

УДК 551.46

Исследование опасных морских явлений в прибрежной зоне по результатам натурных наблюдений

© Д.П. Ковалев*, П.Д. Ковалев, К.В. Кириллов

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

*E-mail: d.kovalev@imgg.ru

Представлен обзор результатов многолетних наблюдений за гидро- и метеорологическими параметрами моря и прибрежной акватории, проводимых ИМГиГ ДВО РАН. Одним из главных аспектов исследования изменчивости волнового поля является экспериментальное изучение опасных морских явлений в прибрежной зоне моря, которые могут представлять серьезную опасность для прибрежных инженерных сооружений и населенных пунктов. В ИМГиГ ДВО РАН проводится полный цикл исследований волнового режима от создания приборов для измерений и программных комплексов до непосредственного анализа полученных натурных данных.

Ключевые слова: опасные морские явления, тягун, сейши, инфрагравитационные волны.

The investigation of dangerous marine phenomena in the coastal zone based on the field observations results

D.P. Kovalev*, P.D. Kovalev, K.V. Kirillov

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

*E-mail: d.kovalev@imgg.ru

A review of the results obtained based on long-term observations of hydro- and meteorological parameters, carried out for many years IMG G FEB RAS. One of the main objectives of the research field of the wave variability in the coastal zone is the experimental study of marine hazards in the coastal zone, which may represent a serious threat to the coastal settlements. IMG G FEB RAS holds the full cycle investigations of wave parameters at the coastal area till the creation of instruments to the measurement and software systems for the analysis of the results to the direct analysis of the field data.

Keywords: marine hazards, tyagun, seiche, infragravity waves.

Введение

Интерес к изучению волновых процессов в прибрежной зоне морей, и в особенности дальневосточных, подверженных частым и сильными штормам, обусловлен в первую очередь практическими задачами – развитием нефтегазового комплекса в зоне шельфа, которое требует детального исследования динамических процессов у берегов в местах предполагаемой постановки буровых платформ и добывающего оборудования, прокладки трубопроводов, а также размывом берегов и, в связи с этим, угрозой поселкам, авто- и железным дорогам, расположенным вблизи берега.

Изучение динамических процессов у берегов необходимо и для традиционных видов

морской деятельности человека – морского транспорта и рыбного промысла, для обеспечения безопасности существующих прибрежных промышленных объектов; в еще большей степени это относится к вопросу развития транспортной инфраструктуры – оптимальному, в смысле меньшего риска воздействия морских волн, размещению новых сооружений. Функционирование портов островной Сахалинской области, в особенности обеспечивающих работу паромной железнодорожной переправы, для которой важна точная стыковка рельс, в значительной мере должно опираться на исследование резонансных колебаний и опасных явлений в заливах и портовых бух-

тах. И при проектировании соответствующих объектов необходимо знать характеристики волнения и опасных морских явлений.

Серьезную опасность представляют ветровые волны и зыбь, трансформирующиеся в узкой прибрежной полосе и способствующие возникновению инфрагравитационных (ИГ) волн и разрывных течений, с которыми связаны перемещения донных осадков, изменения донного рельефа и другие литодинамические процессы, имеющие особое значение для мест прокладки подводных трубопроводов, их выходов на берег и установки добывающих платформ на шельфе. Изучение этих процессов является достаточно сложной проблемой.

Сейши (стоячие волны, возникающие в замкнутых или частично замкнутых водоемах в результате резонансных явлений) играют важную роль в динамике заливов или бухт и оказывают значительное влияние на условия работы расположенных на их побережье портов и других промышленных объектов. Для побережья Курильских островов и в несколько меньшей степени для Сахалина эти собственные колебания ассоциируются прежде всего с проблемой цунами – для большинства бухт их резонансные периоды близки к характерным периодам проявления волн цунами (от нескольких минут до нескольких часов), вследствие чего цунами проявляется в них главным образом как резкое усиление сейш (подробный обзор приведен в [Рабинович, 1993]). Так, во время цунами 23.02.1980 г. волны внутри Малокурильской бухты усилились почти в пять раз по сравнению с внешним шельфом и имели практически тот же период, что и период основного спектрального максимума колебаний уровня для этой бухты [Рабинович, 1993].

Другое опасное морское явление, вызывающее возвратно-поступательные движения воды и приводящее к подвижке и повреждению судов, обрыву якорей и швартовых, разрушению причалов [Ветер... , 1986; Лабзовский, 1971; Рабинович, 1993; Райхлен, 1970] даже в хорошо защищенных портах, получило название тягуна.

Установлено, что тягуну практически всегда сопутствует штормовое волнение или сильная зыбь на подходе к гавани [Ветер... , 1986; Лабзовский, 1971; Рабинович, 1993; Darbyshire, 1963]. Измерения колебаний уровня моря в гаванях [Рабинович, 1993] показали, что характерные периоды тягуна – 0.5–4 мин, хотя в отдельных случаях наблюдались периоды даже до 20 мин.

Явление тягуна вызывают короткопериодные инфрагравитационные волны, формирующиеся в результате трансформации ветрового волнения, когда характерные периоды огибающих волновых пакетов совпадают или близки к собственным периодам акватории порта [Рабинович, 1993]. К тому же резонансное возбуждение интенсивных ИГ-волн во внешней акватории (на прилегающем участке шельфа) или совпадение одного из собственных периодов внешней и внутренней акваторий способствует усилению характерных для тягуна волновых движений в порту.

Крупномасштабные повышения уровня моря, обусловленные действием ветра и падением приземного атмосферного давления при прохождении над акваторией моря глубоких циклонов или тайфунов, – штормовые нагоны – сами по себе вызывают затопление прибрежных участков, а на фоне повышения уровня моря резко усиливается действие штормового волнения. Нагоны представляют серьезную опасность для южного и юго-западного побережья о-ва Сахалин. Недостаточный учет возможных нагонных волн привел, например, к тому, что мощные волнозащитные приспособления и специальное бетонное берегоукрепление из тетраэдров, защищающее железнодорожную станцию Холмск-сортировочная, после воздействия двух штормовых нагонов в течение 1990 г. (в апреле и в ноябре) на некоторых участках были разрушены, и железнодорожное полотно получило повреждения.

Существуют и другие типы опасных морских явлений, проявление которых зависит от конкретного рельефа побережья и метеословий. Поэтому необходимы детальные исследования волновых процессов в диапазоне

волн опасных морских явлений в прибрежных районах Дальневосточного региона, в частности Сахалинской области, и выявление физических особенностей и механизмов генерации этих процессов, их пространственной и временной изменчивости, влияния на жизнедеятельность человека. Основным средством достижения данной цели является проведение натурных экспериментов.

Традиционный способ измерения колебаний уровня моря при помощи береговых мареографов ориентирован на сравнительно длинноволновые процессы – приливы и сгонно-нагонные вариации, поэтому возможность использования получаемых записей для изучения сейш весьма ограничена. В некоторых случаях для исследования собственных колебаний осуществляется оцифровка мареограмм – этот метод является основным при определении характеристик цунами. Однако при таком подходе неизбежны погрешности, особенно для коротких периодов. В частности, принципиально невозможно исследовать явление тягуна.

Следует отметить, что возможность генерации опасных волн зависит от конкретного рельефа, поэтому нельзя ограничиваться какими-то средними по региону или даже району оценками опасных явлений. Необходима установка измерительных комплексов для наблюдения за состоянием морской поверхности с возможностью визуализации результатов измерений в управлении порта и выдачи информации в МЧС и центры предупреждения об опасных явлениях для непосредственного наблюдения.

Наиболее эффективным способом изучения морских опасных явлений и оценки их режимно-статистических характеристик, необходимых для безопасного проектирования промышленных объектов на побережье и портовых гидротехнических сооружений, являются экспериментальные измерения волновых процессов непосредственно в районе планируемого строительства.

Измерения вблизи берега, особенно в районах, где сравнительно часто возникают штормовые ситуации, представляют боль-

шую сложность. Одним из средств для регистрации волновых процессов на небольшом удалении от берега служат кабельные донные станции, снабженные датчиками гидростатического давления. Как показали наши наблюдения на п-ове Камчатка [Kovalev et al., 1991], подобные системы могут сохраняться в течение достаточно продолжительного времени, причем давление на дне в наибольшей степени характеризует нагрузки на подводные трубопроводы. В то же время автономные приборы позволяют провести более детальный эксперимент и устанавливать регистраторы волнения в местах, где невозможна постановка кабельных приборов. Поэтому без автономных приборов зачастую нельзя обойтись при проведении натурных наблюдений.

