

А.С.ВТЮРИНА, В.А.ШУСТИН, В.Н.ХРАМУШИН, Г.В.ШЕВЧЕНКО,
Т.Н.ИВЕЛЬСКАЯ

Исследование гидродинамического режима на акватории Холмского морского порта

Изложены результаты практического опробования новых вычислительных экспериментов по прямому моделированию длинноволновых процессов в мелководной зоне прибрежного шельфа и на акватории действующего морского порта. Сопоставляются результаты численного моделирования с материалами длительных и высокоточных измерений уровня на акватории морского порта и с наблюдениями за прибрежным длинноволновым режимом с борта экспедиционного судна. В русле поиска новых методов для решения традиционных гидротехнических задач получены интересные выводы проектно-технического характера по улучшению волнового режима Холмского морского торгового порта, реализация которых, по мнению авторов, могла бы восстановить его статус превосходного порта-убежища.

Research of the hydrodynamic conditions of the Kholmsk seaport water area. A.S.VTYURINA, V.A.SHUSTIN, V.N.KHRAMUSHIN (Special Design Office of the Means of Marine Research Automation, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk), G.V.SHEVCHENKO (Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk), T.N.IVELSKAYA (Sakhalin Regional Tsunami Center, Yuzhno-Sakhalinsk).

The results of the practical tests of computational experiments on the direct modeling of long wave processes in the shallow coastal waters and in the water area of functioning seaport have been presented. The results of computational modeling have been compared with prolonged and high-accuracy records of measurements of sea level on the seaport water area and with observations of coastal long wave conditions made from a deck of an expedition vessel. When searching for the new methods of solving the traditional hydroengineering tasks, the interesting design and technical solutions of improvement of wave conditions in the Kholmsk trading seaport have been found. In authors' opinion, the implementation of these solutions could restore the port's status of excellent port-shelter.

Современный уровень развития информационно-измерительной техники, систем электронной связи и телеметрического контроля позволяет решать множество традиционных задач существенно новыми методами, а некоторые технологически неразрешимые исследовательские задачи прошлых лет получили совершенные инструментальные средства почти обыденно бытового уровня. Несомненно, что к таким инструментам можно отнести как вычислительные эксперименты, выполняемые на персональных компьютерах, так и средства измерения и доставки телеметрической информации, способные эффективно работать по каналам Интернета и электронной почты.

ВТЮРИНА Александра Сергеевна, ШУСТИН Валерий Александрович, ХРАМУШИН Василий Николаевич — кандидат технических наук (СКБ средств автоматизации морских исследований ДВО РАН, Южно-Сахалинск), ШЕВЧЕНКО Георгий Владимирович — кандидат физико-математических наук (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск), ИВЕЛЬСКАЯ Татьяна Николаевна (Сахалинский региональный центр цунами, Южно-Сахалинск).

Настоящая работа основана на успешной опытной эксплуатации стандартного Холмского мареографа для телеметрического контроля состояния моря, в результате которой были опробованы основные технические решения по созданию сети прибрежных гидрофизических постов, необходимых для оперативного информационного обеспечения Сахалинского регионального центра цунами. Цикл сопутствующих морских исследований был посвящен всестороннему исследованию гидродинамических процессов на море, которые могли бы повысить эффективность работы морских служб Сахалинской области [3].

По просьбе дирекции Холмского морского торгового порта были изучены вопросы улучшения волнового режима и исключения явления тягуна на операционных акваториях порта при прохождении штормов, что в немалой степени способствовало поиску единых подходов как к задачам оперативного прогнозирования опасных морских явлений, так и к проектно-техническим решениям по минимизации ущерба от штормовых наводнений. Показанные в работе методы исследований могут быть использованы в гидротехнических изысканиях: при выборе и обустройстве гаваней — укрытий от штормов, проектировании волнозащитных сооружений, реконструкции гидротехнических сооружений действующих портов.

Проектные особенности Холмского морского торгового порта. Географически порт Холмск расположен в вершине глубоководного япономорского желоба, а его внутренняя акватория чисто и без каких-либо внутренних трансформаций длинных волн откликается на длинноволновые процессы в Японском море с периодами волн более 3 мин. Высокоточная регистрация уровня моря в порту представляла безусловный интерес для изучения новых методов оперативной диагностики и прогноза опасных морских наводнений, возникающих на акватории Японского моря и проявляющихся на Сахалинском побережье [1]. Свободному проникновению длинных волн на акваторию порта не препятствуют два очень узких ограждающих мола. На рис. 1 показаны расчетные лучи и фронты распространения волн от ворот порта в глубь его акватории, которые подтверждают практически полный возврат отраженной из порта волны ровно через 2 мин.

