

УДК 551.46

Опасное морское волнение в местах возможного выхода на берег подводных трубопроводов и постановки нефтедобывающих платформ на шельфе

П.Д. Ковалев^{1*}, Д.П. Ковалев¹

¹ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Российская Федерация, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, д. 1 Б

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

Тезисы. Возможность проведения разведочного бурения и добычи углеводородов на шельфе, а также строительство подводных трубопроводов с выходом на берег в значительной степени зависят от волнового режима конкретной акватории. Авторами рассмотрены основные типы волнения, определяющие риски проведения работ. Большую угрозу представляют штормовые нагоны, являющиеся непериодическими вариациями уровня моря, обусловленные метеорологическими явлениями – колебаниями приземного атмосферного давления и скорости ветра. При этом подъем уровня моря может превышать один метр, а опасными считаются нагоны высотой уже более полу-метра. На их фоне значительно возрастает воздействие ветровых волн и зыби.

Сейши также играют важную роль в динамике заливов, бухт, оказывая значительное влияние на условия работы расположенных на побережье портов и других промышленных объектов. Для большинства бухт их резонансные периоды близки к характерным периодам проявления волн цунами, вследствие чего цунами выражается в этих бухтах прежде всего в резком усилении сейш.

В прибрежной зоне и на шельфе генерируются инфрагравитационные волны, являющиеся результатом нелинейного взаимодействия ветровых волн и зыби, ответственных за разрушение берегов. Инфрагравитационные волны способствуют генерации тягуна – сильных возвратно-поступательных движений воды в открытых бухтах, которые приводят к удару судов о причал или друг о друга, обрыву швартовых и нарушению погрузо-разгрузочных операций.

На шельфе дальневосточных морей, подверженных воздействию частых и мощных циклонов, возможность проведения разведочного бурения и добычи углеводородов, а также строительство подводных трубопроводов с выходом на берег в существенной степени зависят от волнового режима места проведения работ. Морское волнение нескольких типов может представлять опасность для инженерных сооружений на шельфе и в прибрежной зоне, поэтому необходимо предварительное детальное изучение волнового режима в местах предполагаемой постановки буровых платформ и добывающего оборудования, прокладки трубопроводов.

Знание динамических процессов у берегов необходимо также и для обеспечения безопасности морского транспорта, развития транспортной инфраструктуры, расчета оптимального в смысле уменьшения риска воздействия морских волн, размещения новых сооружений и прибрежных промышленных объектов, предназначенных для перевозки углеводородов. Следует отметить, что вероятность генерации опасных волн зависит от конкретного рельефа и поэтому нельзя ограничиваться средними оценками опасных явлений по региону или району. Для надежного контроля ситуации нужна установка измерительных комплексов, например на буровую установку или в акватории порта, для наблюдения за состоянием морской поверхности в проблемных местах с возможностью обработки первичной информации и передачи значимой информации в центры предупреждения об опасных явлениях для наблюдения в реальном режиме времени за уровнем моря.

К морским явлениям, которые могут представлять опасность для прибрежных и шельфовых инженерных сооружений и обслуживающего персонала, относят штормовой нагон, сейши в заливах и бухтах, штормовое волнение, а также процессы, являющиеся результатом трансформации ветрового волнения на мелководье, – инфрагравитационные волны, ответственные за явление тягуна в портах.

Ключевые слова: инженерные сооружения на шельфе, безопасность, волновой режим акватории, штормовой нагон, сейши, инфрагравитационные волны.

Далее на основе многолетних исследований длинноволновых процессов, ветрового волнения и зыби в прибрежной и шельфовых зонах Дальневосточного региона авторами выделены основные типы волнения, определяющие безопасность проведения работ.

Штормовые нагоны на побережье

Для побережья серьезную опасность представляют штормовые нагоны – 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. Над о. Сахалин такие атмосферные возмущения наблюдаются достаточно часто – около 30 атмосферных возмущений с давлением в центре менее 1000 миллибар за год – и оказывают влияние на погодные условия над островом [1]. В большей степени они характерны для весеннего и осеннего периодов, в меньшей – для зимнего и летнего. Обширные прибрежные мелководные зоны также способствуют образованию штормовых нагонов у берегов Сахалина. Кроме того, волны, создаваемые штормовой погодой, усугубляют ситуацию, так как оказывают разрушительное воздействие на береговые сооружения.