Приборное обеспечение

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ) проводит мониторинг волнения в прибрежной зоне дальневосточных морей в районах, подверженных размыву берегов, с использованием разработанных кабельных комплексов и автономных регистраторов волнения (АРВ). Анализ зарубежных, отечественных и ранее разработанных в ИМГиГ приборных комплексов, предназначенных для регистрации волновых процессов в прибрежной зоне, показал, что, в зависимости от условий и целей натурного эксперимента, рельефа побережья и вида прибрежных наносов в зоне перехода суша–море, в настоящее время оправдано использование обоих типов приборов, как кабельных, так и АРВ [Ковалев, Ковалев, 2010].

Кабельные комплексы на базе персонального компьютера с использованием серийно выпускаемых модулей предпочтительны при проведении длительных регистраций. Они позволяют оперативно обрабатывать получаемую информацию; в случае обрыва донного датчика или кабельной линии не происходит потери ранее полученных данных. Однако их установка на больших расстояниях от берега достаточно дорогостоящая, а в местах побережья со скальным или гравийным покрытием

ем, хоть и с прокладкой траншеи, приводит к быстрому обрыву кабельной линии связи даже из бронированного кабеля. Тем не менее при установке кабельного комплекса в портовых бухтах возможно реализовать все его достоинства.

Разработанный в ИМГиГ приборный комплекс с использованием донных кабельных пьезорезонансных датчиков гидростатического давления (рис. 1) [Ковалев, Дущенко, 2003] позволяет синхронно регистрировать флуктуации уровня моря в нескольких точках прибрежной зоны на удалении от берега до 5 км и передавать информацию по одножильному грузонесущему кабелю, а также записывать параметры ветра и температуру воздуха, что необходимо при изучении воздействия атмосферных возмущений на состояние моря. Для этого к комплексу подключается серийно выпускаемая метеостанция типа WS 2300 или микробарограф ООО СКТБ «ЭЛПА» (г. Углич).

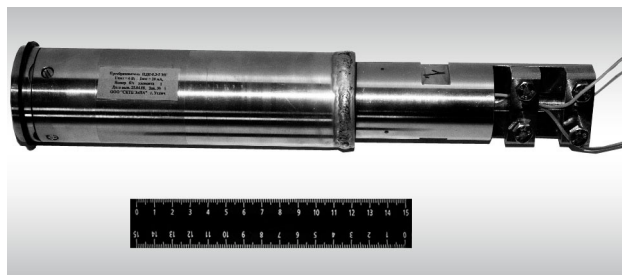


Рис. 1. Кабельный пьезорезонансный датчик гидростатического давления.

Однако практика, в том числе и наших экспериментальных наблюдений, показала, что далеко не во всех случаях можно обойтись кабельными приборами. Притом что они позволяют оперативно в реальном времени получать информацию о колебаниях уровня моря, зачастую возникают проблемы с прокладкой кабеля и его работоспособностью, особенно в прибойной зоне. Поэтому наряду с кабельными комплексами для регистрации волнения широко применяются и автономные приборы.

В автономных измерителях волнения (рис. 2) преобразователь физической величины в электрическую, накопитель данных и источник питания располагаются в одном

герметичном или нескольких прочных корпусах, связанных между собой жесткой рамой или тросом. Такие приборы могут устанавливаться как с использованием буйковых станций, так и самостоятельно с плавучестью и устройством отделения балласта, т.е. в виде самовсплывающей капсулы [Ковалев, Ковалев, 2010].

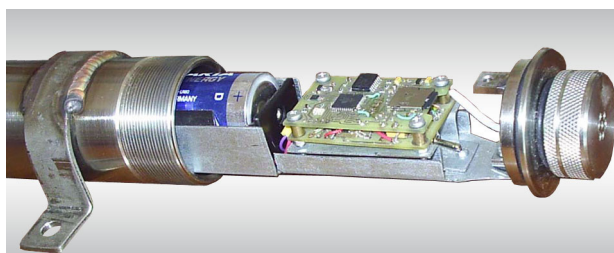


Рис. 2. Автономный регистратор волнения (рабочий макет).

С использованием автономных регистраторов волнения круглогодично поддерживается сеть исследовательского мониторинга опасных морских явлений в западной части Тихого океана в районе о-ва Сахалин и Курильских островов. При обеспечении проведения экспериментов судном производится регулярный – дважды в год – подъем донных датчиков для считывания информации. На сети автономных станций ИМГиГ (Южные Курилы и о-в Сахалин) получены записи близких цунами (Симушир, 15.01.2009; Невельск, 2.08.2007) и нескольких удаленных землетрясений (Самоа, 29.09.2009; Вануату, 07.10.2009; Чилийское, 27.02.2010).

Для работы с натурными данными по флуктуациям уровня моря и течений в ИМГиГ разработан программный комплекс [Плеханов, Ковалев, 2016]. Комплекс позволяет обрабатывать большие массивы синхронных и разнесенных во времени данных, рассчитывать спектральные и взаимоспектральные характеристики, в том числе текущие, и сохранять их в виде проектов, в которых впоследствии можно продолжать обработку материалов измерений. Комплекс позволяет обрабатывать и отображать большие (свыше 15 млн точек) массивы данных. Для улучшения качества и повышения скорости расчетов был создан новый алгоритм расчета текущего спектра на

основе оконного преобразования Фурье, позволяющий объединять периоды от нескольких секунд до нескольких суток в одном изображении за счет переменной длины окна. Кроме того, была разработана оптимизация техники последовательных фильтров с помощью последовательного понижения дискретности обрабатываемых данных без потери качества, в результате чего также возможно объединение различных периодов в одном изображении.

Данная программа упрощает множество операций по подготовке и обработке данных по сравнению с использованием готовых математических пакетов и на сегодняшний момент является единственной узкоспециализированной программой обработки временных рядов океанологических данных. Программа активно используется в лаборатории волновой динамики и прибрежных течений и лаборатории цунами ИМГиГ ДВО РАН.

Изучение условий формирования инфрагравитационных волн в прибрежной зоне

Инфрагравитационные длинные волны, возникающие в результате нелинейного взаимодействия ветровых волн или зыби, порождают в прибрежной зоне разнообразные явления, такие как волновой нагон, разрывные течения, прибойные биения. Важную роль они играют в формировании береговых и прибрежных особенностей рельефа – береговых фестонов, кос, серповидных баров и др. [Рабинович, 1993].

Под прибрежной зоной обычно понимается область, начинающаяся от уреза воды и до глубины несколько десятков метров, в которой ярко проявляются указанные эффекты. Именно этим волновым движениям в диапазоне периодов от нескольких десятков секунд до 10–12 мин, с одной стороны, присущи все основные свойства длинных волн, с другой – они самым тесным образом связаны с ветровыми волнами и зыбью.

Данные специальных экспериментов, проведенных еще в 1980-х годах в различ-

ных районах Мирового океана [Gerritsen, Van Heteren, 1984; Huntley, Kim, 1984; Middleton et al., 1987], показали, что общая энергия прибойных биений складывается из двух примерно равноценных компонент: 1) вынужденной, обусловленной непосредственным воздействием на уровень радиационного напряжения в данном районе; 2) свободной, образованной суперпозицией дискретных мод краевых волн и непрерывного спектра излученных волн. В свою очередь, свободные ИГ-волны приходят в район наблюдения извне, а также образуются при разрушении и стохастизации вынужденных волн в прибойной зоне [Рабинович, 1993].

Для исследования особенностей волновых процессов вблизи берега на стационаре ИМГиГ «Остромысовка» был проведен специальный эксперимент с постановкой пары измерителей придонного гидростатического давления на различных расстояниях от берега. Главной целью измерений было изучение формирования ИГ-волн в зависимости от параметров ветрового волнения и зыби. В ходе проведенных многолетних наблюдений было установлено возрастание в штормовых условиях уровня энергии колебаний в широком диапазоне периодов, что характерно для эффективного образования инфрагравитационных волн.

При анализе фазовых спектров, помимо очевидного факта распространения волн от области больших глубин к берегу, хорошо заметно изменение фазовой скорости с частотой (дисперсии поверхностных волн): для диапазона периодов зыби (около 10 с) ее значение составляет 6.6 м/с, для ветровых волн (около 3 с) – 4.1 м/с [Ковалев и др. 2000].

Кроме того, в фазовых спектрах на периоде около 50 с находится интервал с нулевым фазовым сдвигом (рис. 3). В энергетическом спектре колебаний уровня на этих периодах наблюдается пик, величина которого превышает 95%-й доверительный интервал и лишь на два порядка меньше основного энергонесущего пика в этом диапазоне, соответствующего колебаниям зыби. Все это указывает на генерацию краевых волн, распространяющихся вдоль берега.

В записях волнения на различных расстояниях от берега наблюдается хорошо выраженная групповая структура. Оценки огибающих волновых процессов также позволили выделить колебания с периодами 50 с для мыса Острый (о-в Сахалин), что указывает на генерацию свободных краевых волн групповой структурой волнения. Показано, что пики энергетических спектров огибающей пакетов волн на периодах около 200 с и 79 с, которые соответствуют вынужденным инфрагравитационным волнам, образующимся в результате нелинейной трансформации волн зыби, имеют ту же фазовую скорость и направление распространения в сторону берега, что согласуется с теорией Лонге-Хиггинса–Стюарта.