В соответствии с исходным проектом, реализованным японскими гидростроителями, порт защищен от штормовых волн и волн зыби открытого моря с периодами 10—12 с. Именно такие волны преобладают при прохождении штормов в Татарском проливе. Основная энергия штормовых волн гасится на мелководных пляжах на подходах к Холмскому порту, а отражаемые от волнозащитных молов волны отводятся в разные стороны, чтобы во входных воротах не образовывалось интенсивной толчеи.

Входные ворота порта практически полностью блокируют прохождение штормовых волн с указанными периодами на операционную акваторию порта, что подтверждается довольно любопытным фактом: у причалов порта возникает интенсивное волнение с половинными периодами, не превышающими 5—6 с. Обычно в волновой гидродинамике удвоение частоты вынужденных колебаний связывается с существенно нелинейными процессами на маршруте распространения волн [2], что и было использовано для блокирования проникновения штормовых волн через входные ворота порта. Как выяснилось, наблюдаемые волны малых периодов являются искусственными, так как рождаются на акватории порта и поддерживаются высокой резонирующей способностью отдельных участков его морского дна.

Таким образом, акватория Холмского порта хорошо защищена от штормовых волн и зыби и имеет широкий выход для излучения в открытое море внутренней длинноволновой энергии, которая в замкнутых акваториях имеет свойство аккумулироваться на участках морского дна с активным откликом на длинноволновые колебания.

Несмотря на добротность проектных решений при строительстве искусственной гавани, в последнее время наблюдается ухудшение волнового режима на аква-

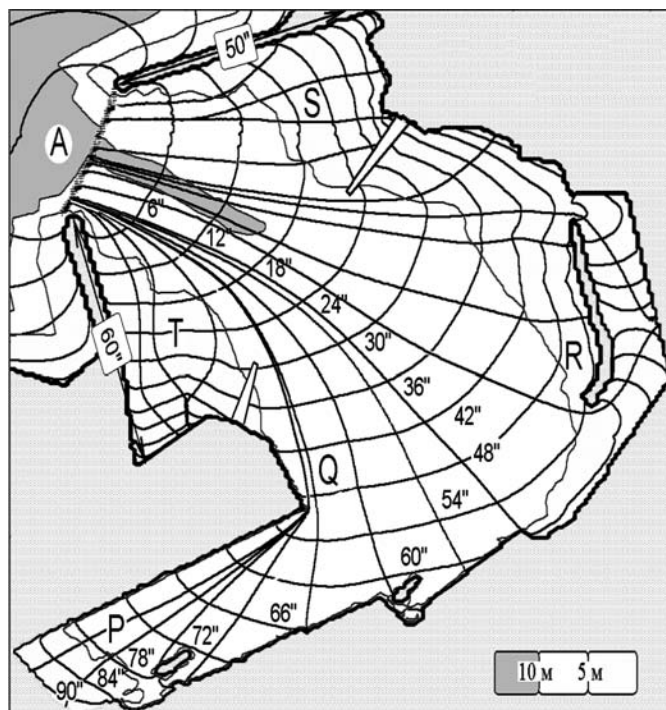


Рис. 1. Батиметрическая карта и кинематическая схема длинноволновых процессов на акватории Холмского морского торгового порта с указанием расчетных подобластей: А — входные ворота порта, Т — входной фарватер и южная ловушка ветровых волн, S — северная ловушка, Q — область дноуглубительных работ в районе 8-го причала, R — район внутренней восточной гавани, Р — южная гавань порта

тории порта в результате последней реконструкции, связанной с вводом в эксплуатацию второй очереди паромной переправы. При этой реконструкции были разрушены внутренние молы у волновых ловушек S и Т (рис. 1), а также сильно укорочен и оборван на мелководном участке восточный мол (зона R), который ранее образовывал внутреннюю гавань для маломерных судов.

Наблюдения за развитием штормового волнения на подходах к порту выявили отражение волн от насыпного искусственного берега, расширившего за счет моря южную часть наземной территории порта. Отраженные штормовые волны теперь не гасятся на пологом пляже, а возвращаются к воротам порта и устраивают на его входе толчею повышенной амплитуды. Ухудшение волнового режима в целом стало столь заметным, что Холмский морской торговый порт был выведен из состава сахалинских портов-убежищ.

Таким образом, одной из дополнительных целей настоящей работы стал поиск рекомендаций по восстановлению волнозащитных механизмов в Холмском порту, самые эффективные или простые из которых могли бы быть реализованы при проведении текущих берегоустроительных и дноуглубительных работ.

Вычислительные эксперименты для выявления аккордов собственных длинноволновых колебаний

Собственные колебания прибрежных акваторий сложно выявлять аналитическими или экспериментальными методами, но они довольно точно моделируются прямыми вычислительными экспериментами, основанными на разност-

ных уравнениях динамики жидкости в полных потоках [4]. При постановке вычислительной задачи на выявление аккордов собственных частот учитываются следующие физические особенности проявления длинноволновых процессов над геометрически сложным рельефом морского дна.