Больше всего от штормовых нагонов страдают торговые и рыболовные порты, а также железнодорожный и автомобильный транспорт, поскольку на побережьях Татарского пролива и залива Терпения протяженные участки автомобильных и железных дорог проложены в опасной близости от моря. Участки этих дорог затапливаются и размываются, а берегоукрепительные сооружения разрушаются.

Недостаточный прогноз уровня штормового нагона иллюстрирует пример берегозащитных сооружений станции Холмск-сортировочная (Поляково). Несмотря на мощные волнозащитные приспособления и специальное бетонное берегоукрепление из тетраэдров, берегоукрепительные сооружения, построенные на искусственном, отсыпанном, участке побережья, дважды в течение 1990 г. (в апреле и в ноябре) были разрушены, и железнодорожное полотно получило повреждения (рис. 1) [2]. В осенние периоды 1994 и 1995 гг. катастрофическая ситуация на станции повторилась с разрушениями и значительным экономическим ущербом.

В отличие от нагонов, сгоны в основном не приводят к серьезным разрушениям, это объясняется их, как правило, относительно небольшой величиной. К известным катастрофическим последствиям сгонов можно отнести ряд аварийных ситуаций на ГРЭС поселка Вахрушево [3, 4], возникших в результате прекращения поступления морской воды в систему охлаждения станции и вызвавших ограничение подачи электроэнергии в населенные пункты. Кроме того, понижение уровня моря при ветровых сгонах может привести к посадке на морское дно малых рыболовецких судов, стоящих в мелководных бухтах. Для г. Поронайска, например, размеры сгонов редкой повторяемости (100 лет) составляют $79,8 \pm 7,6$ см при доверительном интервале 68 % [4].

Институтом морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ) с целью исследования формирования нагонов и сгонов изучены пути циклонов на юго-восточном и юго-западном побережьях о. Сахалин. Построена карта путей циклонов, которые могут сформировать нагонно-сгонные явления в южной части острова. Кроме того, при анализе колебаний уровня, записанных в сентябре-октябре 2010 г. в районе пос. Взморье на юго-восточном побережье о. Сахалин, визуально обнаружен значительный сгон – около 60 см [5]. Для проверки предположения о возможном нагоне в этой части острова, после обнаружения сгона верифицированы данные об изменении уровня моря с противоположной – юго-западной – стороны о. Сахалин в районе г. Холмска. Результаты



Фото А. С. Глютко

Рис. 1. Разрушенное бетонное берегоукрепление на станции Холмск-сортировочная после штормового нагона в ноябре 1990 г. (Сахалинская железная дорога)

анализа подтвердили наличие нагона, который и был обнаружен.

Полученные в Холмской бухте ряды наблюдений с секундной дискретностью подвергнуты низкочастотной фильтрации, и из них вычтен предвычисленный прилив. Остаточные непериодические вариации уровня обусловлены метеорологическими явлениями – колебаниями приземного атмосферного давления и скорости ветра. Обычно они сравнительно невелики: среднеквадратическая амплитуда составляет 10–12 см. На их фоне резко выделяются значительное понижение уровня в районе пос. Взморье – до 60 см, зарегистрированное двумя донными станциями, и синхронное повышение уровня в порту Холмска. Остаточные ряды для этих ситуаций приведены на рис. 2.

Согласно данным прежних лет, значительные нагонные явления на юго-восточном побережье Сахалина обычно наблюдаются в районе Поронайска, что связано, по-видимому, с преимущественным прохождением циклонов через южную часть острова [2]. Сравнительная оценка сгонов редкой повторяемости [4] и их доверительных интервалов для г. Поронайска и с. Стародубского, которое находится в 40 км южнее пос. Взморье, показывает, что зарегистрированный у пос. Взморье сгон величиной около 60 см представляет собой крайне редкое явление, повторяющееся приблизительно раз в 100 лет.