Согласно теории Лонге-Хиггинса–Стюарта, вынужденные (связанные) ИГ-волны вместе с группами ветровых волн – зыби движутся со стороны открытого океана в сторону берега. При обрушении ветровых волн в зоне прибоя происходит «освобождение» энергии вынужденных волн, и они, отражаясь частично от берега, а частично непосредственно от линии прибоя, излучаются в открытый океан как свободные (излученные) волны. Один из возможных механизмов перехода энергии обрушившихся волн в ИГ-волны описан в работе [Dally, Dean, 1986].

Представляет интерес роль пограничных волн в формировании прибрежных движений и их связь с прибойными явлениями. Этому направлению исследований были посвящены работы А. Боуэна и Д. Инмана [Bowen, Inman, 1969], а также Галлахера [Gallagher, 1971]. Развивая теорию Лонге-Хиггинса–Стюарта, Галлахер показал, что при определенных углах подхода ветровых волн к берегу в результате нелинейного взаимодействия этих волн образуются свободные краевые волны, амплитуды которых могут достигать значительных величин.

Выполненные в ИМГиГ исследования позволили выявить достаточно сложный характер структуры инфрагравитационных волн. Преобладание той или иной составляющей зависит от многих факторов, в частности от расстояния от берега (при приближении к берегу возрастает относи-

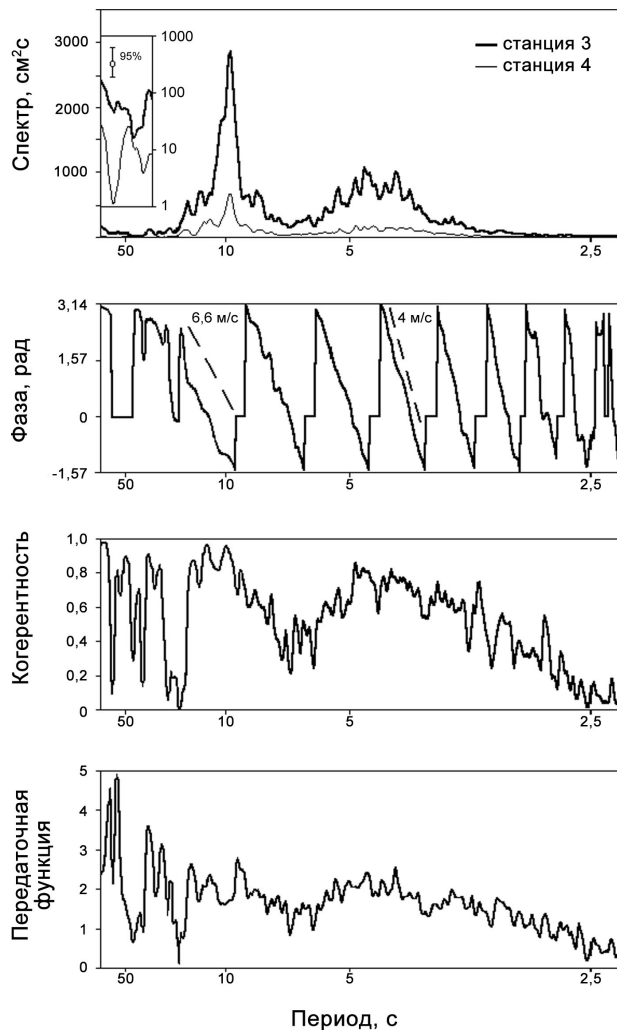


Рис. 3. Спектры, когерентность, разность фаз и передаточная функция колебаний уровня на ближней и дальней от берега станциях.

тельная роль краевых волн, при удалении — излученных и вынужденных). Однако два фактора являются основными: 1) характеристики внешних сил, генерирующих ИГ-волны, 2) орографические особенности района, и прежде всего прибрежной зоны. Так, выполнение резонансных условий (что бывает сравнительно редко) приводит к генерации краевых ИГ-волн большой амплитуды, которые могут существовать достаточно долго. Усиление штормовой активности обычно увеличивает относительную роль излученных и вынужденных ИГ-волн.

Исследования явления тягуна

Основным критерием надежности стоянки судна в порту является степень защищен-

ности акватории порта от морских волн – обязательная составная часть общих условий обеспечения навигационной безопасности. Как указывает С. Погосов [Погосов, 1971], с этих позиций все порты можно разделить на четыре группы: полностью защищенные (это отдельные бассейны типа грузовых доков); хорошо защищенные (порты типа Туапсе, Гавр, Дакар, Кейптаун и др., акватории которых защищены от прямого воздействия волн любого направления); недостаточно защищенные (Корсаков, Фритаун и др., открытые волнению с некоторых направлений); незащищенные (Гагра, Могадишо, Углегорск и др., волнение на акватории которых идентично волнению прилегающих участков моря).

Тягун может проявляться в любое время года, но чаще всего в тот сезон, когда активность синоптических процессов максимальна. Установлено, что тягуну практически всегда сопутствует штормовое волнение или сильная зыбь на подходе к гавани [Ветер... , 1986; Лабзовский, 1971; Рабинович, 1993; Darbyshire, 1963].

Актуальность исследований явления тягуна в портах и бухтах островного края не вызывает сомнений. Тягун серьезно осложняет работу крупнейших торговых портов Сахалина – Корсакова и Холмска, а также небольших и менее значимых, но активно используемых, таких, например, как Углегорск, Южно-Курильск. Согласно результатам экспериментальных исследований волновых процессов в порту г. Корсаков [Ковалев и др., 2001], при прохождении над южной частью о-ва Сахалин атмосферных возмущений в нем наблюдается сильно выраженное явление тягуна.

Порт Холмска является одним из основных в Сахалинской области, через него осуществляется работа железнодорожной паромной переправы, связывающей остров с материком. Для разгрузки вагонов с паромна нужна устойчивая стыковка рельсов на берегу и на судне. Поскольку это условие может нарушаться даже при слабом тягуне, изучение этого опасного явления в Холмской бухте очень актуально [Ковалев, 2012а, 2012б].

Акватория Холмской бухты имеет относительно широкую основную часть и узкую куттовую, в которой располагаются портовые сооружения. Вход в бухту закрыт волнозащитными сооружениями с достаточно узким проходом. Глубина у входа в бухту около 10 м, и от него к кутовой части проходит фарватер, с уменьшением глубины до 8–9 м на основной части акватории и до 6–7 м в удаленной.

Подобная картина типична для всех портов западного побережья о-ва Сахалин, в которых проводилась регистрация волнения, разница лишь в значениях выделенных характерных периодов. Период нулевой моды меняется от 70 до 115 с для различных портов. Эти колебания напрямую связаны с явлением тягуна – периодическими движениями воды в портах, бухтах и гаванях, вызывающими циклические перемещения стоящих у причалов судов. Это существенно затрудняет эксплуатацию их в портах, особенно в процессе погрузки/разгрузки.

В ходе многолетних наблюдений проанализированы особенности волнового режима на акваториях основных портов Сахалинской области – Холмска, Корсакова, Углегорска и Южно-Курильска. Показано, что ковши и портовые бухты, за исключением Южно-Курильска, хорошо защищены от ветрового волнения. При этом значимая высота волн внутри порта на порядок меньше по сравнению с внешней акваторией [Ковалев, 2012б].

Анализ данных наблюдений за колебаниями уровня при спокойной погоде и сильном волнении в портовых бухтах показал значительное увеличение энергии колебаний уровня – более чем на порядок – в диапазоне существования явления тягуна, в частности на периодах 3 и 1.5 мин для Холмской бухты (рис. 4), 1.5 и 3 мин для порта Корсаков (рис. 5А) и 1.9, 1, 0.5 и 0.25 мин для Углегорска (рис. 5Б). Интенсивность колебаний с указанными периодами значимо возрастает в штормовую погоду, что, вследствие наличия явной связи с волнением на море, указывает на их инфрагравитационную природу. Очевидно, эти пики отвечают собственным колебаниям бухт и говорят о существовании явления тягуна в данных портах.