1. Если на акваторию морского порта непрерывно воздействует внешнее длинноволновое возмущение на строго определенной частоте, то во всей акватории установятся периодические колебания на строго заданной частоте, при этом амплитуда и фаза волн в конкретных точках будут зависеть от пространственной геометрии и резонирующих свойств близлежащих к этой точке участков.

2. Если на замкнутую акваторию воздействует короткий единичный импульс, то в ней возникают свободные колебания. Вследствие ярко выраженных дисперсионных свойств волнения моря, обусловленного сильными конвективными течениями в областях со сложной геометрией дна, в исследуемой акватории образуются длинноволновые колебания в диапазоне более низких частот, чем в исходном единичном источнике.

3. Учитывая, что в реальной морской акватории всегда присутствуют области с повышенными резонирующими свойствами, следует ожидать, что по прошествии некоторого времени все колебания в заданной акватории приобретут свойства полосового спектра, где каждый локальный участок будет иметь характерный аккорд колебаний, определяемый его собственными топологическими и резонансными свойствами.

Таким образом, в результате короткопериодного импульсного возмущения морской акватории вся акватория возбудится в широком спектре собственных колебаний, а по прошествии некоторого времени в ней останутся колебания только на тех частотах, которые будут поддержаны рельефом морского дна, образующим либо усилители амплитуды, либо аккумуляторы энергии этих волн.

В результате проведения серии вычислительных экспериментов были выявлены участки морского дна, на которых происходит усиление интенсивности или аккумуляция энергии волновых колебаний, возникающих под воздействием различных внешних источников возмущения, таких как атмосферные циклоны, прибрежные сейшевые колебания уровня, длинная штормовая зыбь и др.

Численное моделирование длинноволнового режима на подходах к Холмскому порту. Вычислительные эксперименты по моделированию длинноволновых процессов в открытых акваториях Японского моря выполнялись с использованием модели батиметрии, оцифрованной с навигационной карты меркаторской проекции (рис. 2). Размер сеточной области 281x156 узлов, шаг сетки на приведенной широте 52° — 1 км. Для соблюдения пространственных аппроксимационных критериев была введена ограничивающая глубина — 12 м. Ближайшая к порту контрольная точка стояла на 17-метровой изобате, где 5-минутная волна аппроксимировалась с помощью четырех длин условных расчетных ячеек. В качестве начальных условий задавалась одиночная полуволна синусоидальной формы, входящая в акваторию через свободную границу расчетной области в северо-восточном направлении с амплитудой 1 м и периодом 5 мин.

По глубоководному желобу длинноволновые возмущения в Японском море очень быстро распространяются и достигают Холмского порта, что можно использовать для оперативного реагирования на изменение гидродинамической или штормовой активности в открытом море, а также с целью оперативного предупреждения удаленных участков смежного побережья об опасных морских наводнениях и цунами. Благодаря особенностям рельефа морского дна первоначальный фронт волны наводнения, подходящей к порту Холмск, будет рассеян в глубоководном желобе.