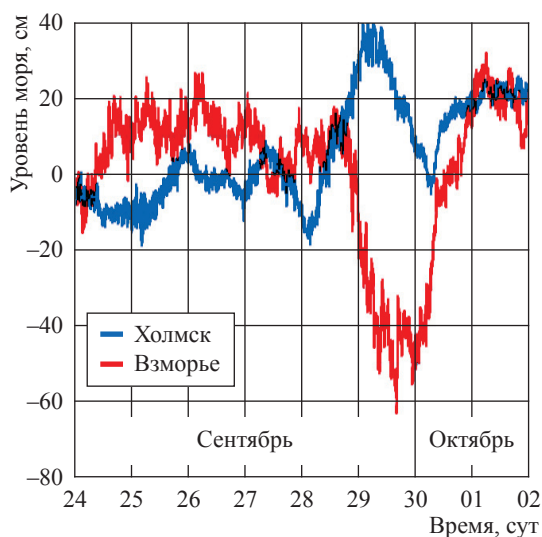


Рис. 2. Временной ход колебаний уровня моря на станциях № 36 (Холмск) и № 38 (Взморье) в период с 25 сентября по 1 октября 2010 г.

Сгоны формируются, как правило, в тыловых секторах циклонов, смещающихся через юг о. Сахалин в направлении Северных Курил или южной части п-ова Камчатка. Для рассматриваемого случая по карте прохождения циклона и направления ветров установлено, что циклон двигался над северной частью о. Сахалин и поэтому направление ветра в южной части острова не менялось в течение почти двух суток, что и явилось причиной сильного сгона. Эти же ветра вызвали и нагон в районе Холмска высотой около 40 см, который не относится к нагонам редкой повторяемости [2, 4], но все равно считается значительным и при сильном штормовом волнении может представлять реальную угрозу.

Следует также отметить и инструментально зарегистрированный в порту г. Холмска значительный нагон 22–23 ноября 2006 г. Высота нагонной волны, по предварительной оценке, превысила 75 см, т.е. данное событие можно отнести к числу особо опасных природных явлений. Этим еще раз подтверждается, что штормовые нагоны не редкое явление и им следует уделять внимание при оценке возможных опасностей в конкретных акваториях.

Сейши в бухтах Сахалина и Курильских островов

Крупные неоднородности береговой линии, такие как заливы, бухты и пр., приводят к образованию собственных систем стоячих колебаний, параметры которых определяются геометрией соответствующей акватории. Такие стоячие периодические колебания массы воды во всем водоеме или его обособленной части называются сейшами [6]. Сейши – результат резонансных явлений в водоеме при интерференции волн, отраженных от границ водоема. Они оказывают значительное влияние на условия работы расположенных на побережье портов и других промышленных объектов.

Одной из важных характеристик резонансных свойств акватории является добротность. Добротность акватории определяется конфигурацией гавани или залива и возрастает с уменьшением ширины входа. Усиление входящих волн в акватории зависит от добротности. Известно также, что добротность служит мерой относительной диссипации энергии и пропорциональна числу колебаний в системе за время, при котором амплитуда волн уменьшится в e раз, т.е. определяет

частотную избирательность резонансной системы и число периодов колебаний, в течение которых происходит установление стационарной амплитуды.

Для исследования сейш, механизмов их генерации и воздействия на прибрежную инфраструктуру силами ИМГиГ на протяжении многих лет проводятся измерения длинноволновых процессов в широком диапазоне волновых процессов, в том числе и сейш [7], с использованием специально разработанных для этих целей и постоянно совершенствуемых кабельных комплексов и автономных мареографов [8]. На основе этих приборных комплексов осуществляется исследовательский мониторинг в районе южной части о. Сахалин и Курильских островов, измерения волнений различной продолжительности проводились также в Приморском крае (рис. 3).

Спектральный и спектрально-временной анализ данных наблюдений для четырех пунктов Курильской гряды – б. Малокурильской и б. Крабовой на о. Шикотане, а также залива

Касатка на о. Итуруп и б. Южно-Курильской на о. Кунашире – показал, что собственные частоты сейшевых колебаний, их интенсивность и характер определяются физико-географическими условиями и в конечном итоге добротностью резонансной системы. Собственные резонансные периоды исследуемых акваторий, выделяющиеся по данным наблюдений уровня моря, хорошо согласуются с периодами волн цунами, зарегистрированными в этих пунктах и полученными численным моделированием [6, 9].