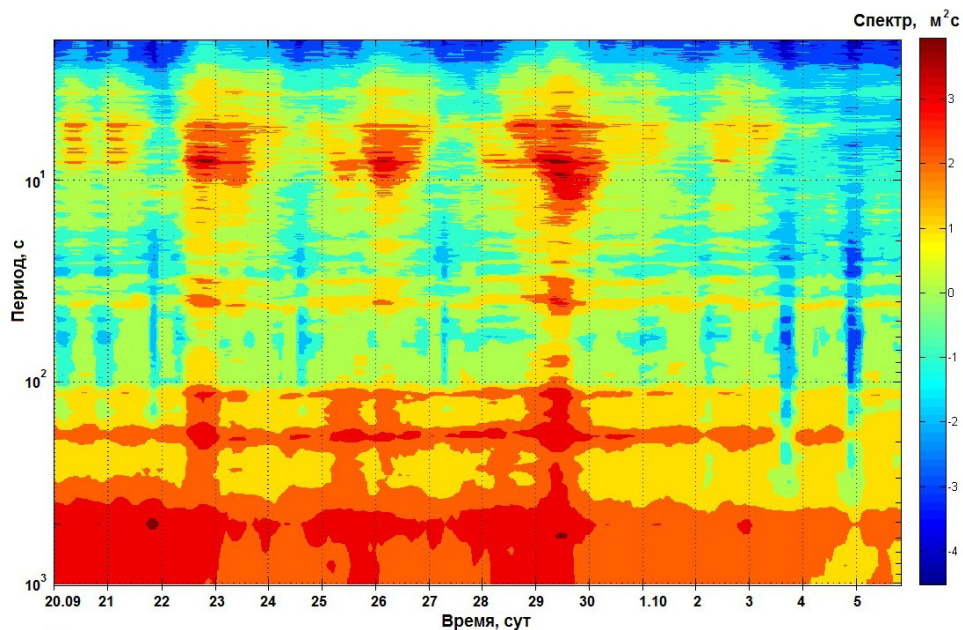


Рис. 4. Диаграмма текущего спектра по данным измерения АРВ, установленного в кутовой части бухты порта Холмск.

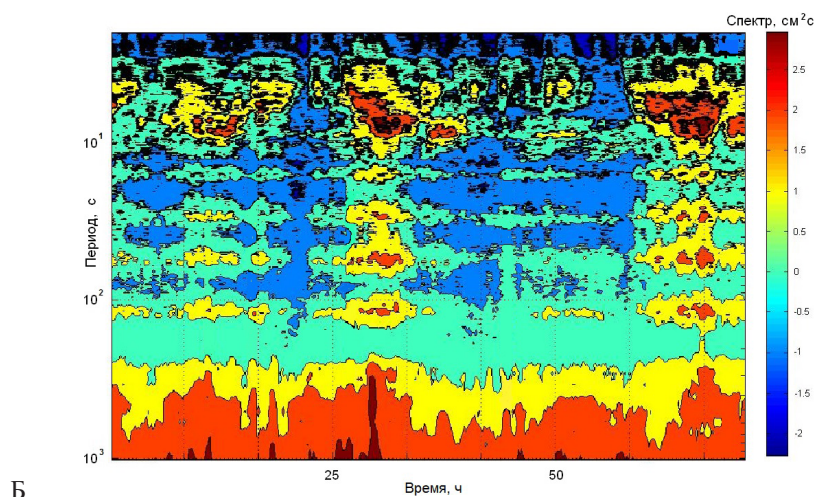
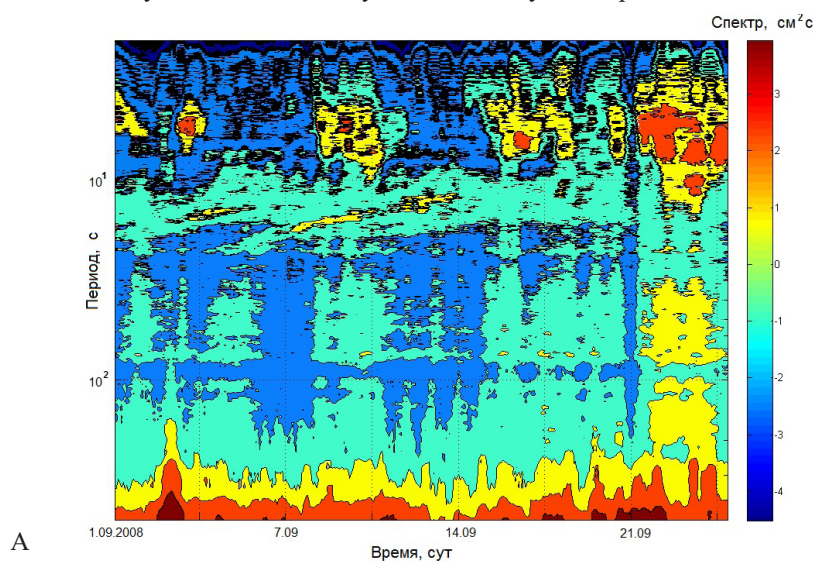


Рис. 5. Диаграмма текущего спектра волнения в портах Корсакова (А) и Углегорска (Б).

Результаты рассчитанных параметров тягуна для Холмского, Углегорского и Корсаковского портов хорошо согласуются с данными натурных наблюдений [Ковалев, 2012б]. Анализ результатов натурных экспериментов позволяет сделать вывод о том, что наибольшую опасность для находящихся в портах судов может представлять явление тягуна, связанное с одно- и двухузловыми продольными и поперечными сейшами гаваней, которые проявляются, как правило, при увеличении интенсивности волнения на внешней акватории (рисунки 4, 5). На побережье о-ва Сахалин явление тягуна обычно отмечается в осенний период во время прохождения циклонов. Его повторяемость по годам крайне неравномерна: в одни годы тягун почти не возникает, в другие – наблюдается очень часто.

Полученные при изучении явления тягуна результаты могут быть использованы при проектировании новых сооружений вблизи восточного побережья Сахалина, в частности при изучении волновых нагрузок и литодинамических процессов в местах выхода на берег трубопроводов, предназначенных для транспортировки нефти и газа от морских месторождений до перерабатывающих предприятий.

Исследование сгонно-нагонных явлений

Крупномасштабные повышения и понижения уровня моря, обусловленные воздействием касательного напряжения ветра и градиента приземного атмосферного давления при прохождении над акваторией моря глубоких циклонов или тайфунов, – штормовые нагоны и ветровые сгоны вместе с сопровождающим их сильным волнением представляют серьезную опасность для побережья о-ва Сахалин и Курильских островов. Такие явления достаточно часто наблюдаются над о-вом Сахалин (около 30 атмосферных возмущений с давлением в центре менее 1000 мбар за год, они влияют на погодные условия над островом [Климат... ,

1982]), в большей степени в весенний и осенний периоды и в меньшей – в зимний и особенно летний. Высокая циклоническая активность в данном районе обусловлена его положением в пограничной зоне между материковыми и океанскими воздушными массами, в области разделения которых наиболее часто образуются и распространяются атмосферные возмущения. Образованию штормовых нагонов у берегов Сахалина также способствует наличие обширных прибрежных мелководных зон.

Штормовые нагоны сами по себе вызывают затопление прибрежных участков, и на фоне повышения уровня моря резко усиливается действие штормового волнения. Больше всего от штормовых нагонов страдают торговые и рыболовные порты, а также железнодорожный и автомобильный транспорт, поскольку на побережье Татарского пролива и зал. Терпения протяженные участки автомобильных и железных дорог проложены в опасной близости от моря. Участки этих дорог затапливаются и размываются, а береговые укрепительные сооружения разрушаются.

В работе [Като и др., 2003] рассмотрены сгонно-нагонные колебания уровня моря на юго-восточном побережье о-ва Сахалин для циклонов, проходящих через юг острова. Такие циклоны вызывают значимый сгон только в вершине зал. Терпения, в районе г. Поронайск, т.е. существенно севернее пос. Взморье (юго-восточное побережье острова), где проводилась регистрация волнения. Однако при анализе записей колебаний уровня, выполненных в ходе экспедиционных работ ИМГиГ осенью 2010 г. в районе пос. Взморье, был визуально обнаружен значительный сгон – около 60 см (рис. 6). Обнаруженное явление представляет интерес еще и потому, что, как показал анализ сгонов восточного побережья Сахалина, его можно отнести к сгонам редкой повторяемости с периодом один раз в 100 лет [Ковалев, 2013].

После обнаружения отмеченного сгона в районе пос. Взморье были проверены данные по изменению уровня моря с противо-

положной – юго-западной стороны о-ва Сахалин, в районе г. Холмск, чтобы проверить предположение о возможном нагоне в этой части острова. Результаты анализа подтвердили предположение [Ковалев, 2013].

Для оценки параметров длинных волн при сгоне были рассчитаны СВАН-диаграммы колебаний уровня для времени существования сгона в диапазоне периодов от 2 до 120 ч (рис. 7) [Ковалев, 2013]. Видно, что во время существования сгона наблюдается возрастание энергии в достаточно широком диапазоне периодов от 14 до 120 ч с максимумом около 55 ч. При затухании сгонной волны происходит раздвоение максимума и образуются пики с периодами около 80 и 50 ч, что подтвердил и расчет энергетических спектров колебаний уровня моря.

