

Цунами и другие морские опасные явления в портах Сахалинской области по результатам инструментальных измерений

Г. В. Шевченко¹, Т. Н. Ивельская²
Южно-Сахалинск

Рассмотрены характеристики волновых процессов в различных портах Сахалинской области по результатам инструментальных измерений автономными донными станциями Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, а также телеметрическими регистраторами Службы предупреждения о цунами. Показано, что при опасных морских явлениях (цунами, штормовые нагоны, штормовое волнение) значительная опасность находящимся в портах судам и гидротехническим сооружениям связана с резонансными колебаниями – сейшами. Определены основные периоды резонансных колебаний и оценена их роль при цунами и при штормовых ситуациях. Результаты проведенных исследований могут быть полезны при планировании работ по разработке мер по безопасности мореплавания и реконструкции портов.

Ключевые слова: порт, бухта, гавань, цунами, штормовой нагон, волнение, высота волны, период волны, спектр

Tsunami and other marine hazards in the ports of Sakhalin Region on the base of instrumental measurements. *George V. Shevchenko, Institute of Marine Geology and Geophysics, Tatiana N. Ivetskaya, Tsunami Warning Center.*

The characteristics of the wave processes in the various ports of Sakhalin region were considered on the base of instrumental measurements carried out by autonomous bottom station of the Institute of Marine Geology and Geophysics, and telemetry recorders of Tsunami Warning Service. It is shown that the significant risks of marine hazards (tsunamis storm surges, storm waves) in ports to ships and port facilities is associated with the harbor resonant oscillations – seiches. The main periods of resonance oscillations and their role in the tsunami and storm situations were estimated. The results of these studies may be useful when planning work on the development of measures for maritime safety and the reconstruction of the port.

Key words: port, harbor, tsunami, storm surge, wind waves, wave height, wave period, spectra

Введение

Порты Сахалинской области подвержены воздействию морских опасных явлений – цунами, штормовых нагонов и штормового волнения, тягуна. Это относится и к самым крупным морским транспортным узлам – портам Корсаков и Холмск, еще в более сложном положении находятся мелкие порты, в особенности на Курильских островах, где особо грозную опасность

¹ Шевченко Георгий Владимирович, д. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией цунами, председатель секции «Природные катастрофы» научно-экспертного совета при правительстве Сахалинской области, действительный член Русского географического общества.

² Ивельская Татьяна Николаевна, кандидат физ.-мат. наук, начальник Центра цунами, действительный член Русского географического общества.



представляют волны цунами. Но и на побережье Сахалина достаточно сложных проблем. Так, при сильнейших нагонах на юге острова в ноябре 1990 и 1995 гг суда выбрасывались на мель, ударялись о пирсы, тонули, значительное число грузов смывалось в море или было испорчено морской водой (рис. 1). Значительный ущерб портам был нанесен цунами – Холмскому порту в сентябре 1971 (Монеронское) и Корсаковскому в мае 1960 (Чилийское). Оба порта страдают от явления тягуна – сильных, быстро меняющих направление течений в бухте. Эта проблема особенно важна для Холмска, так как надежную стыковку рельсов на берегу и на пароме нельзя обеспечить даже при тягуне умеренной интенсивности.

Действие опасных морских явлений в портах в значительной мере связано с возбуждением резонансных колебаний в бухтах и гаванях – сейш, которые для большинства портов не исследовались и не учитывались при проектировании и строительстве портов.

Наилучший способ исследования особенностей проявления морских опасных явлений в портах и гаванях – сочетание инструментальных измерений волновых процессов и численного моделирования. Инструментальные измерения позволяют определить основные периоды и интенсивность колебаний, характер волнового процесса при цунами, при нагоне, в зависимости от ветра и т. д., но только в точке измерения. Численное моделирование позволяет определить пространственную структуру колебаний во всей бухте, положение пучностей и узловых линий, определить наиболее (и наименее) опасные зоны в гавани. Знание этих особенностей позволяет понять, как лучше действовать в опасной ситуации.



Рис. 1. Последствия штормового нагона 7 декабря 2012 в порту г. Корсаков

В данной работе характер морских опасных явлений и вклад в них резонансных колебаний рассматривается детально на примере порта г. Холмск. Для ряда других портов Сахалинской области приведены краткие сведения о проявлении этих колебаний, преимущественно во время цунами – периоды этих волн близки резонансным периодам большинства заливов и бухт на Сахалине и Курильских островах.

Физические свойства резонансных колебаний

Рассмотрим основные понятия теории резонансных (собственных) колебаний на примере замкнутого бассейна простой прямоугольной формы с

размерами $M \times L$ и глубиной h . Резонансными являются периоды, отвечающие условию, что длина волны укладывается целое число раз вдоль продольной или поперечной оси бассейна и определяется по формуле Мерриана. Для продольных мод

$$T_n = \frac{2L}{n\sqrt{gh}},$$

где g – ускорение силы тяжести, $c = \sqrt{gh}$ – скорость распространения длинных волн в бассейне, $n=1, 2, 3$ – номер моды, то есть число поперечных узловых (нодальных) линий, которые при данной конфигурации бассейна имеют вид прямых линий, параллельных его короткой стороне. Для стоячих колебаний характерно уменьшение амплитуды и смена фазы на 180° при пересечении узловой линии, у береговых границ и посередине между узловыми интенсивность колебаний достигает максимальной величины (пучности). Схематичнее положение этих линий для второй моды собственных колебаний приведено на рис. 2. Отметим, что вторая мода имеет длину волны, в точности равную протяженности бассейна L (первая, соответственно, – его удвоенному размеру $2L$).

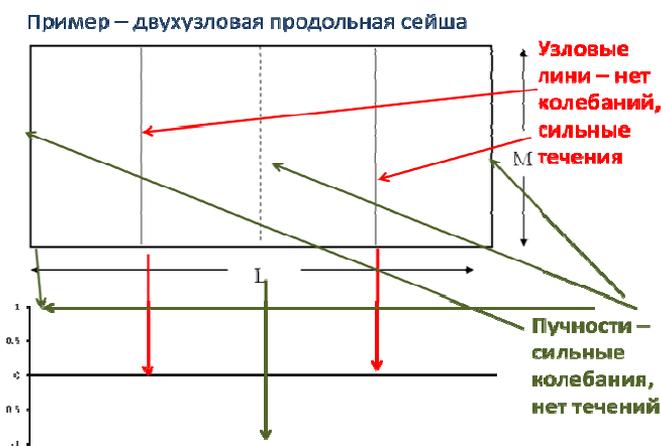


Рис. 2. Схематичное изображение структуры второй (двухузловой) продольной моды прямоугольного бассейна с постоянной глубиной.

Аналогичная структура колебаний наблюдается также и между длинными стенками бассейна – помимо продольной, существуют также и поперечные сейши, имеющие свои узловые линии и пучности. Эта же терминология, сложившаяся при исследовании собственных колебаний в замкнутых водоемах (озерах), по традиции применяется и к морским акваториям – заливам, бухтам и гаваням, принципиальное отличие которых – наличие открытой границы, через которую они соединяются с открытым морем.