Расчет добротности резонансной системы проводился на основании спектров исходя из того, что добротность определяет относительную величину резонансного максимума в энергетическом спектре колебаний, а шириной максимума считается полоса частот, в пределах которой энергия колебаний уменьшается в 2 раза [10]. При этом максимальное (резонансное) значение амплитуды колебаний $A_{рез}$ можно определить из выражения:

$$A_{рез} = \frac{A_{вн} \omega_0^2}{2\delta \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}},$$

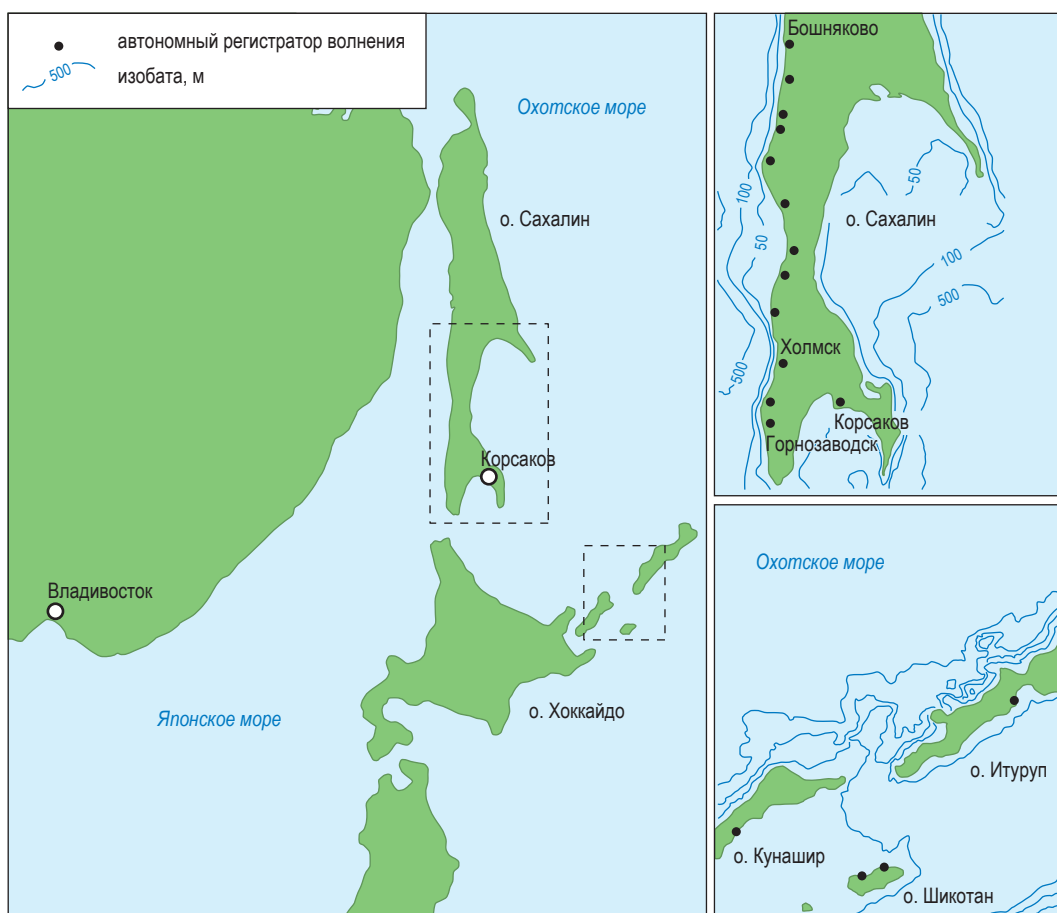


Рис. 3. Карта региона наблюдений и постановки измерительных приборов

где $\delta = \omega_0/2Q$ – коэффициент затухания (ω_0 – резонансная частота системы, Q – добротность резонансной акватории); $A_{\text{вн}}$ – амплитуда входящей волны.

По результатам проведенных исследований установлено, что наибольшую опасность представляют сейши в б. Малокурильской, добротность которых, по разным оценкам, составляет от 8,0 до 10,3 для периодов волнения около 19 мин. В других пунктах измерений добротность не превышала 3,0 для периодов волнения около 3 ч, однако следует иметь в виду, что энергия низкочастотных колебаний с часовыми периодами значительна и они также могут представлять опасность.