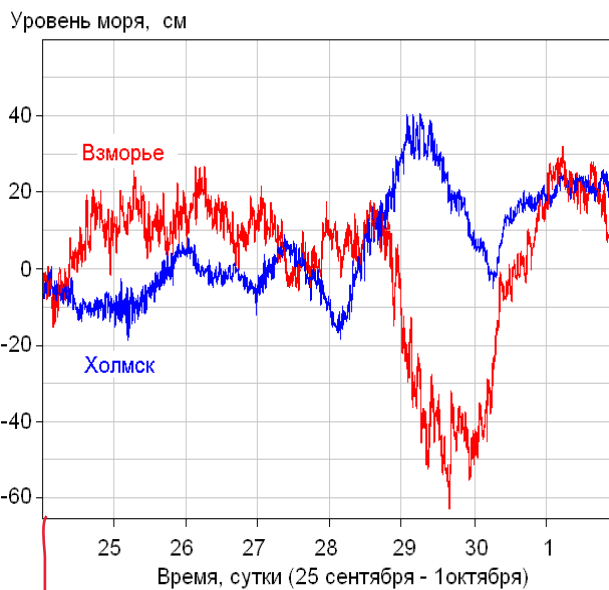


Рис. 6. Временной ход колебаний уровня моря на станциях Холмск и Взморье (2010 г.).

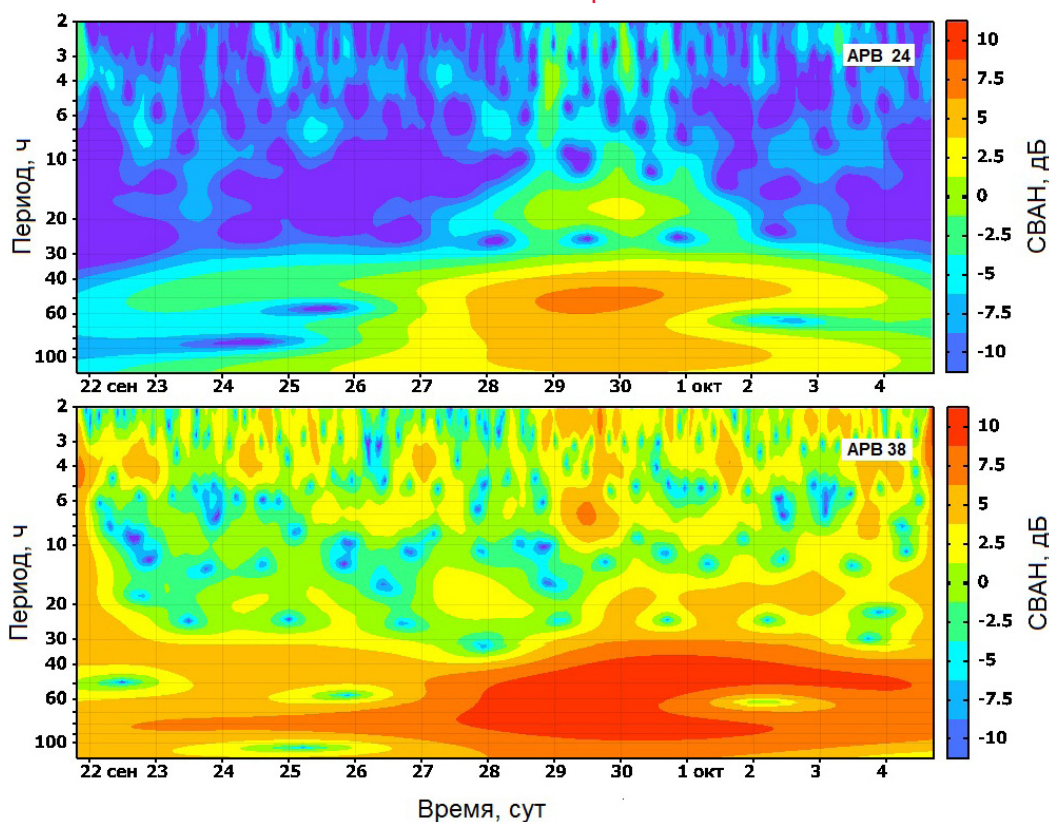


Рис. 7. СВАН-диаграммы колебаний уровня для времени существования сгона в диапазоне периодов от 2 до 120 ч для АРВ станций № 24 и № 38.

Полученные во время сгона данные по волнению моря [Ковалев, 2013] с целью обнаружения аномальных колебаний были подвергнуты спектральному и спектрально-временному анализу. На рис. 8 представлен текущий спектр для станции № 38 за период

с 23 сентября по 2 октября 2010 г. Видно, что при подходе циклона резко возрастает энергия ветрового волнения и зыби в диапазоне периодов от 5 до 15 с с максимумом во второй половине суток 28 сентября.

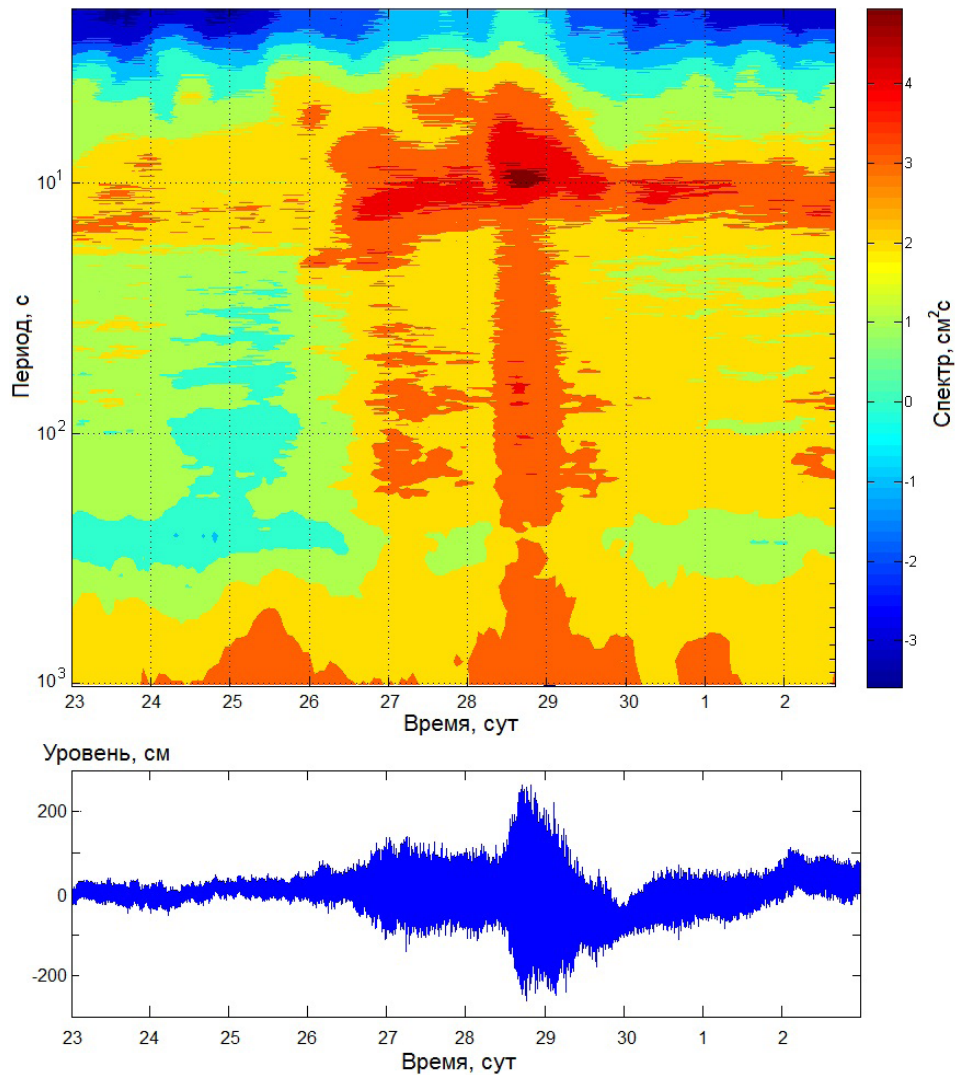


Рис. 8. Текущий спектр и временной ход колебаний уровня моря с секундной дискретностью и вычтенным приливом для станции № 38 (2010 г.).

После выхода циклона в северную часть Охотского моря наблюдается только зыбь с периодами примерно от 8 до 12 с. Отмечается также, что при сгоне вплоть до его окончания существенно уменьшаются амплитуды волнения, после чего замечен даже некоторый подъем. Это связано, по-видимому, с тем обстоятельством, что встречный ветер гасит ветровые волны и зыбь, распространяющиеся ему навстречу.

В начале шторма и при максимальном ветровом волнении и зыби 28 сентября наблюдалось эффективное формирование инфрагравитационных волн в диапазоне периодов от 20 до 250 с. При сужении диапазона волн зыби до 9–11 с, т.е. при переходе к установившемуся режиму волнения, уменьшался

уровень энергии в диапазоне существования ИГ-волн, что позволяет сделать вывод об эффективной генерации этих волн в условиях наличия широкого спектра ветровых волн и зыби с большой энергией.