Если в рассмотренном выше примере убрать одну из коротких стенок, то есть предположить, что имеется прямоугольный залив постоянной глубины, соединенный с открытым морем, то определить периоды собственных



колебаний уже достаточно сложно. В первую очередь это будет зависеть от граничного условия, которое будет задано на открытой границе. В первом приближении обычно на ней задается равенство нулю колебаний

$$\xi(x, y) = 0 \text{ при } x = L,$$

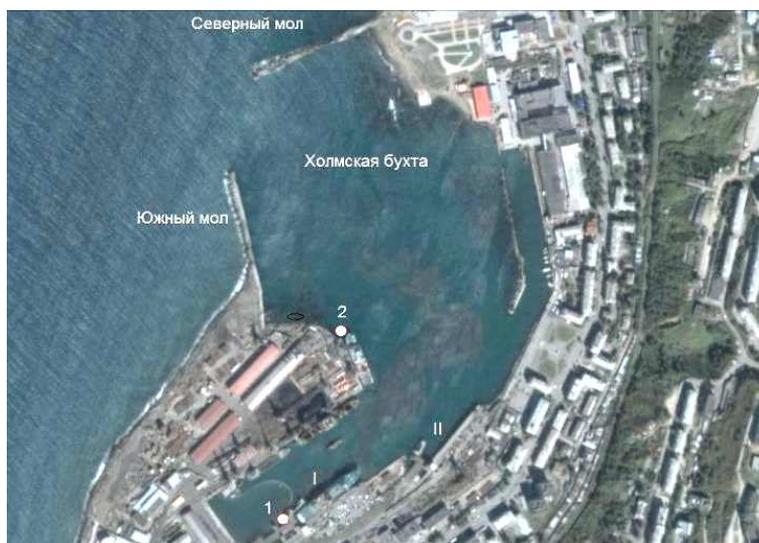
что соответствует положению узловых линий на открытой границе. В некоторых случаях это условие трактуется как пренебрежение излучением через открытую границу, что не совсем верно, так как узловым линиям отвечают максимальные значения горизонтальной скорости движения жидкости. Периоды продольных собственных колебаний в этом случае определяются по формуле [Рабинович, 1993]

$$T_n = \frac{4L}{(2n+1)\sqrt{gh}}.$$

Очевидно, что при открытой границе в наибольшей степени отличия периодов будут проявляться на низких модах, при этом наиболее важным фактом является появление нулевой моды собственных колебаний, не имеющей узловых линий внутри рассматриваемого замкнутого бассейна. Длина волны для данной моды соответствует учетверенной длине залива, а период в два раза больше, чем период первой моды в замкнутом бассейне. Колебания нулевой моды происходят синфазно в пределах всего залива, их интенсивность уменьшается по мере движения от удаленного конца залива к открытой границе. Период первой моды в полузамкнутом бассейне будет составлять 2/3 от такового в замкнутом и т. д. Подобные оценки можно получить, естественно, только для примеров с очень простой топографией. Если ширина входа будет уменьшаться, то период нулевой моды будет значительно возрастать, в то время как для первой моды, очевидно, существует предел такого роста. Отметим также, что наличие в заливе интенсивных колебаний нулевой моды – например, в Малокурильской бухте – означает наличие интенсивных периодических течений в ее горловине. Вообще роль нулевой моды особенно велика в заливах и бухтах с узкими входами (наиболее яркий пример - бухты Авачинская губа [Королев, Шевченко, 2003]), здесь она обычно определяет динамику длинноволновых процессов во всей внутренней акватории. Физически данные колебания являются результатом трансформации потока жидкости, поступающей через узкий канал под действием внешних факторов, в колебания уровня в самой акватории.

Естественно, что в реальных условиях для бухт сложной формы, с переменной глубиной, имеющиеся в них системы собственных колебаний невозможно охарактеризовать простыми соображениями и оценками периодов, изложенными выше. Изучение структуры сейш в природных водоемах осуществляется преимущественно методами численного моделирования. В то же время реальные резонансные периоды и характер проявления различных мод при морских опасных явлениях – цунами, штормовых ситуациях и т.д. – лучше всего изучать по результатам инструментальных измерений, осуществляемых путем постановки регистраторов колебаний уровня моря в различных точках изучаемой акватории.

Инструментальные измерения волновых процессов в порту г. Холмск



2

Рис. 3. Карта акватории порта г. Холмск. Кружками показано положение постоянного (1) и временного (2) регистраторов волнения и уровня. Отмечены причалы паромной переправы первой (I) и второй очереди (II).

Инструментальные измерения проводились в Холмской бухте в 1999 году (совместный проект СКБ САМИ и Центра цунами СахУГМС, поддержанный грантом администрации Сахалинской области) и 2006–2008 гг. Институтом морской геологии и геофизики ДВО РАН (грант РФФИ – Дальний Восток, частично финансировавшийся администрацией области) [Ивельская и др., 2001]. В первом эксперименте использовалась специально сконструированная приставка стандартному самописцу уровня моря, во втором – традиционно применяемые ИМГиГ для изучения цунами донные станции, измеряющие гидростатическое давление (отражают волнение и вариации уровня моря).

Регистрация проводилась практически непрерывно одним прибором, установленным в кутовой части бассейна (датчик 1), а зимой 2008 г была осуществлена постановка автономной станции 2, что позволило проанализировать свойства собственных колебаний более тщательно. В ряде случаев эксперимент сопровождался измерениями приземного атмосферного давления и скорости ветра цифровой метеостанцией WS 2300 с целью изучения метеорологических условий формирования тягуна. Результаты исследований отражены в ряде работ [Ковалев и др., 2009; Шевченко и др., 2012].

Холмская бухта представляет собой акваторию грушевидной формы с относительно широкой основной частью и узкой удаленной (кутовой), в которой, собственно, и находится основной причал паромной переправы I, у которого на снимке виден паром (рис. 3), а также другие портовые сооруже-



ния. Вход в бухту прикрыт с юга и севера волнозащитными молами, которые оставляют свободным сравнительно узкий проход – данное обстоятельство является важным с точки зрения условий формирования в ней резонансных колебаний. В особенности это относится к нулевой моде собственных колебаний (моде Гельмгольца), имеющей узловую линию в горловине.

2 августа 2007 у юго-западного побережья о. Сахалин произошло сильнейшее в данном районе землетрясение с магнитудой $M_w=6,2$, вызвавшее значительные разрушения в г. Невельске, расположенном в 40 км к югу от изучаемого района. Это землетрясение было зарегистрировано прибором 1 в Холмской бухте, оно вызвало волны цунами, которые вблизи источника имели высоты до 2–3 м.

Вступление волны характеризовалось положительным импульсом высотой около 20 см. Затем, после сравнительно слабого колебания, было отмечено продолжительное понижение уровня более чем на 40 см, после чего наблюдались нерегулярные вариации. Спустя примерно полтора часа после прихода первой волны был зафиксирован четкий, хорошо выраженный цуг колебаний с периодом около 8 мин, длительность которого составила более часа.



Рис. 4. Установка донного регистратора давления (волнения и уровня) в порту г. Углегорск

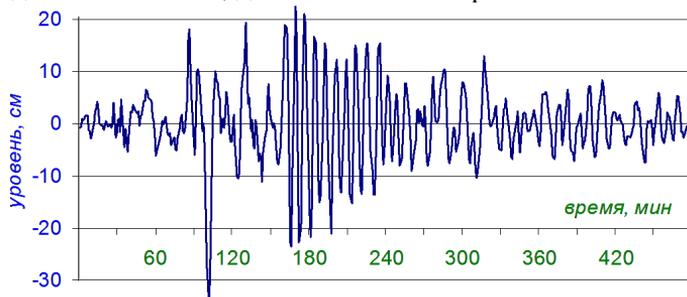


Рис. 5. 8-часовая запись колебаний уровня моря на акватории Холмского морского порта, содержащая Невельское цунами 2 августа 2007 г. Хорошо видны выраженные резонансные колебания с периодом 8 мин (нулевая мода с узловой линией на входе)

Для определения диапазона периодов, в котором наблюдалось обусловленное цунами увеличение интенсивности колебаний, по отрезкам суточной продолжительности рассчитывались спектральные характеристики записей. Наиболее важным в данном случае является тот факт, что пик с периодом 8 мин является основным в спектре цунами, что отвечает наблюдаемой картине с хорошо выраженными колебаниями, отвечающими нуле-

вой моде бассейна. Не менее важно и то, что на периоде 3 мин, на котором в спектре фоновых вариаций выделяется хорошо выраженный максимум, произошло уменьшение уровня энергии. Подобное подавление высокочастотных волновых процессов нередко отмечается при цунами. Одноузловая продольная сейша бухты слабо возбуждается при цунами.



