



Резонанс волн на паромной переправе



Георгий ШЕВЧЕНКО
Georgiy V. SHEVCHENKO

Петр КОВАЛЕВ
Petr D. KOVALEV



Дмитрий КОВАЛЕВ
Dmitry P. KOVALEV

Шевченко Георгий Владимирович — доктор физ.-мат. наук, зав. лабораторией цунами Института морской геологии и геофизики ДВО РАН.

Ковалев Петр Дмитриевич — доктор технических наук, зав. лабораторией волновой динамики и прибрежных течений ИМГиГ ДВО РАН.

Ковалев Дмитрий Петрович — кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник.

Экспериментальные исследования резонансных колебаний волн в порту Холмск. Негативное влияние морской стихии на разгрузку железнодорожных составов с судов паромной переправы, связывающей о. Сахалин с материком. Использовались автономные и кабельные регистраторы придонного гидростатического давления, отражающие вариации морской поверхности. Показано, что при цунами в портовой бухте резко усиливается нулевая мода резонансных колебаний с периодом 8 мин. При штормовых ситуациях помимо нулевой моды резко усиливается одноузловая продольная сейша бухты, имеющая узловую линию в центральной и пучность в кутовой частях.

Ключевые слова: морской порт, паромная переправа, натурные наблюдения, волновые процессы.

Поворотным моментом в развитии перевозок между о. Сахалин и материком стало открытие в 1973 году железнодорожной морской паромной переправы Ванино—Холмск. Перевозки осуществляются паромными судами, спроектированными и построенными специально для работы на данной линии. По грузовым мостам, которыми оснащены паромные терминалы портов Ванино и Холмск, на борт паромов накатываются непосредственно железнодорожные вагоны. Эта технология, позволяющая избавиться от физической перевалки грузов в портах, дала возможность сократить время и объем транспортных операций, увеличить сохранность грузов, безопасность их хранения и доставки.

За годы эксплуатации число паромов достигало 10 единиц в 1991-1992 годах, объемы перевозки грузов — 5,74 млн тонн (1988 г.). С конца 1990-х, когда было открыто автомобильное сообщение из Ванино в Хабаровск и Комсомольск-на-Амуре, к обслуживанию портов более активно присоединился автотранспорт, в первую очередь это коснулось большегрузных автомобилей со скоропортящимися и другими потребительскими грузами.



Рис. 1. Вход парома «Сахалин-7» в бухту порта Холмск.

Несмотря на сокращение объема перевозок в период экономического спада, линия Ванино—Холмск продолжает оставаться важнейшей транспортной артерией между Сахалином и материковой частью России, ее пропускная способность составляет примерно 3,3 млн тонн грузов в год.

Для обеспечения безопасной разгрузки железнодорожных составов необходима точная стыковка рельс на судне и берегу.

Холмская бухта хорошо защищена от морских волнений, однако портовые сейши, являющиеся причиной явления тягуна, даже при умеренной интенсивности могут нарушать эту стыковку, затруднять погрузо-разгрузочные работы и быть причиной простоев парома в порту (для автомобильного транспорта ситуация менее сложная).

Эта проблема возникла с момента запуска переправы, в 1980-е годы ежегодный ущерб от простоев паромов из-за тягуна



Рис. 2. Google-карта Холмского морского порта. Кружками показано положение постоянного (1) и временного (2) регистраторов волнения и уровня. Отмечены причалы паромной переправы первой (I) и второй (II) очередей.





Рис. 3. Постановка автономного регистратора 2 (отмечен стрелкой) в районе причала № 9 Холмского морского порта.

превышал 10 млн рублей. Она обострилась после проведения дноуглубительных работ в бухте и наращивания волнозащитных молов, которые привели к увеличению добротности собственных колебаний.

Для изучения условий формирования тягуна и особенностей проявления других типов морских опасных явлений Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН в течение ряда лет (2006–2009) осуществлял инструментальные измерения колебаний уровня моря в портовой бухте Холмска. Использовались автономные и кабельные регистраторы придонного гидростатического давления, отражающие вариации морской поверхности. Регистрация проводилась практически непрерывно одним прибором, установленным в кутовой части бассейна (датчик 1 на рис. 2), и только зимой 2008 года была осуществлена постановка автономной станции 2, что позволило проанализировать свойства собственных колебаний более тщательно.

ОРГАНИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Холмская бухта представляет собой акваторию грушевидной формы с относительно широкой основной частью и узкой удаленной (кутовой), в которой собственно и находятся главный причал паромной переправы I (рис. 2), а также другие портовые сооружения. Вход в бухту прикрыт

с юга и севера волнозащитными молами, которые оставляют свободным сравнительно узкий проход — данное обстоятельство является весьма 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 [Rabinovich, 2009].

Глубина в районе горловины бухты — около 10 м. От входа к кутовой части проходит фарватер, глубины в котором уменьшаются с 10 м на входе до 8–9 м в основной части акватории и до 6–7 м — в удаленной. Более мелководные зоны выделяются в районе, примыкающем к южному молу, а также (несколько более обширная) вдоль северного и северо-восточного побережья бухты.

Эксперимент начался 26 июля 2006 года с установки в районе гидрометеорологического поста порта Холмск у паромного причала I (рис. 2) измерительного комплекса, состоящего из пьезорезонансного донного датчика гидростатического давления, кабельной линии связи, платы таймера-счетчика PCI 1780, персонального компьютера, цифровой метеостанции WS 2300 и блока бесперебойного питания.

Измерения волновых процессов в бухте осуществлялись с дискретностью 1 с, что позволяет определять характеристики ве-

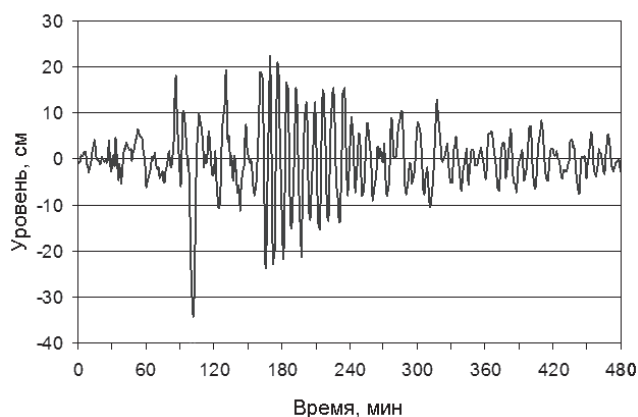


Рис. 4. 8-часовой отрезок записи колебаний уровня моря на акватории Холмского морского порта, содержащий Невельское цунами 2 августа 2007 года.

тровоого волнения с учетом поправок на глубину постановки прибора [Кабатченко и др., 2007]. В результате проведенных экспериментов были получены многолетние ряды наблюдений и зарегистрированы опасные морские явления – волны цунами, вызванные подводными землетрясениями, произошедшими 16.11.2006 вблизи о. Симушир (средняя часть Курильской гряды) и 2.08.2007 вблизи г. Невельск [Ковалев и др., 2009], а также сильный штормовой нагон 22.11.2006, высота подъема уровня при котором достигала 80 см [Ковалев и др., 2007].

Второй прибор был установлен в центральной части южного берега бухты вблизи причала № 9 (рис. 3) 23 октября 2007 года, он проработал до 13 апреля 2008 года. За этот период в порту отмечено несколько случаев усиления резонансных колебаний, одна из таких ситуаций (22 февраля) подробно анализируется ниже.

Для анализа длинноволновых процессов производилось усреднение исходных рядов с временным окном 1 мин. С целью более эффективного подавления ветрового волнения использовались весовые коэффициенты фильтра Кайзера-Бесселя [Дженкинс, Ватс, 1972]. Из полученных рядов вычитался предвычисленный прилив, в дальнейшем анализировались непериодические вариации уровня моря, обусловленные воздействием на морскую поверхность приземного атмосферного давления и скорости ветра. Характеристики метеорологических элементов вблизи точки регистрации измерялись при помощи автономной цифровой метеостанции.