Для более детального анализа высокочастотной части спектра волнения были рассчитаны спектры волнения по 6 часовым отрезкам в течение сгона (рис. 9) [Ковалев, 2012a]. Видно, что при тихой погоде наблюдается смешанное волнение – в спектрах отчетливо выделяются пики с периодами, соответствующими зыби и ветровому волнению. С приходом шторма энергия колебаний в диапазоне ветровых волн и зыби возрастает на полтора порядка и ветровое волнение иногда преобладает над зыбью.

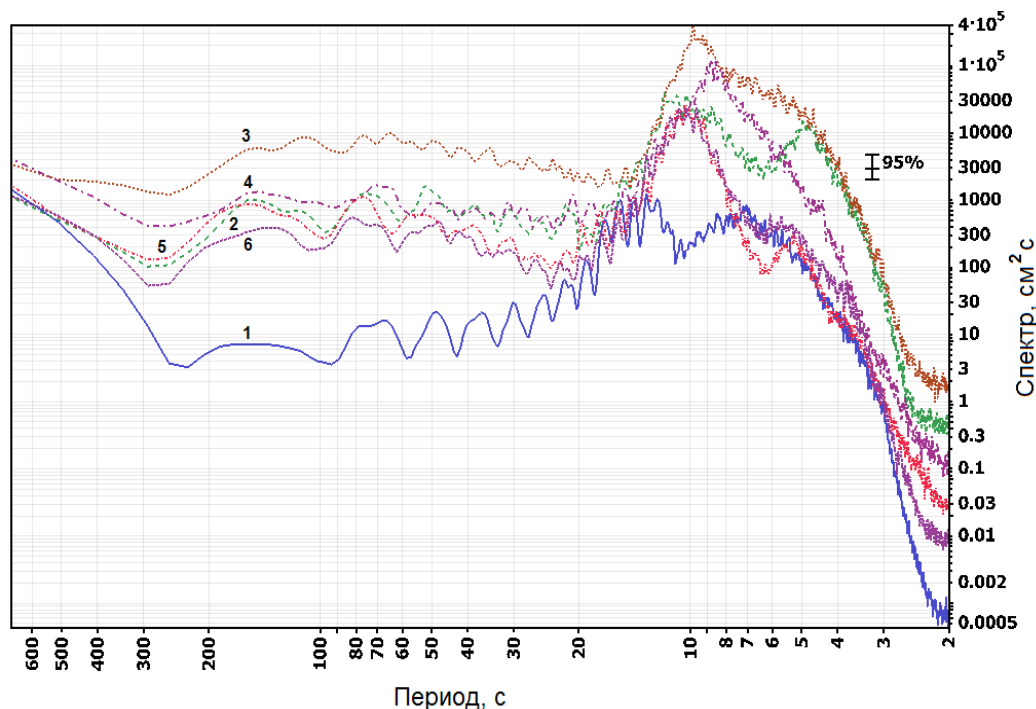


Рис. 9. Энергетические спектры колебаний уровня в течение сгона и при тихой погоде.

1 – 25.09.2010 с 0 до 6 ч (тихая погода), 2 – 28.09. с 0 до 6 ч, 3 – 28.09. с 18 до 24 ч, 4 – 29.09. с 6 до 12 ч, 5 – 29.09. с 18 до 23 ч, 6 – 30.09. с 18 до 24 ч.

При дальнейшем развитии шторма энергия волн зыби существенно возрастает и почти на полтора порядка превышает энергию ветрового волнения. С началом и при развитии сгона энергия волнения постепенно уменьшается с преобладанием волн зыби. К окончанию сгона на фоне волн зыби в спектре начинает проявляться пик, соответствующий ветровому волнению. Такая схема развития спектра ветрового волнения во времени характерна для диссипативной модели генерации ветровых волн, описанной в [Ветер... , 1986].

В диапазоне инфрагравитационных волн с приходом шторма энергия колебаний резко возрастает на 1.5–2 порядка и при максимальном волнении – почти на 3 порядка. Кроме того, расширяется диапазон генерируемых ИГ-волн. При тихой погоде периоды ИГ-волн находятся в диапазоне от 16 до примерно 250 с, а при развитом волнении – 16–300 с, причем низкочастотная граница очень хорошо выражена [Ковалев, 2012а].

Прослеживается еще одна особенность формирования ИГ-волн при различной активности моря. С возрастанием высоты волн при

общем подъеме энергии инфрагравитационных волн уменьшаются пики, соответствующие отдельным модам, т.е. четко выраженная модовая структура начинает нарушаться и при максимальном волнении приближается к «шумовой» в широком диапазоне. С понижением высоты волн модовая структура ИГ-волн опять начинает прослеживаться (энергетические пики на 77 и 150 с), что также хорошо заметно и на текущем спектре (рис. 8). Данный эффект связан, по-видимому, со стохастизацией ветрового волнения и зыби.

Был также проанализирован диапазон более длинных периодов волнения – от 2 мин до 5 ч. Энергетические спектры для него не содержат выраженных пиков и для тихой погоды, первых суток шторма и после окончания сгона почти не различаются энергией в диапазоне периодов от примерно 7 мин и длиннее. Для шторма в начале сгона энергия колебаний в этом же диапазоне выше на 0.5 порядка.

Спектральный анализ ряда, содержащего данные о нагоне в Холмске с 28 сентября по 1 октября 2010 г., который происходил синхронно со сгоном, рассмотренным выше, не показал изменения энергии ИГ-волн для раз-

личных фаз шторма и нагона в зависимости от энергии зыби, трансформированной ИГ-волнами.

Периоды основных пиков ИГ-волн для рассматриваемой ситуации также достаточно стабильны и мало зависят от энергии шторма, по-видимому потому, что определяются резонансными свойствами акватории. Энергия ИГ-волн напрямую связана с энергией волнения, поскольку обязана своим происхождением трансформации ветровых волн и зыби, энергия которых как раз и определяется силой шторма.

Сезонная изменчивость интенсивности штормовых нагонов обусловлена особенностями метеорологических условий над южной частью о-ва Сахалин. В целом среднее число циклонов минимально в июне–июле и максимально в октябре–декабре, а также в апреле, в остальные месяцы наблюдается примерно одинаковое число атмосферных возмущений. Над островом в зимний период преобладают ветра северных направлений, которые характерны для положения центра циклона над акваторией Охотского моря [Климат... , 1982]. Однако эти ветра являются нагонными только для северной части острова (чем и объясняются большие высоты штормовых нагонов в Сахалинском заливе), а для южной части северный ветер нагонным не является. Повторяемость ветров по остальным направлениям примерно одинакова, только для сильных ветров со скоростью больше 20 м/с возрастает доля восточного и юго-восточного направлений, нагонных для заливов Анива и Терпения. В результате исследований, проведенных авторами, было обнаружено, что прохождение циклона над северной частью о-ва Сахалин и снижение скорости его движения при выходе в Охотское море способствуют развитию длительных ветров западного направления, а это, в свою очередь, может быть причиной сильного сгона на юго-восточном и нагона на юго-западном побережье острова.

Анализ продолжительности и силы ветра позволяет прогнозировать дальнейшее развитие волнения на море, а значит, предопределять действия по безопасности мореходства.

В результате проведенных работ были получены пути циклонов, способных сформировать нагонно-сгонный режим в южной части о-ва Сахалин, и показано, что этот режим наблюдается при прохождении циклонов и формируется ветром и воздействием приземного атмосферного давления преимущественно в осенне-зимний период при повышенном циклогенезе (рис. 10).

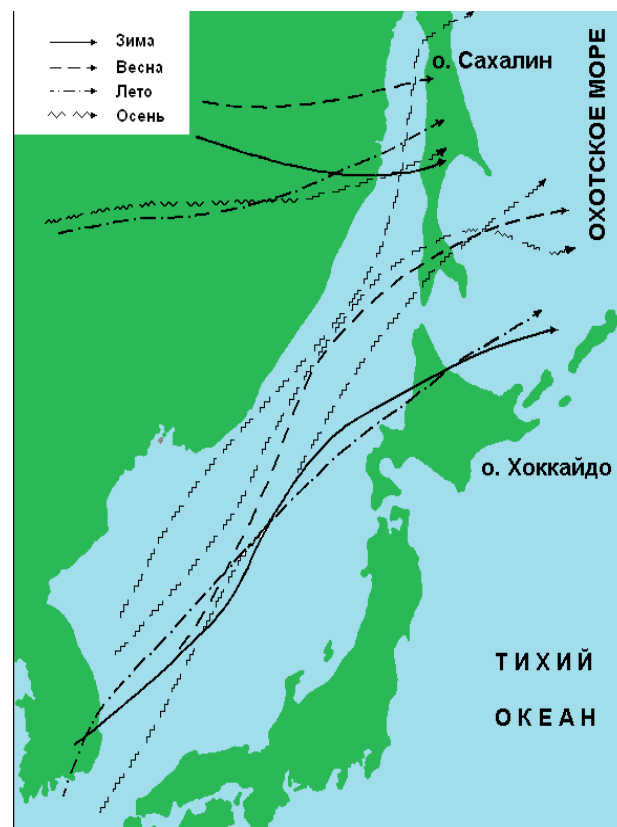


Рис. 10. Пути циклонов в зависимости от сезона.