Рис. 6. Резонансные колебания в Холмской бухте на фоне штормового нагона. Запись неперiodических колебаний (вычтен прилив) за 22–24 ноября 2005 года

22–23 ноября 2006 г был зарегистрирован сильный нагон с высотой волны около 75 см (более сильные были только 1990 и 1995 гг). На фоне нагонной волны хорошо видны резкие колебания (рис. 6), связанные с резонансными колебаниями с периодами 8 и 3 мин. Амплитуда одноузловой продольной сейши (период 3 мин) достигала 20 см, при этом в бухте (особенно в центральной части) должны возникать течения до 30–40 см/с, быстро (каждые полторы минуты) меняющие направление на противоположное. Это явление получило название «тягун» (в некоторых пунктах, например в Южно-Курильске, используют термин «зыбун») – с ним связаны обрывы швартовых, удары судов о причалы, потеря грузов и т. п.

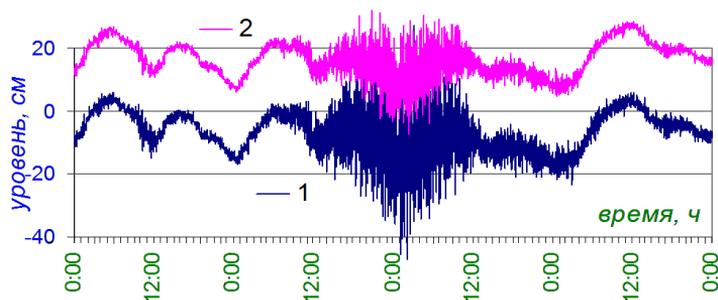


Рис. 7. Графики колебаний уровня моря на датчиках 1 и 2 за период 12–15 февраля 2008. Сильный шторм на акватории бухты, резкое усиление колебаний с периодом 6 и особенно 3 мин, прежде всего в удаленной части бухты (у причала паромной переправы)

На рис. 7 представлены четырехсуточные отрезки записи колебаний уровня моря, включавшие сильный шторм 13–14 февраля 2008 г. Из рисунка виден совершенно необычный характер колебаний в бухте, причем более интенсивные наблюдались в удаленной части бухты, в районе основного причала паромной переправы. Здесь максимальный размах колебаний дос-



тигал полуметра, в то время как в районе причала № 9 – примерно в два раза меньше. При этом значимого подъема среднего уровня в бухте (штормового нагона) не наблюдалось, отмечено резкое усиление сравнительно короткопериодных вариаций, которые обусловлены интенсификацией сейш в бухте. Значимая высота ветровых волн достигала на обеих станциях 2,4 м, что очень много для такой закрытой акватории, как Холмская бухта.

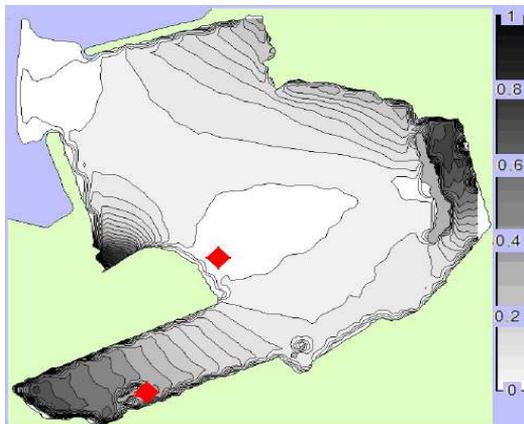


Рис. 8. Пространственное распределение средней амплитуды колебаний уровня моря на периоде 3 мин по результатам численного моделирования

На рис. 8 представлено распределение средней амплитуды колебаний на периоде 3 мин по результатам численного моделирования (рис. 9), которое показывает, что действительно датчик 2 находился в районе узловой линии.

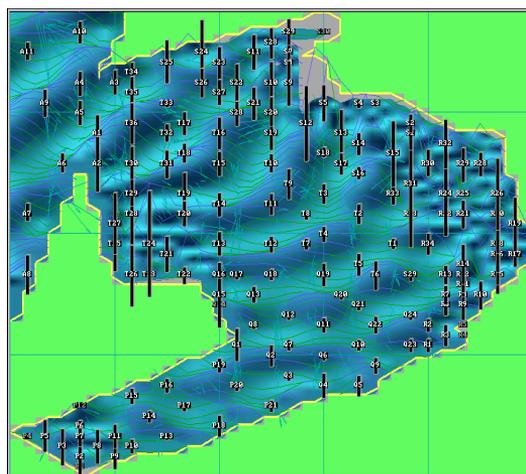


Рис. 9. Моделирование волновых процессов на акватории порта. Столбиками отмечены максимальные высоты колебаний в различных точках

Именно в районе узловой линии в центральной части бухты могут наблюдаться максимальные скорости течения. Грубо оценить максимальные



значения скорости течения можно по формуле для бухты с постоянной глубиной [Rabinovich, 2009]: $V = A (g/h)^{1/2}$, где A – амплитуда колебаний уровня, g – ускорение свободного падения, h – средняя глубина бухты, которая вдоль фарватера составляет 7 м.

Во время шторма 14 февраля значения амплитуды достигали 30 см при скорости течения 35 см/с, изменявшиеся по направлению каждые полторы минуты. При рядовых усилениях ветра и волнения на море амплитуда этой сейши составляет около 10 см, соответственно скорости течения достигают 10–12 см/с. Этого достаточно, чтобы затруднить погрузо-разгрузочные работы в порту, особенно на паромном причале второй очереди, который расположен вблизи узловой линии. На причале первой очереди явление тягуна выражено слабее, здесь влияние резонансных колебаний проявляется главным образом в колебаниях уровня моря, при нарастании амплитуды как первой, так и второй моды.

Выводы по результатам измерений в Холмской бухте

В результате проведенных исследований изучены характеристики резонансных колебаний в Холмской бухте, которые оказывают негативное влияние на работу паромной переправы Ванино – Холмск, являющейся важнейшим элементом в обеспечении грузооборота между островом и материком. Это влияние усилилось после проведения работ по реконструкции порта (при вводе второй очереди паромной переправы), из-за проведения работ по дноуглублению и т. д. без учета их влияния на резонансные колебания в бухте.

Показано, что при таком опаснейшем стихийном явлении, как цунами, в портовой бухте резко усиливается нулевая мода резонансных колебаний с периодом 8 мин. Эта мода имеет узловую линию в горловине бухты (именно здесь можно ожидать сильных течений, с ней связана сложность входа судов в бухту), ее амплитуда возрастает в удаленной части бухты.

При штормовых ситуациях, помимо нулевой моды, резко усиливается одноузловая продольная сейша бухты, имеющая узловую линию в центральной и пучность в кутовой части бухты. В центральной части бухты могут возникать течения со скоростями 30–40 см/с, меняющих свое направление на противоположное каждые полторы минуты. При рядовых усилениях ветра и волнения эти течения достигают 10–12 см/с, что может затруднить погрузо-разгрузочные работы на паромном причале второй очереди и на других причалах в центральной части бухты.