Следует отметить, что ранее, в 1998–1999 годах, в той же акватории проводился

эксперимент по измерению длинных волн типа цунами и организации передачи данных на компьютер оперативного дежурного службы предупреждения о цунами в Южно-Сахалинске [Ивельская и др., 2001]. Было выявлено, что в спектрах записей колебаний уровня моря постоянно присутствуют два хорошо выраженных пика на периодах около 8 и 3 мин.

Первый из таких пиков отвечает нулевой моде резонансных колебаний бухты, для которых колебания на всей акватории происходят синфазно, амплитуда плавно возрастает от входа к удаленной части бухты, а узловая линия находится в горловине. Большинство зарегистрированных в порту Холмска цунами проявилось как усиление именно этих колебаний, в то время как при штормовых ситуациях, связанных с прохождением циклонов, в большей степени возрастала амплитуда моды с периодом 3 мин. Этот период отвечает одноузловой продольной сейше бухты, и именно с ней в указанной работе связывалось явление тягуна, поскольку нулевая мода не вызывает резко выраженных течений (за исключением района горловины). Рассмотрим ситуацию более детально.

РЕГИСТРАЦИЯ НЕВЕЛЬСКОГО ЦУНАМИ

2 августа 2007 года у юго-западного побережья о. Сахалин произошло сильнейшее в районе землетрясение с магнитудой $M_w=6,2$, вызвавшее значительные разрушения в г. Невельск, расположенном в 40 км к югу от места событий [Ковалев и др., 2009]. Это землетрясение и связанные с ним волны цунами, имевшие вблизи источника высоту до 2–3 м, были зарегистри-



Рис. 5. Графики спектральной плотности колебаний уровня моря, рассчитанные по отрезкам суточной продолжительности, включавшего цунами и предшествовавшего ему. Число степеней свободы 14.

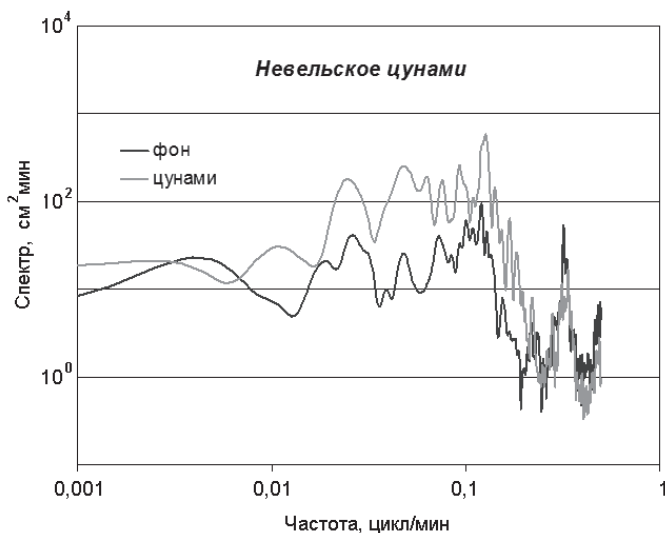
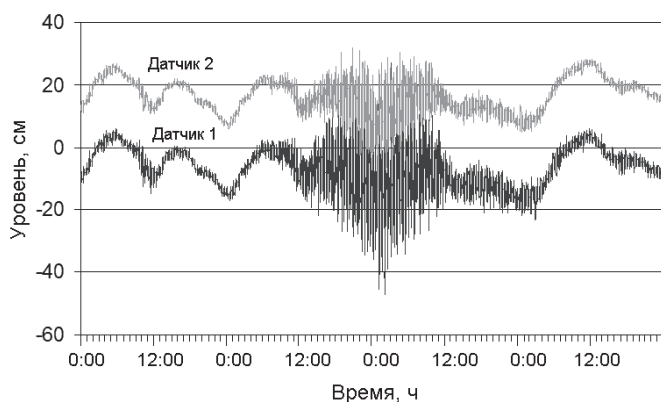


Рис. 6. Графики колебаний уровня моря на датчиках 1 и 2 12–15 февраля 2008 года.



стрированы прибором 1 в Холмской бухте. Восьмичасовой отрезок записи, содержащий цунами, представлен на рис. 4.