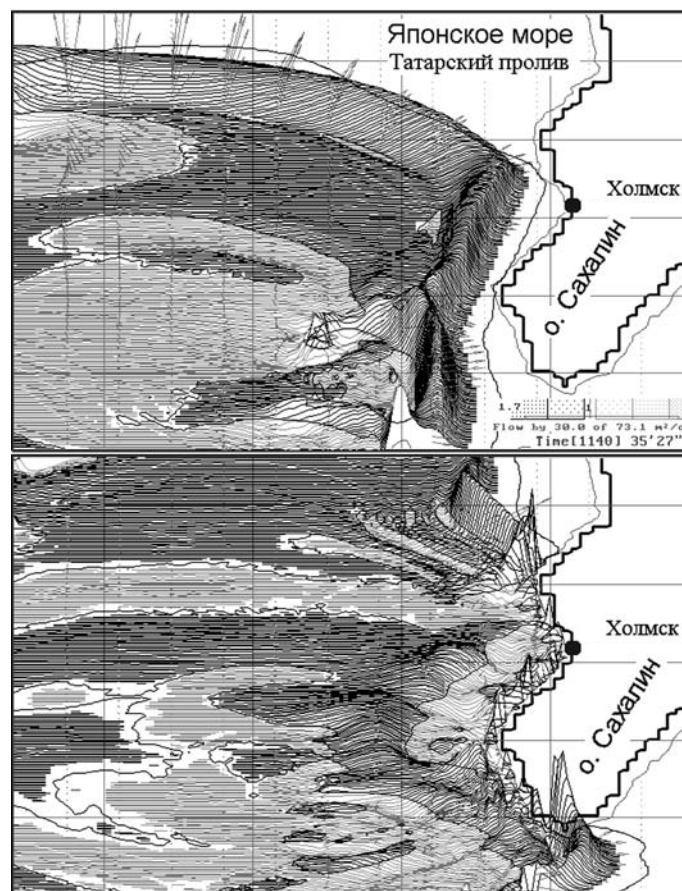


Рис. 2. Изображение двух кадров на экране ЭВМ при моделировании длинноволнового импульса с периодом 5 мин, подходящего из открытого моря к побережью о-ва Сахалин. Расчетное время для верхнего рисунка 35 мин 27 с, для нижнего — 57 мин 28 с. Максимальная амплитуда волны на верхнем рисунке 1,7; на нижнем — 2,9

Справедливо и обратное: если волна подходит к побережью с задержкой, например при торможении на прибрежных банках севернее порта Холмск, то при ее подходе к берегу проявится «эффект линзы» и волна будет иметь максимальную амплитуду. Указанные процессы также иллюстрируются рисунком 2.

Однако сказанное выше справедливо только для первого вступления волны типа цунами, дальнейшее развитие процесса волнообразования вблизи побережья будет всецело зависеть от резонансных свойств его мелководья. На рис. 2 просматриваются равномерно распределенные вдоль берега всплески гребней захваченных краевых волн, которые могут очень долго существовать в области проведения вычислительного эксперимента и проявляются при спектральном анализе результатов в виде собственных волновых аккордов, характеризующих конкретные участки побережья (рис. 3).

Из оценок спектральных аккордов в акваториях юго-западного побережья о-ва Сахалин можно сделать вывод, что на записях Холмского мареографа должны проявляться колебания уровня моря с периодом около 8 мин, источником которых являются длинноволновые резонаторы, аккумулирующие и усиливающие энергию захваченных волн в районе о-ва Монерон и на шельфе вблизи г. Чехов.

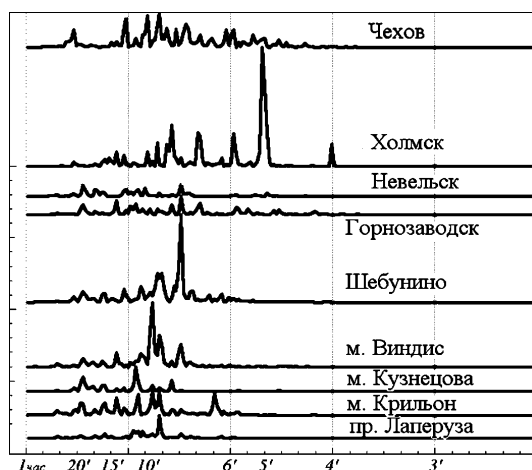


Рис. 3. Спектральное представление аккордов собственных длинноволновых колебаний, характеризующих различные участки побережья о-ва Сахалин. В районе порта Холмск прибрежный шельф имеет наименьшую ширину, что не способствует зарождению собственных длинноволновых колебаний, но и не мешает усилению амплитуды проходящих вдоль берега «захваченных» волн, родившихся на удаленных участках морского шельфа Японского моря

Численное моделирование резонансных колебаний уровня моря на акватории Холмского порта. Расчеты волнового режима на акватории Холмского морского торгового порта выполнены с использованием цифровой модели батиметрии порта с шагом оцифровки 3 м и размером матрицы 269х180 узлов. Пространственная аппроксимация позволяла с помощью 3 условных ячеек вести волну с периодом 3 с по глубине 1 м (рис. 4).

На рис. 4 хорошо видно, как в южной и северной волновых ловушках происходит увеличение амплитуд и смещение фаз входящих в порт волн. На входе эти волны частично сохраняют свои трохоидальные свойства и при попадании на мелководные пляжи волновых ловушек практически полностью самоуничтожаются. Если часть волновой энергии трохоидальных волн преобразуется в длинноволновую, то на выходе из волновых ловушек они гасятся во взаимодействии с новыми, входящими на акваторию порта ветровыми волнами.

Для поиска длинноволновых резонаторов на акватории Холмского порта было установлено 326 точек наблюдения за уровнем моря и течениями. Начальные условия задавались в качестве одиночного импульсного источника, входящего в порт с периодом 3 с. В спектральном анализе использовались расчетные волнограммы в интервале времени начиная с 9 до 18 ч. Таким образом, почти полностью исключалось влияние исходного начального возмущения. При расчете спектров использован алгоритм FFT со сглаживающим окном длиной $2^{11}=2048$ точек. Рис. 5 показывает, что на акватории порта зарождаются различные длинноволновые колебания в диапазоне периодов от 3 с до 1,5 мин, которые в анализируемом интервале времени проявляются в форме ярко выраженных полосовых спектров.