Основной паромный причал первой очереди находится в районе, где тягун проявляется незначительно, зато здесь отмечены максимальные амплитуды как нулевой, так и первой моды резонансных колебаний. Именно здесь возможны наиболее интенсивные вариации уровня моря, размах которых 14 февраля достигал полуметра.

Проведенный анализ показал сложность ситуации и необходимость тщательного изучения резонансных колебаний в гаванях для обеспечения безопасности погрузо-разгрузочных работ, в особенности таких сложных, как разгрузка железнодорожных составов паромной переправы.



Резонансные колебания в портовом ковше г. Углегорск

Рассмотрим подробнее особенности формирования резонансных колебаний в порту г. Углегорск, ковш которого имеет четкую прямоугольную форму, и поэтому для него легко оценить периоды собственных мод. Он достаточно хорошо защищен от проникновения высокочастотных ветровых волн, которые могут проникать в гавань только при ветрах южного и юго-западного румбов. Положение автономного регистратора волнения и уровня, установленного ИМГиГ ДВО РАН в мае 2008 г., показано на рис. 10.



Рис. 10. Порт Углегорск. Расположение регистратора отмечено красной точкой

Для изучения особенностей характеристик волнения строилась диаграмма текущего спектра – спектральные характеристики рассчитывались по последовательным отрезкам длительностью 15 мин и затем группировались в матрицу, в которой по вертикали отложены частоты, а по горизонтали время.

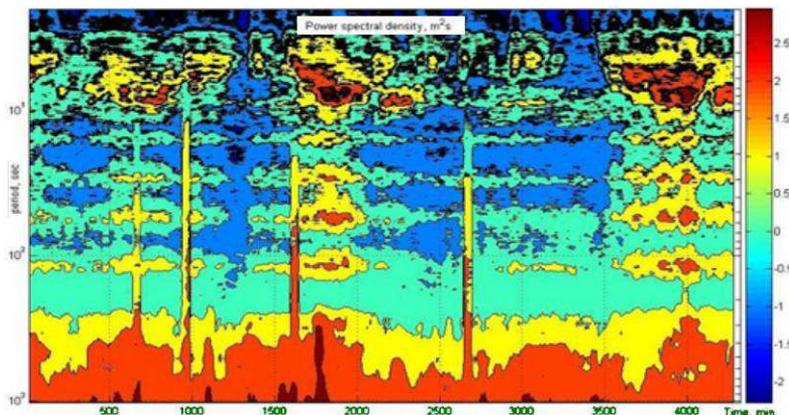


Рис. 11. Диаграмма текущего спектра для диапазона периодов от 2 до 1024 секунд по последовательным спектрам, рассчитанным по 15-минутным отрезкам записи в порту Углегорск

Наиболее характерной особенностью текущего спектра является наличие четырех горизонтальных линий с более высокими значениями спектральной амплитуды, которые отвечают резонансным модам бассейна. Вы-

деленные периоды составляют около 105, 50, 30 и 15 сек. Средняя скорость длинных волн на акватории порта составляет около 5 м/с, таким образом, эти периоды неплохо согласуются с оценками периодов одно- и двухузловых продольной и поперечной сейш гавани. Из приведенного рисунка также следует, что усиление собственных колебаний в ковше связано с возрастанием интенсивности ветрового волнения. Результаты проведенного анализа указывают на высокую вероятность возникновения тягуна в порту Углегорск при усилении ветров и волнения южного и юго-западного румбов.

Измерения волновых процессов в порту Корсаков

Порт города Корсаков является вторым по значению портом Сахалинской области после Холмска, и от его устойчивой работы зависит хозяйственная деятельность многих предприятий. В то же время известно, что он подвержен воздействию морских опасных явлений – его гидротехнические сооружения и складские территории неоднократно затапливались морской водой при цунами (в 1952 и 1960) и более часто – при сильных нагонах [Шевченко и др., 1994; Шевченко, 1997; Като и др., 2001]. Наблюдается также в порту и явление тягуна, исследовавшееся в 1960-1970-х годах начальником Корсаковского гидрометеобюро Г. Н. Бобровым, а также группой специалистов Института морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ) в 1999 году [Ковалев и др., 2001].

2

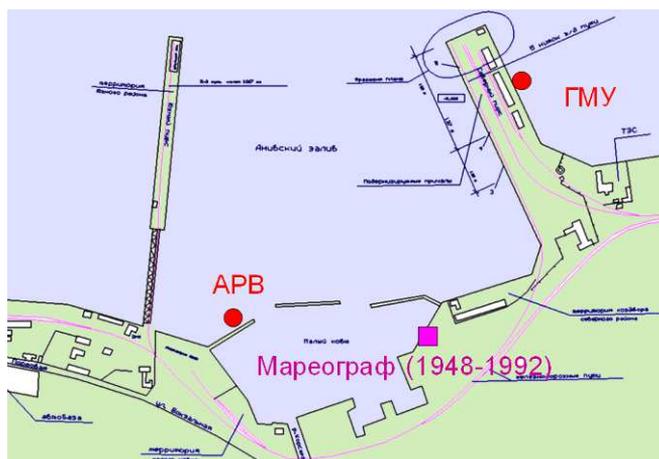


Рис. 12. Схема причальных и иных гидротехнических сооружений порта г. Корсаков. Показаны места установки кабельного (ГМУ) и автономного (АРВ) измерителей волнения и уровня

Изучение характеристик опасных морских явлений на акватории порта затруднено из-за того, что установленный в 1948 году береговой мареограф был закрыт в конце 1992 года из-за заиливания подводящей трубы. Таким образом, инструментальные измерения колебаний уровня моря в порту Корсаков в течение последних лет не проводились.



Ситуация изменилась в 2008 году, когда сахалинским Центром цунами Росгидромета в порту Корсаков был установлен телеметрический регистратор цунами разработки НПО «Тайфун» (г. Обнинск). Измеритель придонного гидростатического давления не может, вообще говоря, полностью заменить береговой мареограф, так как не регистрирует правильно вариации уровня моря, связанные с изменениями плотности морской воды. Но для определения характеристик опасных морских явлений, и в частности резонансных колебаний в бухтах и гаванях, он является вполне подходящим инструментом.

Прибор располагался в том же самом месте, что и датчик ИМГиГ в 1999 г [Ковалев и др., 2001], а именно с северной стороны северного пирса порта (рис. 12). В данном случае эти измерения недостаточно освещают ситуацию собственно на акватории порта и лишь в малой степени годятся для исследования явления тягуна.

В этой связи ИМГиГ ДВО РАН в июне 2008 г установил автономный регистратор волнения и уровня на внутренней акватории. Автономный прибор был установлен в юго-восточной части порта, вблизи стенки, отделяющей внутренний ковш от основного порта (рис. 12). Измерения производились с дискретностью 1 сек, что позволяло анализировать характеристики не только длинноволновых процессов, но и ветрового волнения на акватории порта. Прибор был поднят 12 октября, таким образом, был получен представительный материал наблюдений длительностью около 4 месяцев и захватывающий начало периода осенних штормов.

Из рассчитанной диаграммы текущего спектра для сравнительно спокойного (июль) и более активного периодов (сентябрь) видно, что волнение на акватории порта Корсаков определялось, главным образом, волнами зыби с периодами 7–8 сек. Более высокочастотные волны отмечены на небольших интервалах времени только в октябре.