Вступление волны характеризовалось положительным импульсом высотой около 20 см. Затем, после сравнительно слабого колебания, было отмечено продолжительное понижение уровня более чем на 40 см, а потом наблюдались нерегулярные вариации. Спустя примерно полтора часа после прихода первой волны зафиксирован четкий, хорошо выраженный цуг колебаний с периодом около 8 мин, длительность которого составила более часа. Амплитуда резонансных колебаний вначале плавно убывала от 22 см до 15 см, затем их интенсивность резко уменьшилась, и волновой процесс приобрел менее регулярный характер с преобладанием сравнительно низкочастотных вариаций.

Для определения диапазона периодов, в котором наблюдалось обусловленное

цунами увеличение интенсивности колебаний, по отрезкам суточной продолжительности рассчитывались спектральные характеристики записей (рис. 5). Расчет производился по отрезкам продолжительностью 6 часов с половинными сдвигами и последующим усреднением спектральной плотности по частотам. Число степеней свободы равнялось 14. Один отрезок содержал цунами, второй, предшествовавший ему, рассматривался как характеризующий естественный длинноволновый фон.

Возрастание спектральной плотности отмечено на периодах от 5 до 100 мин, причем в спектре колебаний при цунами выделяются хорошо выраженные пики на периодах около 8, 20 и 40 мин, присутствующие также и в спектре фона. Усиление колебаний на периодах 20 и 40 мин обусловлено топографическими условиями внешней акватории. Наиболее важным в данном случае является тот факт, что пик

с периодом 8 мин является основным в спектре цунами, он отвечает наблюдаемой картине с хорошо выраженными колебаниями, соответствующими нулевой моде бассейна.

Не менее существенно 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 и подтверждает высказанное исследователями [Ивельская и др., 2001] мнение, что одноузловая продольная сейша бухты слабо возбуждается при цунами. Соответственно при цунами в Холмской бухте вряд ли наблюдается явление тягуна, выраженное в быстрых, резко меняющихся по направлению течениях, ибо нулевая мода не имеет узловых линий внутри нее. Мощные течения, меняющие свое направление каждые 4 минуты, будут наблюдаться в горловине бухты, затрудняя прохождение судов через нее.

ШТОРМОВАЯ СИТУАЦИЯ

На рис. 6 представлены четырехсуточные отрезки записи колебаний уровня моря, включавшие сильный шторм 13-14 февраля 2008 года. Виден совершенно необычный характер колебаний в бухте, причем более интенсивные среди них наблюдались в удаленной части бухты, районе основного причала паромной переправы. Здесь максимальный размах колебаний достигал полуметра, в то время как ближе к причалу № 9 — примерно в два раза меньше. При этом значимого подъема среднего уровня в бухте (штормового нагона) не зафиксировано, отмечено резкое усиление сравнительно короткопериодных вариаций, которые обусловлены интенсификацией сейш.

Для анализа этого необычно сильного шторма рассмотрим графики изменения значимой высоты ветровых волн и спектрально-временной диаграммы (рис. 7), которые строились на основе расчета спектра волнения по последовательным отрезкам длительностью 15 минут в период с 9 по 22 февраля. Значимая высота ветровых волн достигала на обеих станциях 2,4 м, что очень много для столь закрытой акватории, как Холмская бухта. Вероятно,