Для анализа результатов вычислительных экспериментов строились следующие пространственные поля, характеризующие распределение параметров волнения по акватории Холмского морского порта: 1) поле передаточной функции, которая характеризует изменение амплитуды волны относительно опорной точки, расположенной в открытом море на входе в порт; 2) пространственное распределение спектральной плотности энергии длинноволновых колебаний уровня моря на акватории порта; 3) пространственное распределение фазы волны относительно опорной точки во входных воротах порта. Если в порту образуются стоячие резонансные колебания уровня моря, то фазовые функции должны образовывать плоскости с резкими границами разрывов на величину π . Такие линии разрывов являются линиями смены фаз стоячих колебаний (узловые линии), и обычно расстояние между такими линиями соответствует полудлине волны на данной частоте.

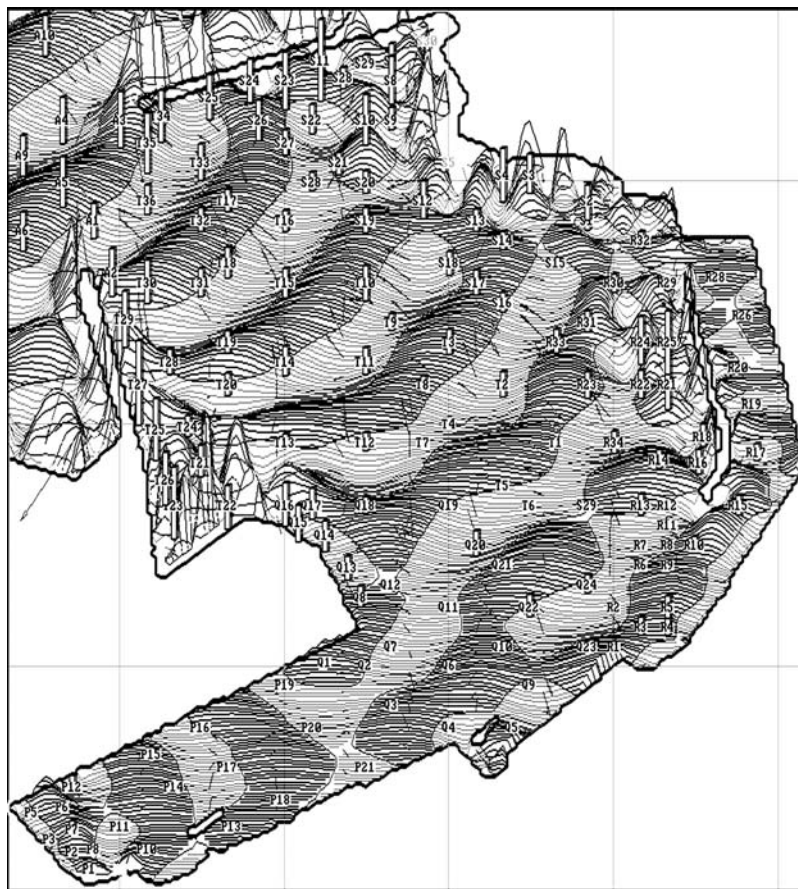


Рис. 4. Изображение на экране ЭВМ в процессе проведения прямого вычислительного эксперимента по моделированию волнового режима в Холмском морском торговом порту. Показан ход моделирования непрерывного гармонического воздействия от штормовых волн северо-западного направления с характерным периодом 10 с. Рядом с точками наблюдения за текущими колебаниями уровня моря и течениями проставлены столбики с максимальными амплитудами волн, зарегистрированными на текущий момент в данных точках

Устойчивая волновая мода с периодом 1 мин 32 с образуется длинноволновым откликом по максимальному расстоянию между мелководьем у северного мола и дальней границей у причала в южной гавани порта. Маршрут волновых движений этой волны проходит по очень сложному рельефу дна порта и имеет проницаемую границу со стороны открытого моря, что не позволяет этой волне активно проявляться у причалов. Если же волна с таким периодом будет нагнетаться со стороны моря, то она проявится только в волновых ловушках и у стенки внутреннего мола (рис. 6).

Волновые моды с периодами 55 и 26 с образуются на хорошо обусловленных волновых резонаторах и являются наиболее опасными для судов, находящихся в порту (рис. 7). Эти колебания уровня моря имеют ярко выраженные узловые линии у рабочих причалов порта, что означает возможность появления здесь больших скоростей течений, что как раз и ассоциируется с явлением тягуна. Однако для развития подобных длинноволновых колебаний довольно редко создаются условия на подходах к Холмскому порту, а зыбь с такими большими периодами в Японском море наблюдается крайне редко.