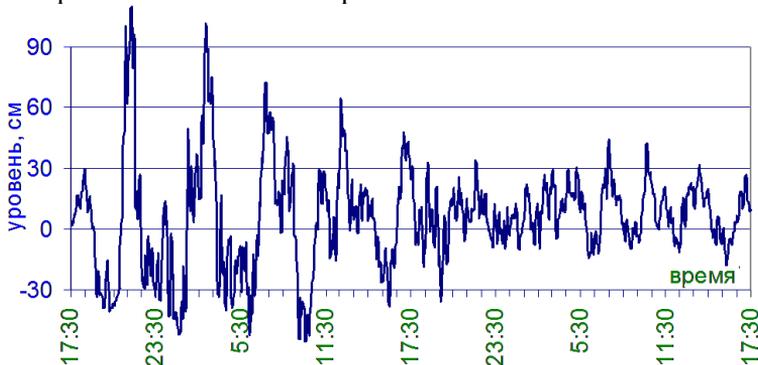


Рис. 13. Двухсуточный отрезок записи берегового мареографа 23–25 мая 1960 с вычтенным приливом, содержащий Чилийское цунами. Дискретность 2 мин

На спектрах выделяются устойчивые, хотя и не очень мощные максимумы (полосы на диаграмме) на периодах 12–15 сек, отвечающие, вероятно, длиннопериодной океанской зыби. В диапазоне инфрагравитационных волн

можно отметить достаточно высокий уровень энергии, однако четко выраженных полос, за исключением периода около полутора минут, не наблюдалось. Возможно, именно сейша с этим периодом ответственна за формирование явления тягуна в порту Корсаков. Сравнительно слабая ее выраженность связана, видимо, с отмеченным выше неудачным расположением прибора вдали от наиболее вероятного положения пучностей резонансных мод.

Собственные колебания играют важную роль в формировании волнового режима порта г. Корсаков. Наиболее ярко они обычно проявляются при цунами, что особенно наглядно проявилось при самом сильном событии в данном районе – несмотря на то, что источник находился на огромном расстоянии, у берегов Чили (май 1960 г).

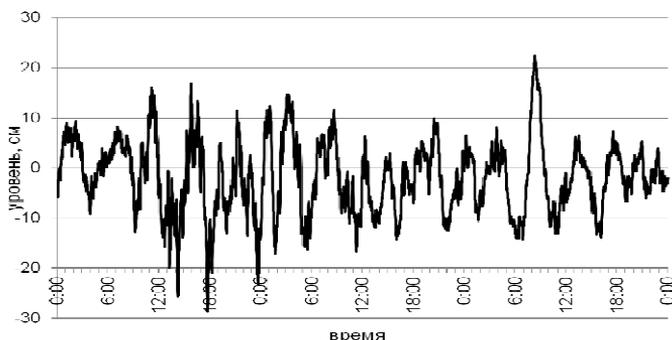


Рис. 14. Двухсуточный отрезок записи Чилийского цунами 28 февраля – 1 марта 2010 г (вычтен предвычисленный прилив) на датчике ГМУ в порту г. Корсаков

Фрагмент оцифрованной записи берегового мареографа (дискретность отсчетов 2 минуты) длительностью двое суток представлен на рис. 13. Размах колебаний достигал полутора метров, причем низкие уровни были срезаны из-за осушения колодца мареографа. В феврале 2010 г при сильном землетрясении в том же районе были зафиксированы идентичные, хотя и несколько более слабые колебания (рис. 14).

В спектре записи колебаний уровня моря при цунами четко выделяются хорошо выраженные пики с периодами 12, 19 и 33 мин, а также мощный пик с периодом около 5 часов. Низкочастотный пик проявляется на всем побережье залива Анива, за исключением мыса Крильон, где, в частности, при Чилийском цунами колебания с периодом около 5 часов не проявились. Это указывает на то, что пучность резонансных колебаний распределена вдоль северного побережья залива, а узловая линия проходит по его открытой границе (линия мыс Анива – мыс Анастасии). Для возбуждения этих колебаний нужен весьма низкочастотный начальный сигнал, поэтому они формируются чаще всего при нагонах, а также при цунами от очень мощных землетрясений с большими линейными размерами очага.

Отмеченные выше резонансные моды залива Анива с периодами 19 и 33 мин рассматривались при моделировании распространения волн цунами в данном районе [Храмушин, Шевченко, 1994] и отвечают поперечным сейшам залива. Отметим только, что узловые линии этих мод проходят



сравнительно недалеко от Корсакова, и поэтому интенсивные колебания на этих периодах при обычных условиях выражены слабо. Их резкое усиление происходит при сильных возмущениях волнового поля, прежде всего при цунами. В целом резонансные колебания залива Анива оказывают значительное влияние на формирование морских опасных явлений в порту города Корсаков.

Измерения волновых процессов в порту г. Поронайск

Порт Поронайск находится в устье реки Поронай (рис. 15) и в этом смысле неплохо защищен от воздействия морских опасных явлений. С точки зрения возможного влияния резонансных колебаний на его акваторию, их можно разделить на две группы. Одна связана с внутренней акваторией, и здесь, вероятно, главную роль могут играть сравнительно короткопериодные поперечные сейши. Вторая обусловлена более длиннопериодными резонансными колебаниями, формирующимися в заливе Терпения.

Автономная станция ИМГиГ ДВО РАН была установлена в порту Поронайска в октябре 2008 и проработала до февраля 2009. Осенью того же года здесь был установлен телеметрический регистратор СПЦ, который зафиксировал два цунами – Чилийское 28.02.2010 и Тохоку 11.03.2011.



Рис. 15. Схема порта г. Поронайск и подходов к нему. Красным кружком отмечено место постановки автономного регистратора ИМГиГ осенью 2008 года.

Были рассчитаны спектральные характеристики по отрезкам записи во время шторма 15–16 января 2009 г и при спокойной погоде. Выявлено, что в низкочастотной области спектра в обоих случаях присутствует пик с периодом около 1 часа, отвечающими, вероятно, резонансной моде залива Терпения. Во время шторма заметно возрастает энергия колебаний на высоких частотах, особенно выделяются пики с периодами около 5 и 7 мин, отвечающие резонансным условиям внутренней акватории. Именно эти колебания могут представлять наибольшую опасность для находящихся в порту судов при ухудшении погодных условий.



Рис. 16. Двухсуточный отрезок записи Чилийского цунами 28 февраля – 1 марта 2010 г (вычтен предвычисленный прилив) на датчике СПЦ в порту Поронайск

2

На рис. 16–17 представлены двухсуточные отрезки записи, полученные на телеметрическом регистраторе СПЦ при Чилийском (28.02 – 01.03.2010) и Тохоку (11–12.03.2011) цунами. В обоих случаях цунами были умеренной интенсивности, причем Чилийское было существенно более низкочастотным, в то время как при Тохоку цунами наблюдались отмеченные выше устойчивые колебания с периодом около 1 часа.

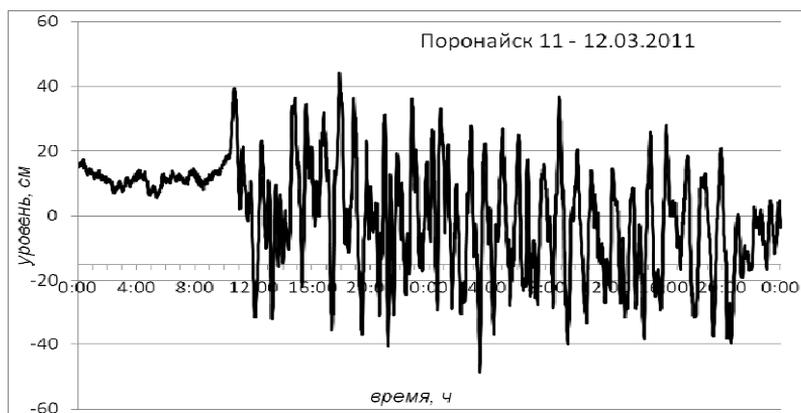


Рис. 17. Двухсуточный отрезок записи Тохоку цунами 11–12 марта 2011 г (вычтен предвычисленный прилив) на датчике СПЦ в порту Поронайск

В спектре колебаний при Чилийском цунами выделяется целая группа пиков, отвечающих, по-видимому, резонансным особенностям внешней акватории. Но все эти пики выражены сравнительно слабо, что указывает на сравнительно малую роль рассматриваемых эффектов при формировании волнового поля в случае цунами в порту г. Поронайск. Очевидно, что резонансные особенности внутренней акватории, не выделяющиеся при цунами, но резко усиливающиеся при штормовых ситуациях, являются важными при определении условий безопасности мореплавания в данном районе.