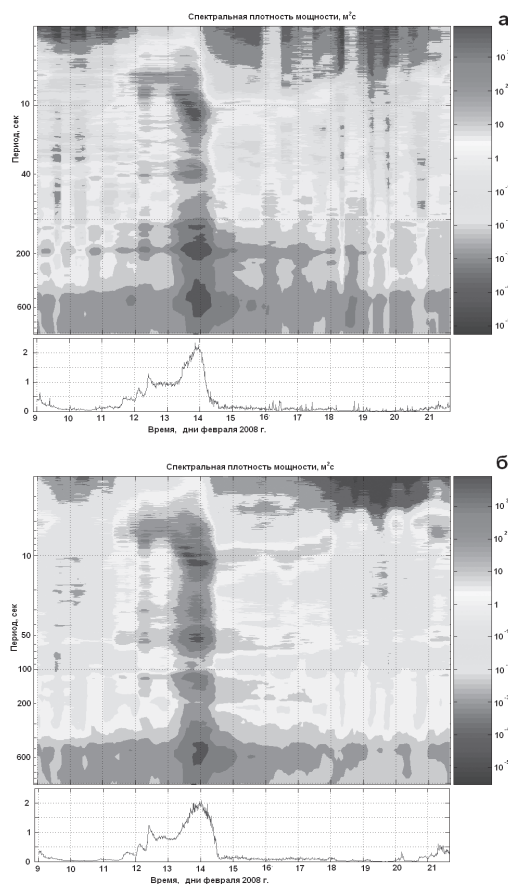


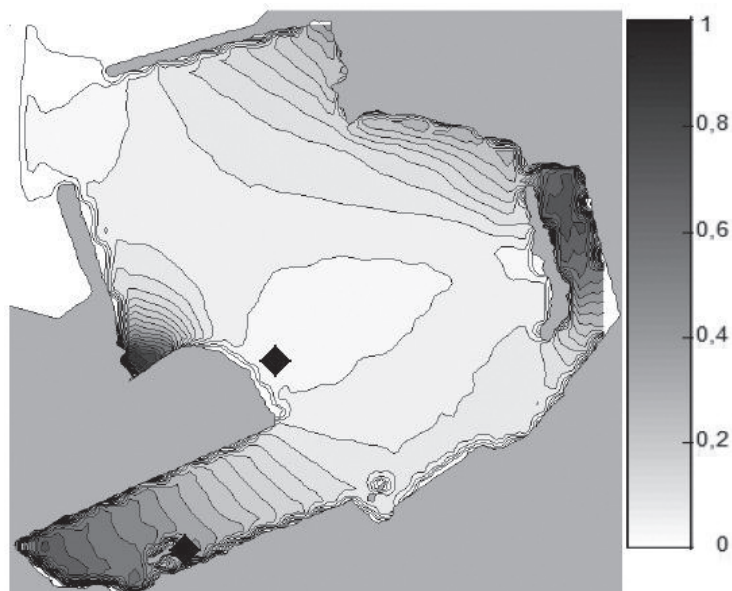
Рис. 7. Спектрально-временная диаграмма волнения и график вариаций значимой высоты волн на датчике 1 (а) и датчике 2 (б) в период с 9 по 22 февраля 2008 года.

такому проникновению волнения в гавань способствовали необычно большие для данного района периоды волн — главный максимум приходился на периоды 12-14 сек. Это нехарактерно для Татарского пролива, в котором из-за сравнительно малой длины разгона преобладают короткопериодные ветровые волны, а зыбь наблюдается в редких случаях.

Если в высокочастотной части спектрально-временной диаграммы вариации во времени энергии колебаний выглядят идентично, то в диапазоне длинных волн есть существенные различия. Так, на датчике 1 в кутовой части бухты наблюдаются мощные максимумы, присутствующие на диаграмме постоянно в виде горизонтальных полос и особенно усиливающиеся во время шторма, на периодах около 3 и 8 мин. На датчике 2 максимум на периоде 8 мин имеется, но выражен слабее,



Рис. 8. Распределение спектральной амплитуды сейши с периодом 3 мин в Холмском порту по результатам численного моделирования. Показаны места установки автономных регистраторов волнения.



а на периоде 3 мин отсутствует. Зато появляется максимум на периоде около 55 с, которого нет на датчике 1, но который был ранее получен как резонансный период бухты по результатам численного эксперимента [Ивельская и др., 2001]. Тогда же зарегистрированный еще один максимум с периодом около 90 с выделяется (слабее по сравнению с максимумом 3 мин) на датчике 1 и отсутствует на датчике 2.

Более сильные колебания с периодом 8 мин на удаленной станции 1 по сравнению с расположенным в центральной части датчиком 2 согласуются с представлением о плавном возрастании амплитуды нулевой моды по мере удаления от горловины бухты, где находится узловая линия. Отсутствие максимума на периоде около 3 мин на датчике 2 указывает на близость его расположения к узловой линии продольной сейши.

