Н., Шельтинг Е. В. Распространение длинных волн в районе Усть-Камчатска. В *“Природные катастрофы и стихийные бедствия в Дальневосточном регионе”*. ДВО АН СССР, Владивосток, 1990, 190–205.
- [10] Литвин Е. Н., Показеев К. В., Тупоршин В. Н. Инфрагравитационные волны в устье р. Камчатки. *Океанология*, **32**, №2, 1992, 211–218.
- [11] Бендат Дж., Пирсол А. *Прикладной анализ случайных данных*. Мир, М., 1989.
- [12] Мурти Т. С. *Сейсмические морские волны цунами*. Гидрометеиздат, Л., 1981.
- [13] Джумагалиев В. А., Рабинович А. Б., Файн И. В. Теоретическая и экспериментальная оценка передаточных особенностей Малокурильской бухты о. Шикотан. *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*, **90**, №5, 1994, 611–617.
- [14] Рабинович Б. И., Левянт А. С. Численное решение задачи расчета сейш на основе *RT*-алгоритма конформного отображения. В *“Природные катастрофы и стихийные бедствия в Дальневосточном регионе”*. ДВО АН СССР, Владивосток, 1990, 328–342.
- [15] Жак В. М., Куликов Е. А. Анализ распространения длинных волн на шельфе северной части Курильской гряды. *Метеорология и гидрология*, №6, 1978, 51–55.

Поступила в редакцию 15 сентября 1995 г.