Активное изучение сейшевых колебаний на юге о. Сахалин стимулировалось необходимостью обеспечения безопасной разгрузки железнодорожных паромов морской переправы Ванино – Холмск, для работы которой нужна точная стыковка рельс на судне и на берегу. Холмская бухта хорошо защищена от волнения, однако портовые сейши, служащие также причиной тягуна, даже при умеренной интенсивности могут нарушать эту стыковку, затруднять погрузо-разгрузочные работы и быть причиной простоев парома в порту. ИМГиГ с 2006 по 2009 г. осуществлял инструментальные измерения колебаний уровня моря в портовой бухте г. Холмска. Так же как и на Курильских островах, здесь использовались автономные и кабельные регистраторы придонного гидростатического давления, измеряющие вариации морской поверхности.

Изучение резонансных периодов и пространственной структуры этих колебаний, обусловленных особенностями прибрежной топографии, позволило выделить собственные интенсивные колебания бухты с периодом около 8 мин, которые отчетливо видны на записи и в спектрах в Холмской бухте после прихода волны цунами (рис. 4). На основе численного моделирования показано, что они соответствуют нулевой моде, имеющей узловую линию в горловине бухты, которая обычно весьма эффективно возбуждается волнами цунами. Хорошо видно (см. рис. 4), что при достаточно высокой добротности (4,9) резонансной акватории Холмской бухты длительность колебаний после прихода возбуждения на вход бухты (звучания цунами) составила 5 периодов. Затем амплитуда на несколько периодов стабилизировалась, что связано, по-видимому,

с дополнительной подкачкой энергии за счет подхода волн цунами из внешней акватории.

Интересные результаты относительно характера колебаний уровня моря, полученные при проведении измерений в порту г. Холмска, стимулировали проведение масштабных измерений волновых процессов в различных портовых пунктах западного побережья о. Сахалин. С этой целью в 2008 г. в населенных пунктах между селами Горнозаводск на юге о. Сахалин и Бошняково на севере исследуемой области были установлены 12 автономных регистраторов волнения (см. рис. 3) [11]. Длительность натурального эксперимента составила около 4 мес. В результате получен обширный материал наблюдений, который позволил изучить частотно-избирательные свойства акваторий вдоль западного побережья Сахалина: определены периоды максимумов, соответствующие собственным колебаниям, и значения добротности для акваторий, прилегающих к населенным пунктам.

Еще один порт – г. Корсакова – является одним из главных на Сахалине, и от его устойчивой работы зависят товароборот и состояние ряда важнейших отраслей экономики Сахалинской области. К тому же порт подвержен воздействию опасных морских явлений: его гидротехнические сооружения и складские территории неоднократно затапливались морской водой при цунами (в 1952 и 1960 гг.). В связи с этим интерес представляют сейшевые колебания в порту и на прилегающей к нему акватории.

По данным натурных наблюдений, выполненных специалистами ИМГиГ, в рассчитанном спектре колебаний уровня моря в порту г. Корсакова при Чилийском цунами четко выделяются хорошо выраженные пики с периодами 12, 19, 33 мин и 2 ч, а также мощный пик с периодом около 4,7 ч. Эти колебания (период $\approx 4,7$ ч) обладают наибольшей энергией и проявляются на всем побережье залива Анива, за исключением мыса Крильон, где, в частности при Чилийском цунами, колебания с периодом около 4,7 ч не были отмечены. Это указывает на то, что пучность резонансных колебаний вероятнее распределена вдоль северного побережья залива, а узловая линия проходит по его открытой границе (линия «мыс Анива – мыс Крильон»).