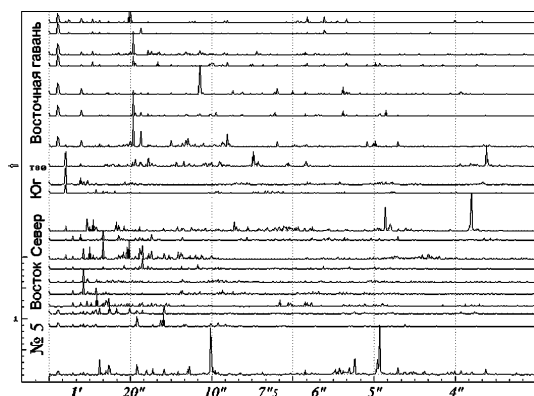


Рис. 5. Аккорды спектральной энергии собственных длинноволновых колебаний в различных точках на акватории Холмского морского торгового порта. Три нижние спектрограммы относятся к волнению у причала № 5, находящегося в самой удаленной южной гавани порта; выше — спектрограммы для восточного берега порта с внешней стороны от внутренней гавани, для северной части порта и южной волновой ловушки, затем для внутренней восточной гавани. На горизонтальной шкале показаны периоды волн. Масштаб всех графиков одинаков

Другие, более высокочастотные, длинноволновые колебания уровня моря образуются и аккумулируются на локальных участках акватории Холмского порта (рис. 8), они реализуются при любом шторме, но большой опасности для стоящих в порту судов не представляют.

Показанные выше длинноволновые колебания уровня моря в акватории Холмского порта хорошо прописываются на всех полученных волнограммах. Характер собственных волновых колебаний в порту Холмск подтверждает высокое качество его проектирования.

Анализ результатов вычислительного эксперимента для акватории порта выявил несколько плоских придонных террас, которые способствуют усилению волнения в порту при прохождении сильных штормов. Все эти террасы ограничены с одной стороны берегом, а с другой — резкими свалами глубин. Одна из них, с глубиной около 2,5 м, образовалась в результате разрушения внутреннего мола и углубления фарватера для второй очереди паромной переправы, вторая — обширная мелководная терраса с глубиной около 1,5 м между молом внутреннего ковша и глубоководным фарватером, третья — плоское мелководье с глубинами 1—1,5 м в северной части порта.

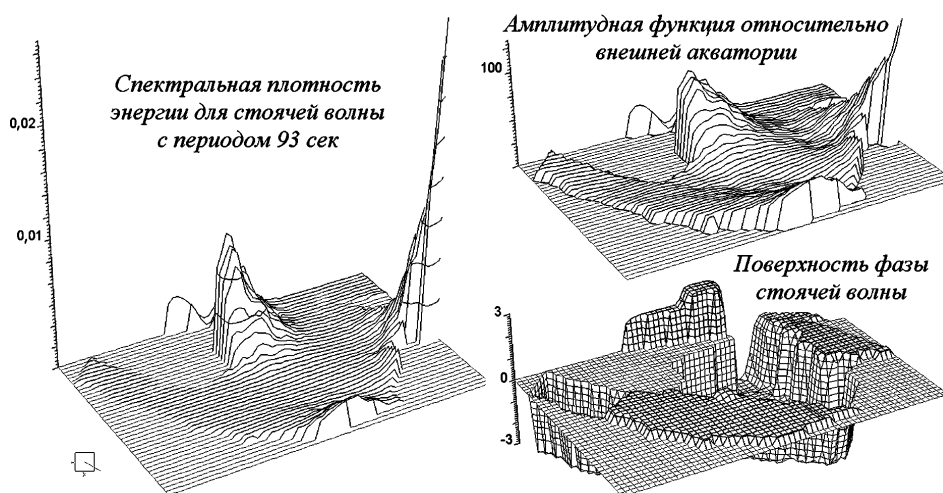


Рис. 6. Визуализация пространственного распределения функции энергетического спектра (слева), амплитудной функции (справа сверху) и относительной фазы (справа внизу) для стоячей волны с периодом 1 мин 32 с в акватории Холмского порта