Морские опасные явления в порту Курильск

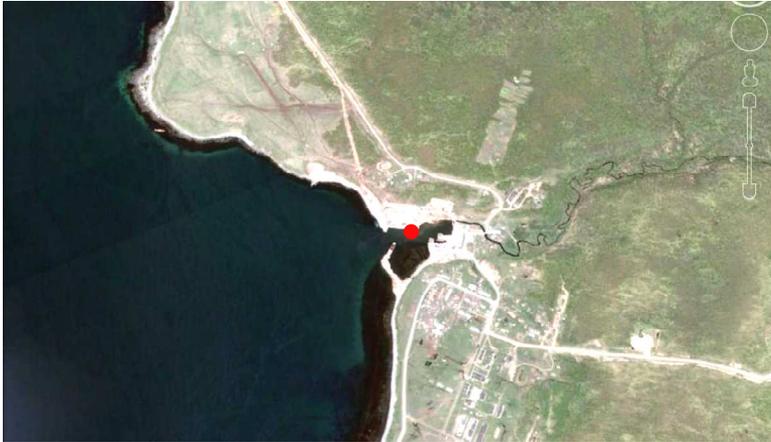


Рис. 18. Схема расположения порта Китовый г. Курильск. Красным кружком отмечено место постановки автономного регистратора волнения и уровня ИМГиГ ДВО РАН, установленного осенью 2008 г

Измерения в порту Китовый (рис. 18) г. Курильск производились в 2008–2009 г автономным регистратором ИМГиГ ДВО РАН, во второй половине 2010 г здесь был установлен телеметрический регистратор Службы предупреждения цунами. Одним из самых интересных с точки зрения рассматриваемого вопроса была регистрация сравнительно слабого Симуширского цунами 15.01.2009, совпавшего с моментом очень сильного шторма, вызванного выходом в южную часть Охотского моря глубокого циклона (давление в центре 987 миллибар) [Shevchenko et al, 2011].

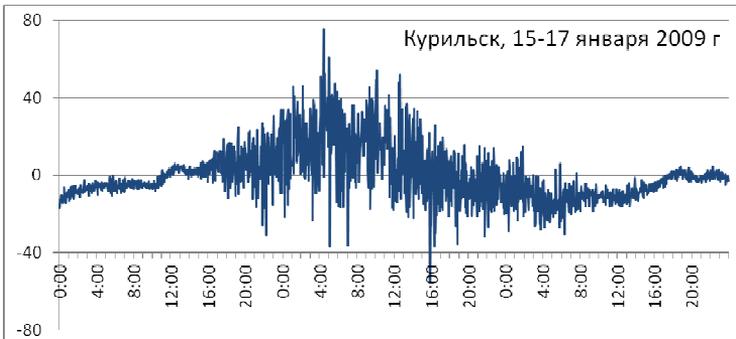


Рис. 19. Запись колебаний уровня моря (усредненных с периодом 3 мин) в порту Курильска за 15-17 января 2009 г, содержащая запись Симуширского цунами 15.01.2009 г. на фоне сильного шторма.

Ни характер записи (рис. 19), ни его очень большая продолжительность не являются типичными для цунами, вызванного землетрясением умеренной силы ($M=7,4$). Кроме того, заметное возрастание амплитуды

длинноволновых колебаний отмечено приблизительно в 15 час 40 мин, то есть примерно за два часа до сейсмического события. Причем на данной станции высоты волн были почти на порядок больше, чем на станции Ван-дер-Линда [Shevchenko et al, 2011], расположенной ближе к источнику, что весьма необычно, и трудно дать разумное объяснение наблюдаемой волновой картине. Очевидно, существовала, помимо цунами, и другая причина, которая вызвала резкое повышение интенсивности колебаний, причем она проявлялась скорее всего с охотоморской стороны. На спектрах, рассчитанных по приведенным на графиках двухсуточным отрезкам, обращает внимание резкое возрастание энергии в высокочастотном диапазоне по сравнению со спектрами, отвечающими обычным погодным условиям.

В спектре естественного длинноволнового фона на станции Курильск выделяются четкие, хорошо выраженные пики с периодами около 20, 11 и 7 минут, что говорит о наличии устойчивых резонансных колебаний, связанных с топографией залива Китовый. В низкочастотной части спектра есть два более слабых пика с периодами около 30 и 60 мин. Природа этих максимумов требует дополнительного рассмотрения.

2

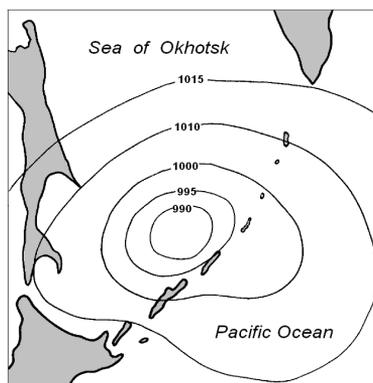


Рис. 20. Кольцевая карта погоды на 6:00 UTC 16 января 2009 г

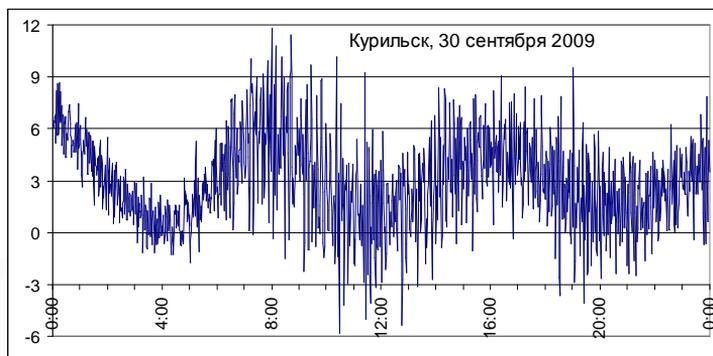


Рис. 21. Запись колебаний уровня моря в порту Курильска за 30 сентября – 1 октября 2009 г, содержащая Самоа цунами



При усилении колебаний 15–17 января происходит гораздо более значительное по сравнению со станцией м.Ван-дер-Линда возрастание энергии колебаний, которое составило для периодов 2–6 мин и 25–45 мин два порядка, а для часового пика – 2,5 порядка. Для главного максимума с периодом 20 мин увеличение энергии колебаний было наименьшим, в целом основные пики на данном интервале времени выделялись сравнительно слабо, что указывает на значительную стохастизацию волнового поля, обычно происходящую при сильном шторме.

Поскольку измерения производились с дискретностью 1 секунда, это предоставляло возможность рассмотреть вопрос о влиянии штормового волнения на регистрацию цунами и оценки его характеристик.