Чтобы убедиться в этом, было выполнено численное моделирование длинноволновых колебаний в бухте [Чернов, 2009]. Для этого вне ее задавалось начальное возмущение — типа источника цунами. Начальные отрезки записи из анализа исключались для уменьшения влияния первичного возмущения, поскольку спустя несколько часов после действия источника в бухте сохраняются только резонансные колебания. На рис. 8 представлено распределение средней амплитуды колебаний

на периоде 3 мин, который показывает, что действительно датчик 2 находился в районе узловой линии. Именно здесь, 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 сейши, g — ускорение свободного падения, h — средняя глубина бухты, которая вдоль фарватера составляет 7 м.

Для наблюдавшейся во время рассматриваемого шторма 14 февраля значения амплитуды 30 см максимальная скорость течения составляет 35 см/с, причем следует учитывать, что каждые полторы минуты оно изменяет свое направление на противоположное. 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 явления тягуна выражены слабее, здесь влияния резонансных колебаний проявляются главным образом в колебаниях уровня, причем нарастает амплитуда как первой, так и второй моды.

ВЫВОДЫ

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 Сахалин и материком.

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), ее амплитуда возрастает в удаленной от берега части.

При штормовых ситуациях помимо нулевой моды резко усиливается одноузловая продольная сейша бухты, имеющая узловую линию в центральной и пучность в кутовой частях.

При наблюдавшихся во время шторма 13–14 февраля 2008 года амплитудах этой сейши около 30 см можно ожидать в центральной части бухты течений со скоростями до 35 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 паромных причалах.

Основной паромный причал первой очереди находится в районе, где тягун проявля-

ется незначительно, зато здесь отмечены максимальные амплитуды как нулевой, так и первой мод резонансных колебаний. Именно здесь возможны наиболее интенсивные вариации уровня моря

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.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. — М.: Мир, 1972.
2. 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.
3. Кабатченко И. М., Косьян Р. Д., Красицкий В. П., Серых В. Я., Шехватов Б. В. Опыт эксплуатации волнографа-мареографа ВМ-04//Океанология. — 2007. — Том 47, № 1.
4. Ковалев П. Д., Шевченко Г. В., Ковалев Д. П. Экспериментальные исследования явления тягуна в порту г. Холмск//Известия АИН им. А. М. Прохорова. Прикладная математика и механика. — 2007. — Т. 20.
5. 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.
6. Rabinovich A. B. Seiches and harbor oscillations//In: Handbook of Coastal and Ocean Engineering, World Scientific Publ., Singapore, 2009. — pp. 193–236.
7. Чернов А. Г. Исследование пространственной структуры резонансных колебаний в бассейнах со сложной геометрией/Автореф. дис... канд. физ.-мат. наук. — Н. Новгород, 2009. ●

RESONANCE OF WAVES AT A TRAIN FERRY

Shevchenko, Georgy V. — D.Sc. (Phys-Math), chief of the laboratory of tsunami of the Institute of Sea Geology and Geophysics of Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences.

Kovalev, Petr D. — D.Sc. (Tech), chief of the laboratory of wave dynamics and coastal flows of the Institute of Sea Geology and Geophysics of Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences.

Kovalev, Dmitry P. — Ph. D. (Phys-Math), senior researcher of the Institute of Sea Geology and Geophysics of Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences.

The authors describe the researches on resonance wave oscillations in the port of Kholmok and negative influence of the sea elements on unloading of the trains arriving to Sakhalin from the continent port of Vanino by train ferry.

The authors used autonomous and cable recorders of sea-floor hydrostatic pressure that reflected the variations of sea surface. It was proved that during tsunami the zero mode of resonance oscillations with 8 min period increased largely in the port bay. During the storms not only the zero mode but also the peer longitudinal seiche of the bay increased. This seiche has nodal line in the center and antinode in the apex of the bay.

Key words: sea port, train ferry, field observation, wave processes.

Координаты авторов (contact information): Шевченко Г. В. — shevchenko@imgg.ru, Ковалев П. Д. — peter@imgg.ru, Ковалев Д. П. — kovalevdp@imgg.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 09–05–00591.

The paper has been done with the financial support of the grant of Russian Foundation for Fundamental Researches 09–05–00591.