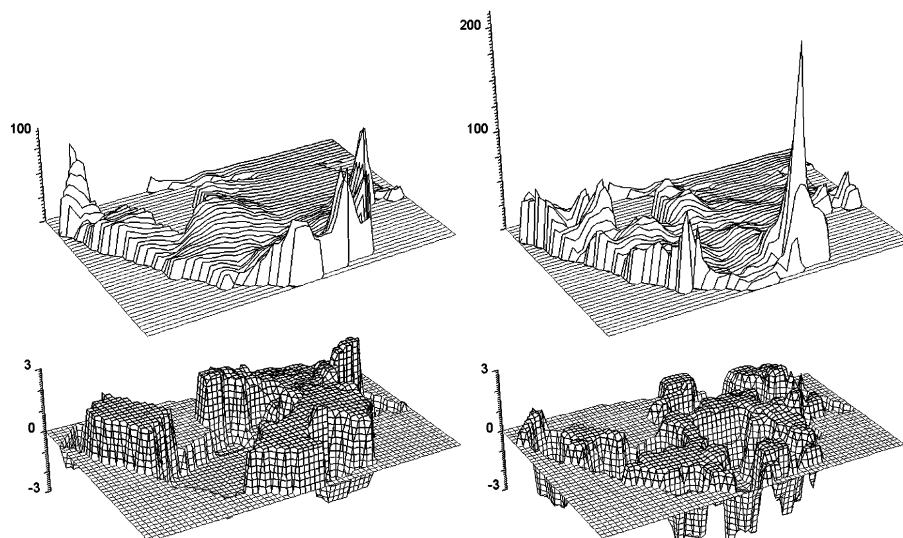


Рис. 7. Форма установившихся длинноволновых колебаний уровня моря, аккумулирующих волновую энергию с периодом собственных колебаний 55 с (слева) и 26 с (справа). На верхних рисунках показана форма превышений амплитуд поверхности моря по отношению к входным воротам порта, на нижних — плоские поверхности равных фаз

Для улучшения волнового режима необходимо уничтожить все подводные горизонтальные террасы, чтобы на их месте остались только плавные (клинообразные) наклоны морского дна, не допускающие аккумуляции волновой энергии на акватории порта. Безусловно, полезным было бы восстановление всех внутренних молов, которые, в соответствии с исходным проектом и результатами численного моделирования, способны эффективно стабилизировать уровень моря при поступлении на акваторию порта поверхностных (Герстнеровских) волн со стороны штормового моря.

Сравнение результатов численного моделирования, мареографных и экспедиционных наблюдений

Длинноволновое районирование побережья с борта экспедиционного судна. По задачам изучения особенностей мореходства и безопасности мореплавания в морских акваториях Сахалинской области в экспедиционных условиях вы-

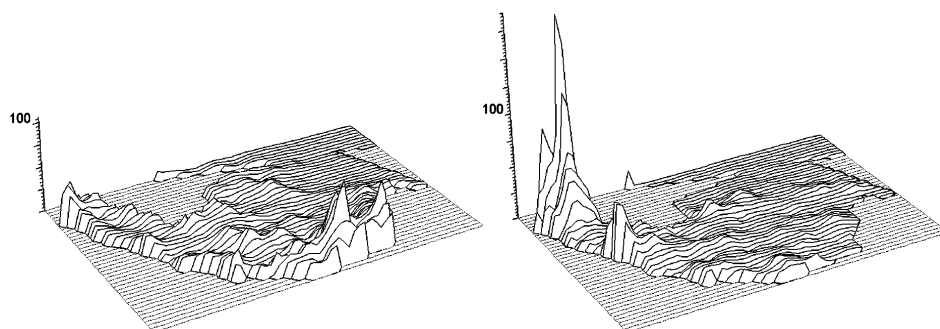


Рис. 8. Характерные распределения передаточных функций для амплитуд волн относительно входных ворот порта с периодами 10,81 с (слева) и 6,86 с (справа). Масштаб у обоих рисунков одинаков

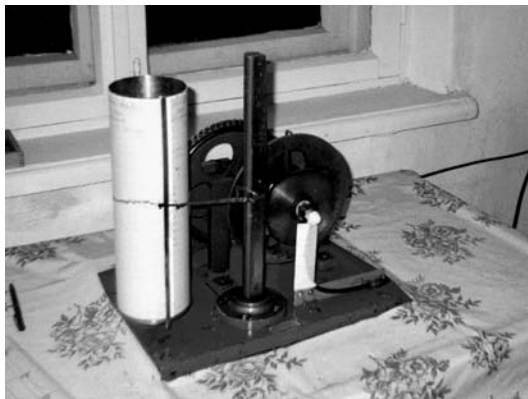


Рис. 10. Потенциометрический датчик, закрепленный на оси Холмского мареографа, выполняет ежесекундное считывание данных об уровне моря, с последующим осреднением их до минутной дискретности. Линия связи активизируется ежечасно, пакет передаваемых данных дополняется осредненными и экстремальными значениями температур воды и воздуха и отправляется по каналам электронной почты в Сахалинский региональный центр цунами

Результаты таких наблюдений за пульсациями скорости поверхностных течений приведены на рис. 9.

На протяжении всего перехода вдоль побережья Сахалина стояла спокойная погода, условия качки судна не изменялись. С юго-запада со стороны Татарского пролива к побережью Сахалина подходила морская зыбь с амплитудой 0,5—1,0 м и длиной волны от 20 до 40 м, создающая условия для генерации шельфовых волн на прибрежном мелководье.