Из-за высокой частоты измерений, рассмотреть что-либо на графиках самих временных рядов весьма сложно, поэтому были рассчитаны спектры волнения по последовательным 12-часовым отрезкам. Было выявлено, что в первой половине суток 15 января выделялся мощный пик с периодом 9 сек, отвечающий волнам зыби. Во второй половине дня этот пик несколько увеличился, однако 16 числа произошло очень резкое увеличение энергии ветрового волнения, составившее для диапазона зыби полтора порядка и более. Причем период главного максимума сместился в сторону более низких частот, его период составил около 14 секунд. При этом резко повысился уровень энергии в примыкающем к основному пику слева диапазоне инфрагравитационных длинных волн. Выраженных пиков в этом интервале не выявлено, это говорит о том, что эффекта усиления определенных резонансных мод в порту при шторме не происходило.

Вторым примером была регистрация удаленного Самоа цунами 30.09.2009 г, достаточно слабого, но имевшего необычный для удаленных землетрясений высокочастотный характер колебаний уровня моря.

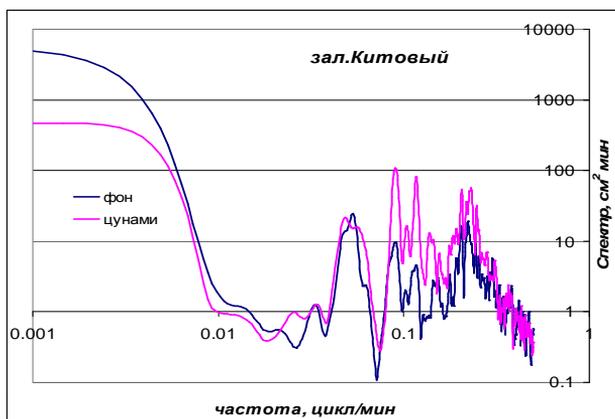


Рис. 22. Запись колебаний уровня моря в порту Курильска за 11–12 марта 2011 г, содержащая Тохоку цунами.

В зал. Китовый резонансные пики в спектре фона, как и в случае Симуирского землетрясения, были выражены очень хорошо, они имеют пе-

риоды около 5, 7, 8,5, 11 и 20 мин. На самом низкочастотном из них цунами практически не вызвало повышения уровня энергии, наиболее значимо оно проявилось на периодах 7–11 мин, в особенности выделялись пики с периодами 11 и 8,5 мин. На периоде около 5 мин также отмечено возрастание энергии колебаний, но более слабое, чем в отмеченном диапазоне.

При Тохоку цунами в записи вариаций уровня моря в заливе Китовый абсолютно доминировали резонансные колебания с периодом 20 мин. Такой устойчивый характер колебаний типичен для бухт с очень узким входом типа Малокурильской, но в данном случае залив достаточно открытый. Поэтому такой характер волнового процесса нехарактерен для порта г. Курильск, и на этот момент необходимо обратить особое внимание.

Измерения волновых процессов в порту г. Северо-Курильск

2



Рис. 23. Схема расположения порта г. Северо-Курильск. Красным кружком отмечен телеметрический регистратор Службы предупреждения цунами

Инструментальные измерения в порту Северо-Курильска начались с установки специальной платформы «Хандар» в 1999 году [Дущенко и др., 2003] и, с некоторыми перерывами, проводятся по настоящее время. В 2010 году прибор был заменен на стандартную аппаратуру, широко используемую в настоящее время в сети телеметрических регистраторов Службы предупреждения цунами на тихоокеанском побережье России.

Ситуация с определением момента вступления Самоа цунами в Северо-Курильске достаточно сложна. Здесь, начиная с 4:40 UTC, зарегистрирован своеобразный цуг волн с периодами около 12 мин и амплитудами 5–6 см, затем характер колебаний заметно изменился – амплитуда возросла до 15–20 см, а период, наоборот, уменьшился. Максимальная высота волны составила 25 см.

В данном пункте Самоа цунами проявилось в диапазоне периодов от 3,5 до 20 мин, но наиболее значимым оно было на периодах около 5 мин (более чем на 2 порядка, эти колебания были самыми мощными), 8 и 16 мин. Периоды 8 и 16 мин и ранее отмечались в спектрах цунами на данной станции, в то время как пик с периодом 5 мин ранее не обнаруживался [Дущенко



и др., 2003]. Наиболее вероятно, его появление связано с работами по реконструкции порта, в ходе которых была изменена конфигурация защитных сооружений.

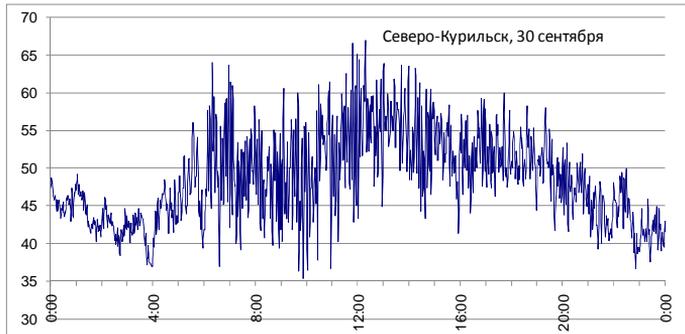


Рис. 24. Запись колебаний уровня моря в порту Северо-Курильска за 30 сентября – 1 октября 2009 г, содержащая Самоа цунами

Эти же резонансные колебания проявились значимо и при более низкочастотном Чилийском цунами, возрастание энергии колебаний на периоде 5 мин превысило 3 порядка. Этот пример подчеркивает важность учета резонансных колебаний при проведении любых работ, предусматривающих изменения конфигурации портов. Их недоучет может привести, вместо ожидаемого повышения их безопасности, к усилению воздействия морских опасных явлений на всей акватории или ее отдельных участках.

Измерения волновых процессов в порту Южно-Курильск



Рис. 25. Схема порта Южно-Курильск. Показано положение автоматизированного поста Службы предупреждения и автономной донной станции ИМГиГ

В Южно-Курильске были получены две записи Тохоку цунами – телеметрическим регистратором Службы предупреждения цунами и автономной донной станцией ИМГиГ ДВО РАН (положение станций показано на рис. 25). Датчик СПЦ был установлен в подводящей трубе колодца марео-

графа, который в настоящее время уже не работает. Подводящая труба мареографа в некоторой степени защищает датчик от влияния ветрового волнения, но не может быть причиной больших расхождений, которые хорошо видны на рис. 26, на нем представлены графики синхронных отрезков записи на указанных приборах. Отмечена также небольшая разница в моментах достижения экстремальных значений уровня – в большинстве случаев 2 мин, что, вероятно, обусловлено временем прохождения расстояния между датчиками.

Первый максимум на телеметрическом регистраторе СПЦ (92 см) отмечен в 7.49, на автономной станции ИМГиГ его высота заметно больше (146 см) и зафиксирован он в 7.51. Максимальная волна наблюдалась на 3 часа позже, и здесь различия были еще более значимыми. Наибольшее отрицательное отклонение составило -192 см в 10.43 (на телеметрическом регистраторе -102 см в 10.40), положительное достигло 199 см в 11.01 (98 см в 10.59). Такое различие может быть обусловлено тем, что новый пирс прикрывает телеметрический регистратор СПЦ от прямого подхода волн цунами, что приводит к занижению высот волн (периоды не искажаются). При этом для первой волны, имевшей меньшую амплитуду и существенно больший период, коэффициент подавления составил около 1,6.