Исследование сейшевых колебаний

Крупные неоднородности береговой линии, такие как заливы, бухты и прочее, приводят к образованию собственных систем стоячих колебаний, параметры которых определяются геометрией соответствующей акватории. Исследование подобных резонансных колебаний (сейш) в водоемах с открытой внешней границей представляет интерес в первую очередь в связи с угрозой цунами – с необходимостью учета резонансных особенностей различных акваторий.

Так, по данным работы [Рабинович, Левянт, 1992], во время цунами 23.02.1980 волны внутри Малокурильской бухты усилились

почти в пять раз по сравнению с внешним шельфом и имели период около 17 мин, т.е. практически тот же, что и период основного спектрального максимума колебаний уровня для этой бухты.

Проведено изучение [Ковалев, Ковалев, 2013] собственных колебаний (сейш) в прибрежной зоне дальневосточного побережья России в указанных на карте районах (рис. 11). Периоды сейш, определенные по данным наших измерений, хорошо согласуются с периодами волн цунами, зарегистрированными ранее в некоторых из этих пунктов. Выполнена оценка возможности усиления приходящих волн и длительности значительных колебаний с использованием основной характеристики резонансных систем – добротности.

Интересные результаты относительно характера проявления волн цунами, выявившие при измерениях в порту г. Холмск усиление волн на отдельных периодах [Ковалев и др., 2007], стимулировали проведение масштабных измерений волновых процессов в различных пунктах западного побережья о-ва Сахалин, для которых планировалось получить оценки цунамиопасности. С этой целью двенадцать автономных регистраторов волнения и уровня (АРВ производства СКТБ «ЭлПА» г. Углич) были установлены в населенных пунктах от Горнозаводска на юге до Бошняково на севере исследуемой области (рис. 11) [Ковалев, Ковалев, 2013]. Кроме того, в Горнозаводске и Шахтерске были установлены цифровые метеостанции WS 2300, данные с которых позволили оценить воздействие атмосферных возмущений на формирование длинноволновых колебаний [Кузнецов и др., 2010].

Проведенный анализ энергетических спектров колебаний уровня показал, что, несмотря на относительно спокойные погодные условия в июне–сентябре 2008 г., удалось достаточно детально изучить частотно-избирательные свойства прибрежных участков акваторий у западного берега о-ва Сахалин. Наиболее выражены они в пунктах Чехов, Орлово, а также Горнозаводск и Бошняково,

потому рассмотрим особенности длинноволновых движений в районах этих пунктов.

Так, в районе пос. Горнозаводск в спектре колебаний уровня выделяются два диапазона, в которых энергия волновых движений более высокая. Это прежде всего диапазон 6–9 мин (диапазон частот 0.11–0.16 цикл/мин), в котором отмечен максимум с периодом около 7 мин. Для ситуаций в июне и июле этот максимум доминирует в данном диапазоне, в августе и сентябре примерно такую же величину имеет и максимум с периодом около 8 мин.

Известно, что лишь для немногих акваторий с хорошо выраженными резонансными свойствами и высокой добротностью наблюдаются значимые узкие пики в спектрах. Гораздо чаще при различных синоптических условиях происходит некоторое смещение максимумов в зависимости от направления действия ветра

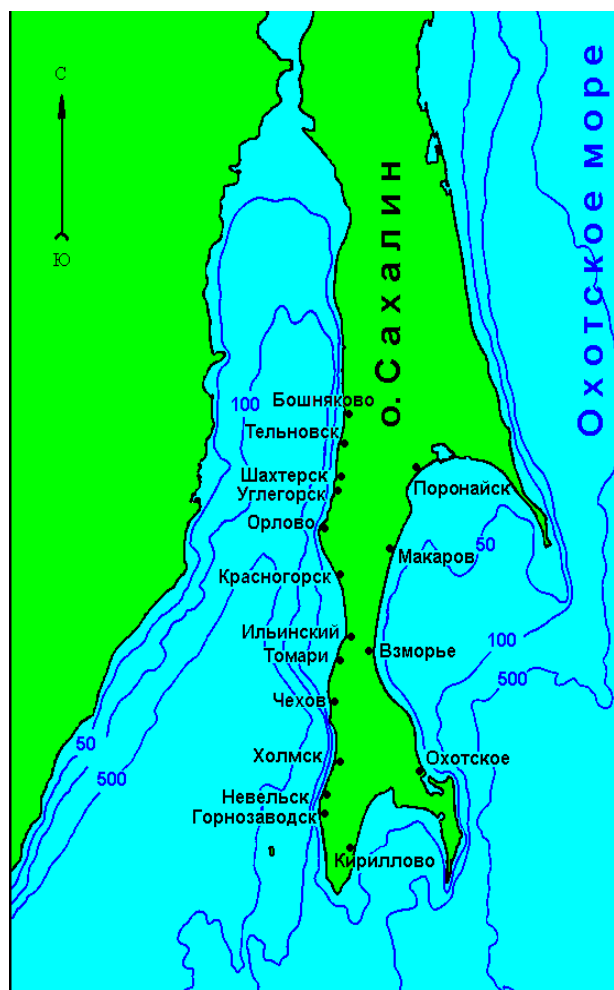


Рис. 11. Схема расположения регистраторов волнения и уровня у западного побережья о-ва Сахалин.

или направления подхода волн зыби, которые также могут быть причиной усиления длинноволновых колебаний и появления максимумов в высокочастотной части спектра.

С использованием определенных из энергетических спектров значений периодов пиков, соответствующих собственным колебаниям акваторий, которые прилежат к населенным пунктам, была составлена таблица периодов сейш (см. таблицу) западного побережья о-ва Сахалин. Короткопериодные колебания от 5 до 35 мин обусловлены, скорее всего, локальными особенностями рельефа дна и топографии береговой черты. Более длинные колебания с периодом 55 мин соответствуют сейше Татарского пролива в северной узкой части, с периодом 100 мин – одноузловой поперечной сейше Татарского пролива в южной части. Поскольку, как уже

отмечалось, приходящие волны цунами наиболее часто имеют периоды от 5 до 40 мин, можно ожидать их резонансного усиления на приведенных в таблице периодах.

Добротность резонансной акватории является мерой относительной диссипации энергии и определяет частотную избирательность системы и число периодов колебаний, в течение которых происходит затухание возбужденных колебаний, а значит, длительность «звучания цунами», что в конечном итоге является критерием для отмены тревоги цунами, и этой характеристике акваторий необходимо уделять особое внимание. Расчет добротности резонансной системы проводился по относительной величине резонансного максимума в энергетическом спектре колебаний [Зернов, Карпов, 1972] (см. таблицу).

Наблюдаемые и рассчитанные периоды сейшевых колебаний

Пункт	Периоды сейш (мин)					
Холмск	Наблюдаемые	–	–	–	8	–
	Рассчитанные	–	–	–	8	–
	Добротность	–	–	–	4,9	–
Горнозаводск	Наблюдаемые	100	50	33	20	15
	Добротность	1.85	2.02		4.1	6.4
Чехов	Наблюдаемые	100	50	40	23	16
	Добротность	–	–	4.3	–	–
Орлово	Наблюдаемые	55	33	25	15	10
	Добротность	3.9	–	–	4.5	–
Бошняково	Наблюдаемые	55	33	–	15	8
	Добротность	–	–	–	–	4.7

Примечание. Прочерк – отсутствие данных.

Анализ данных наблюдений исследовательского мониторинга для всех пунктов измерений показал, что сейши играют определяющую роль в формировании спектра длинных волн. Собственные частоты сейшевых колебаний, их интенсивность и характер обусловлены физико-географическими условиями. Периоды фоновых вариаций уровня, выделяемые по данным наблюдений, хорошо согласуются с периодами волн цунами, которые были ранее зарегистрированы в этих пунктах. Все это должно учитываться при определении цунамиопасности конкретного побережья, поскольку приходящая волна цу-

нами может значительно усиливаться на резонансных частотах.