Экспедиционные наблюдения подтвердили также эффект увеличения амплитуды длинноволновых колебаний уровня моря на небольшом удалении от берега, полученный ранее при численном моделировании длинноволновых процессов в шельфовой зоне о-ва Сахалин.

Контроль длинноволновых процессов в Японском море на Холмском мареографе. В сентябре 1999 г. в Холмском порту на базе стандартного мареографа впервые в России был введен в оперативное использование телеметрический измерительный комплекс наблюдения за уровнем моря, температурами воды и воздуха, который успешно работал чуть более 6 мес (рис. 10). На этот период Холмский морской торговый порт был объявлен сахалинским научно-исследовательским полигоном для изучения опасных морских явлений и полевых испытаний новых телеметрических систем оперативного контроля состояния морских акваторий.

Позже, в 2001 г., были проведены наблюдения за динамикой морских вод на шельфе и на подходах к Холмскому порту. Совместный анализ результатов вычислительных экспериментов и натурных наблюдений позволил сделать любопытные выводы о проектировании геометрии морских портов и об использовании их акватории для оперативных прогнозов опасных морских наводнений на близлежащих и удаленных участках сахалинского побережья.

Так как у побережья Холмского порта есть быстрый спад глубин в сторону вершины глубоководного желоба, то его можно считать хорошо защищенным от неожиданных ударов длинных волн типа цунами. Подъемы уровня воды, наблюдавшиеся в порту в штормовую погоду, вполне соответствовали по длительности времени прохождения циклонов и также не выявили опасных гидродинамических процессов на акватории порта.

Довольно интенсивная волна с периодом около 5 мин, выявленная в результате вычислительных экспериментов (рис. 3) только в районе Холмского порта и присутствующая в наблюдениях с борта экспедиционного судна (рис. 9), ни разу не наблюдалась в записях Холмского мареографа (рис. 11), что также подтверждает защищенность порта от внешних воздействий с периодами волн менее 7—8 мин.

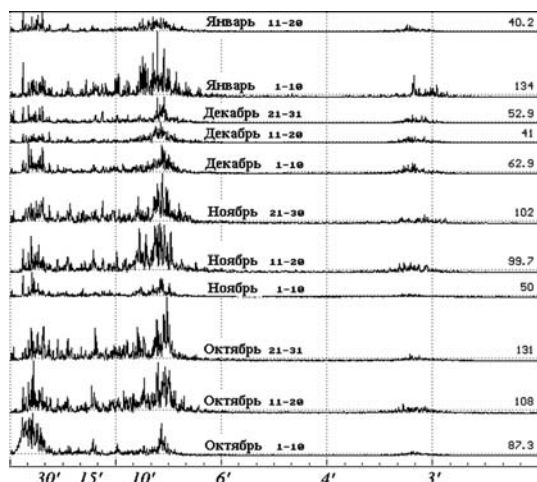


Рис. 11. Спектральные оценки колебаний уровня моря, регистрируемых Холмским мареографом. На нижней шкале отмечены периоды длинных волн, на вертикальной шкале справа приведен максимум спектральной оценки длинноволновой энергии за десятидневный период наблюдений за уровнем моря

Это несколько ограничивает использование мареографа в качестве поста для оперативного контроля состояния Японского моря в целом. Однако Холмский мареограф способен эффективно отслеживать спектральные портреты длинноволновых процессов с периодами 8 мин и более, проявляющихся у различных участков япономорского побережья.

Основные теоретические предложения и прикладные задачи в целом хорошо согласовались с выводами совместного анализа результатов прямых вычислительных экспериментов, высокоточных наблюдений на Холмском мареографе и оценочными наблюдениями за волновым режимом с борта НИС «Павел Гордиенко». Использование сети аналогичных мареографов, непрерывно поставляющих информацию о состоянии моря в единый аналитический центр, могло бы позволить существенно повысить эффективность морских служб Сахалинской области, отвечающих за оперативный прогноз опасных морских явлений и безопасность человеческой жизни на море.

Авторы искренне благодарны директору Холмского морского торгового порта В.П.Боровику и ныне мэру Холмска А.П.Густо за всемерную помощь и поддержку при проведении большого цикла морских исследований в порту и на морском побережье Холмска.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волны в пограничных областях океана / Ефимов В.В., Куликов Е.А., Рабинович А.Б., Файн И.В. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 280 с.
2. Егоров Н.И. Физическая океанография. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 456 с.
3. Поплавский А.А., Храмушин В.Н., Непоп К.И., Королев Ю.П. Оперативный прогноз наводнений на морских берегах Дальнего Востока России. Южно-Сахалинск: ДВО РАН, 1997. 272 с.
4. Храмушин В.Н. О постановке вычислительного эксперимента в гидромеханике. Реализация задачи о распространении длинных волн. Препр. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО АН СССР, 1988. 41 с.