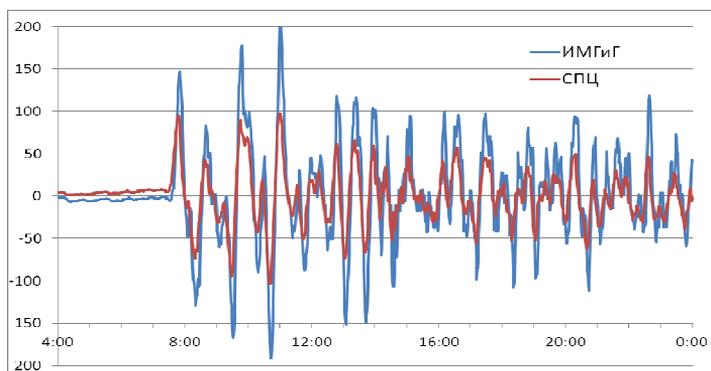


Рис. 26. 20-часовые записи колебаний уровня моря с Тохоку цунами 11.03.2011 (вычтен прилив) в Южно-Курильске на станциях ИМГиГ и Службы цунами

В спектрах колебаний уровня при цунами в бухте Южно-Курильская выделяется мощный пик на периоде около 70–75 мин, возрастание энергии при цунами в данном диапазоне составило примерно 3 порядка. Причем в спектре естественного фона максимум на этих периодах отсутствует. Возрастание на близких периодах было отмечено при Чилийском цунами (май 1960) [Ивельская, Шевченко, 2006]. В работе было показано, что этот пик отвечает низкочастотной моде шельфового резонанса, которая проявляется весьма редко из-за того, что для генерации цунами с такими периодами нужны большие размеры очага, которые бывают только при сильных землетрясениях. В спектрах атмосферных процессов (вариаций приземного давления и скорости ветра) на таких периодах энергия незначительна. Это объясняет отсутствие пика на этих периодах в спектрах естественного фона.



Выделяются также сравнительно слабые максимумы на периодах около 35 и 23, а также более выраженные на периодах 10 и особенно 7 мин. На указанных периодах в спектрах фона отсутствуют даже слабые максимумы, что не позволяет однозначно связать их с резонансными свойствами бухты Южно-Курильская. Интересно отметить, что на высокочастотных пиках различие в энергии между датчиками ИМГиГ и СПЦ значимее, чем на низкочастотных.

В целом можно сделать вывод, что резонансные свойства района, прилегающего к Южно-Курильску, не оказывают существенного влияния на формирование волнового поля при цунами. Более важным представляется возбуждение резонансных колебаний непосредственно в порту и имеющих период около 80 сек. Эти колебания возникают при развитой зыби и являются причиной явления тягуна (местное название явления – «зыбун»).

Заключение

В результате анализа материалов инструментальных измерений изучены особенности формирования морских опасных явлений (главным образом при цунами, а также в штормовых ситуациях) в портах Сахалинской области Холмск, Углегорск, Корсаков, Поронайск, Курильск, Северо-Курильск и Южно-Курильск. Порт в бухте Малокурильская не рассматривался, так как влияние нулевой моды резонансных колебаний с периодом около 19 мин (узловая линия на входе в бухту) хорошо изучено и многократно описано в научной литературе [Рабинович, 1993].

Показано, что при морских опасных явлениях значительная опасность находящимся в портах судам и гидротехническим сооружениям связана с резонансными колебаниями – сейшами, характеристики которых изучены сравнительно слабо и, как правило, не учитываются при проведении дноуглубительных работ, планировании реконструкции или размещения новых гидротехнических сооружений. Определены основные периоды резонансных колебаний и оценена их роль при цунами и при штормовых ситуациях, заключающаяся в возрастании амплитуды и продолжительности колебаний на отдельных периодах.

Наиболее подробно изучен характер проявления морских опасных явлений в порту г. Холмск. Показано, что при цунами возбуждается главным образом нулевая мода резонансных колебаний (узловая линия на входе в бухту, где возникают сильные течения), максимальные колебания уровня в ее удаленной части. При штормовых ситуациях главную роль играет одноузловая продольная сейша (узловая линия в центре бухты, пучности вблизи входа и в кутовой части).

На основе проведенного анализа можно рекомендовать учитывать результаты проведенных исследований при планировании работ по реконструкции портов.



Список литературы

1. *Дущенко П.В., Ивельская Т.Н., Шевченко Г.В.* Опыт использования телеметрических регистраторов уровня моря в службе предупреждения о волнах цунами // Вестник КРАУНЦ. – Серия Науки о Земле. – 2003. – №2.
2. *Ефимов В.В., Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В.* Волны в пограничных областях океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 280 с.
3. *Ивельская Т.Н., Шевченко Г.В.* Усиление низкочастотной составляющей Чилийского цунами (май 1960) в северо-западной части Тихого океана // Метеорология и гидрология. – 2006. – №2. – С. 69–81.
4. *Ивельская Т.Н., Храмушин В.Н., Шевченко Г.В.* Мониторинг морских опасных явлений в порту города Холмск // Динамические процессы на шельфе Сахалина и Курильских островов. – Южно-Сахалинск, 2001. – С. 146–159.
5. *Като Э., Миськов О. А., Шевченко Г. В.* Штормовые нагоны на побережье острова Сахалин в конце XX века // Динамические процессы на шельфе Сахалина и Курильских островов: Сб.ст. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2001. – С.160–176.
6. *Ковалев П. Д., Шевченко Г. В., Ковалев Д. П.* Изучение опасных морских явлений в порту города Корсаков // Динамические процессы на шельфе Сахалина и Курильских островов: Сб. стат. – Южно-Сахалинск, 2001. – С. 138–145.
7. *Ковалев П. Д., Шевченко Г. В., Ковалев Д. П.* Экспериментальные исследования явления тягуна в порту г. Холмск // Известия АИИ им. А.М. Прохорова. Прикладная математика и механика. Н. Новгород: НГТУ. 2007. Т. 20. С. 106–112.
8. *Ковалев П. Д., Шевченко Г. В., Ковалев Д. П., Чернов А. Г., Золотухин Д. Е.* Регистрация Симуширского и Невельского цунами в порту города Холмск // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28. № 5. С. 36 – 43.
9. *Королев Ю. П., Шевченко Г. В.* Особенности распространения волн цунами в районе Петропавловска-Камчатского // Вулканология и сейсмология. – 2003. – №6. – С.62–70.
10. *Рабинович А. Б.* Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. Л.: Гидрометеиздат, 1993. 240 с.
11. *Файн И. В.* Частотные свойства курильского шельфа. Генерация цунами и выход волн на берег. – М., 1984. – С.80–83.
12. *Храмушин В. Н., Шевченко Г. В.* Метод детального цунамирайонирования на примере побережья Анивского залива // Океанология. – 1994. –Т. 34, №2. – С. 218–223.
13. *Шевченко Г. В., Любичкий Ю. В., Като Л. Н.* Проявление штормовых нагонов в южной части острова Сахалин / ИМГиГ ДВО РАН. – Препр. – Южно-Сахалинск, 1994. – 46 с.
14. *Шевченко Г. В.* Вероятностные оценки риска морских наводнений в порту Корсакова // Цунами и сопутствующие явления. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1997. – С. 91–105.
15. *Шевченко Г. В., Ковалев П. Д., Ковалев Д. П.* Резонанс волн на паромной переправе. – Мир транспорта. – 2012. - №1. – С. 58–65.
16. *Shevchenko G. V., Chernov A. G. Kovalev P. D., Kovalev D. P., Likhacheva O. N. Loskutov A. V. and Shishkin A. A.* The tsunamis of January 3, 2009 in Indonesia and of January 15, 2009 in Simushir as recorded in South Kuril Islands // Science of tsunami hazard. – 2011. – Vol.30, No 1. – P. 43–61.
17. *Rabinovich A. B.* Seiches and harbor oscillations // Handbook of Coastal and Ocean Engineering, World Scientific Publ., Singapore, 2009. – P. 193–236.