В результате проведенных масштабных экспериментальных исследований волнения в прибрежной зоне западного побережья о-ва Сахалин были достаточно детально изучены частотно-избирательные свойства прибрежных участков акваторий и сделано заключение о возможном резонансном усилении приходящих волн цунами. Наиболее выражены они в пунктах Чехов (наибольшего усиления можно ожидать на периоде около 40 мин), Орлово (выделяется ряд резонансных периодов, но в наибольшей степени 15–16 мин), а

также в Горнозаводске и Бошняково, где значительное усиление можно ожидать на периоде около 8 мин. В других пунктах выявленные максимумы не так сильно выражены, но во всех случаях выделяется диапазон периодов 10–35 мин, в котором весьма вероятно значительное усиление волн цунами. В низкочастотной части спектра для южной части изучаемого района выделяются максимумы с периодом около 100 мин, а для северной – около 55 мин. Наиболее вероятно они обусловлены поперечной сейшей Татарского пролива.

Заключение

Безопасность жизнедеятельности человека в островном крае во многом зависит от понимания природных процессов, происходящих в прибрежной зоне омывающих остров морей. ИМГиГ ДВО РАН на протяжении многих лет детально исследует морское волнение и его связи с атмосферными процессами, накоплен большой объем данных натурных измерений высокого качества. По результатам проведенных работ можно сделать выводы о воздействии опасных морских явлений на побережье, условиях формирования и распространения опасных волн.

Анализ данных наблюдений в районах населенных пунктов Южных Курильских островов, юго-западного и южного побережий о-ва Сахалин показал, что в прибрежной зоне наблюдаются системы хорошо выраженных резонансных колебаний, которые резко усиливаются при морских опасных явлениях – цунами и штормовых нагонах. Установлено, что собственные частоты сейшевых колебаний, их интенсивность и характер определяются физико-географическими условиями.

Резонансные акватории с высокой дроботностью могут представлять значительную опасность, если периоды сейш близки к периодам приходящих на вход бухты волн цунами, на которых происходит существенное усиление длинных волн. К таким акваториям из рассмотренных можно отнести бухту Малокурильскую (о-в Шикотан), побережье вблизи населенных пунктов западного побережья о-ва Сахалин.

Большую опасность представляет тягун – явление, усиливающееся при увеличении волнения на внешней акватории или при прохождении атмосферных возмущений. Особую роль в формировании тягуна играют инфрагравитационные волны, на периодах которых он и проявляется. Экспериментальные исследования в основных портах Сахалинской области – Холмске, Корсакове, Углегорске и Южно-Курильске – позволили проанализировать особенности волнового режима на их акваториях. Показано, что ковши и портовые бухты, за исключением Южно-Курильска, хорошо защищены от ветрового волнения. При этом значимая высота волн внутри порта на порядок меньше по сравнению с внешней акваторией.

Данные наблюдений скорости ветра в районе Холмского порта показали, что образованию тягуна предшествует продолжительный ветер, способствующий развитию сильного волнения. При наблюдавшихся во время шторма амплитудах продольной сейши около 30 см скорость течения в центральной части бухты может достигать 35 см/с и изменять свое направление на противоположное каждые полторы минуты, что может затруднить погрузо-разгрузочные работы на паромном и других причалах в центральной части бухты.

Полученные при изучении явления тягуна результаты могут быть использованы при проектировании новых сооружений вблизи восточного побережья Сахалина, в частности при изучении волновых нагрузок и литодинамических процессов в местах выхода на берег трубопроводов, предназначенных для транспортировки нефти и газа от морских месторождений до перерабатывающих предприятий.

Список литературы

1. Ветер, волны и морские порты / под ред. Ю.М. Крылова. Л.: Гидрометеониздат, 1986. 264 с.
2. Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. Л.: Энергия, 1972. 816 с.
3. Като Л.Н., Любичкий Ю.В., Шевченко Г.В. Оценка экстремальных значений сгонно-нагонных колебаний уровня моря на юго-восточном побережье о. Сахалин // Колебания уровня в морях: сб. ст. / Рос. гос. гидрометеорол. ун-т. СПб., 2003. С. 111–128.
4. Климат Южно-Сахалинска. Л.: Гидрометеониздат, 1982. 257 с.

5. Ковалев Д.П. Экстремальный сгон у юго-восточного побережья о. Сахалин // *Фундам. и прикл. гидрофизика*. 2013. Т. 6, № 1. С. 52–56.
6. Ковалев П.Д., Ковалев Д.П. Особенности сейшевых колебаний в заливах и бухтах Дальнего Востока: Приморья, Сахалина, южных Курильских островов // *Вестн. Тамбов. ун-та. Сер.: Естеств. и техн. науки*. 2013. Т. 18, вып. 4. С. 1377–1382.
7. Ковалев Д.П. Изучение морского волнения при воздействии глубоких циклонов // *Геофиз. процессы и биосфера*. 2012а. Т. 11, № 1. С. 25–34.
8. Ковалев Д.П. Экспериментальные исследования явления тягуна в основных портах Сахалинской области // *Мир транспорта*. 2012б. № 6. С. 36–43.
9. Ковалев П.Д., Ковалев Д.П. Техника исследования опасных морских явлений в прибрежной зоне океана. Владивосток: Дальнаука, 2010. 152 с.
10. Ковалев П.Д., Шевченко Г.В., Ковалев Д.П. Экспериментальные исследования цунами в порту г. Холмск // *Изв. АИН им. А.М. Прохорова. Н. Новгород: НГТУ*, 2007. Т. 20. С. 68–79.
11. Ковалев П.Д., Дущенко П.В. Приборное обеспечение мониторинга опасных морских явлений // *Инфокоммуникационные и вычислительные технологии и системы: материалы Всерос. конф., г. Улан-Удэ, 5–9 авг. 2003. Улан-Удэ: Изд-во Бурят. гос. ун-та, 2003. Ч. 2. С. 3.*
12. 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. ст. Южно-Сахалинск, 2001. С. 138–145.*
13. Ковалев П.Д., Шевченко Г.В., Ковалев Д.П. Исследование трансформации волн у юго-восточного побережья острова Сахалин // *Современные методы и средства океанологических измерений: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф. М., 2000. С. 153–156.*
14. Кузнецов К.И., Куркин А.А., Ковалев Д.П., Шевченко Г.В. Характеристики ветрового волнения на западном побережье о. Сахалин // *IV Сахалин. молодеж. науч. школа: сб. материалов, Южно-Сахалинск, 2–5 июня 2009 г. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2010. С. 249–255.*
15. Лабзовский Н.А. Непериодические колебания уровня моря. Л.: Гидрометеониздат, 1971. 237 с.
16. Плеханов Ф.А., Ковалев Д.П. Программа комплексной обработки и анализа временных рядов данных уровня моря на основе авторских алгоритмов // *Геоинформатика*. 2016. № 1. С. 44–53.
17. Погосов С. Длинные волны и безопасность судна // *Морской флот*. 1971. № 10. С. 21–22.
18. Рабинович А.Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. Л.: Гидрометеониздат, 1993. 325 с.
19. Рабинович А.Б., Левянт А.С. Влияние сейшевых колебаний на формирование спектра длинных волн у побережья Южных Курил // *Океанология*. 1992. Т. 32, № 1. С. 29–38.
20. Райхлен Ф. Резонанс гавани // *Гидродинамика береговой зоны и эстуариев: пер. с англ. Л.: Гидрометеониздат, 1970. С. 114–166.*
21. Bowen A.J., Inman D.L. Rip currents. 2. Laboratory and field observations // *J. Geophys. Res.* 1969. Vol. 74, N 23. P. 5479–5490.
22. Dally W.R., Dean R.G. Transformation of random breaking waves on surf beat // *Proc. 20th Coastal Eng. Conf. Taipei, 1986. P. 109–123.*
23. Darbyshire M. Long waves on the coast of the Cape Peninsula // *Deutsch. Hydr. Zeit.* 1963. Bd. 16, Ht. 4. P. 167–185.
24. Gallagher B. Generation of surf beat by non-linear wave interactions // *J. Fluid Mech.* 1971. Vol. 49. P. 1–20.
25. Gerritsen F., Van Heteren J. Low frequency oscillations on the Dutch coast // *Proc. 19th. Coastal Eng. Conf. Houston, 1984. P. 625–641.*
26. Huntley D.A., Kim C.S. Is surf beat forced or free? // *Proc. 19th. Coast. Eng. Conf. Houston, 1984. P. 871–885.*
27. Kovalev P.D., Rabinovich A.B., Shevchenko G.V. Investigation of long waves in the tsunami frequency band on the southwestern shelf of Kamchatka // *Natural Hazards*. 1991. Vol. 4, N 2/3. P. 141–159.
28. Middleton J.H., Cahill M.L., Hsieh W.W. Edge waves on the Sydney coast // *J. Geophys. Res.* 1987. Vol. 92, N C9. P. 9487–9493.

Сведения об авторах

КОВАЛЕВ Дмитрий Петрович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией волновой динамики и прибрежных течений ИМГиГ ДВО РАН
 КОВАЛЕВ Петр Дмитриевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений ИМГиГ ДВО РАН
 КИРИЛЛОВ Константин Владиславович – младший научный сотрудник лаборатории волновой динамики и прибрежных течений ИМГиГ ДВО РАН