Таким образом, результатом многолетних наблюдений явились значения добротностей

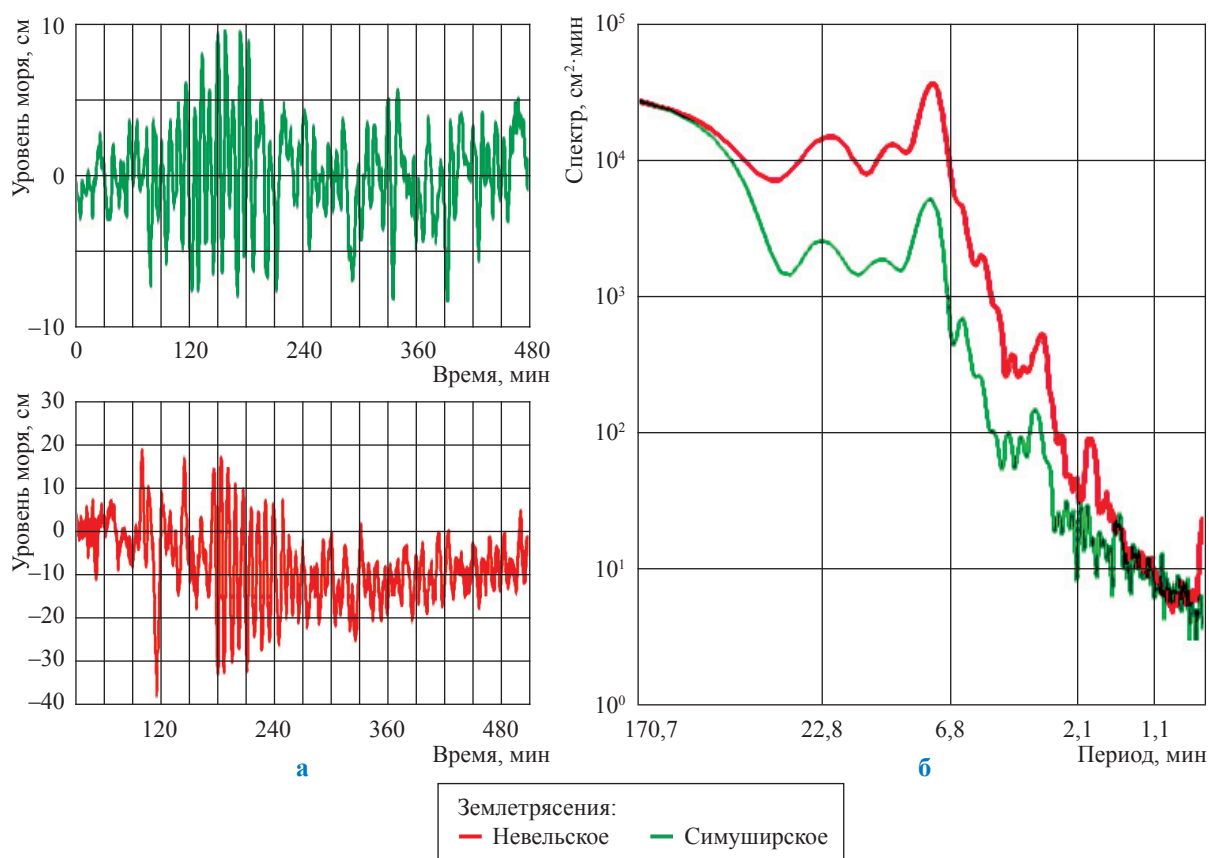


Рис. 4. Приход волн цунами в бухту порта г. Холмска во время Симуширского (15.11.2006) и Невельского (02.08.2007) землетрясений: а – отрезки (продолжительность – 8 ч) записей колебаний уровня моря; б – спектры колебаний уровня моря

и собственных резонансных периодов для важных с хозяйственной точки зрения акваторий Сахалинской области. Актуальность таких исследований подтверждается развитием нефтегазового комплекса на побережье острова, безопасная работа которого невозможна без знания гидродинамических режимов акваторий, на которых он расположен.

Инфраволнационные волны

Прокладка трубопроводов вблизи берегов влечет за собой нарушение равновесного состояния прибрежных грунтов. Воздействие штормового волнения (абразия) на грунты с разрушенной структурой усиливается, что увеличивает риск возникновения аварийных ситуаций.

В настоящее время среди специалистов, занимающихся проблемами абразии берегов, сложилось представление, что многие особенности трансформации прибрежного рельефа, в частности формирование локальных зон размыва или, напротив, накопления осадков, связаны не только с характером ветрового волнения,

но и с образованием в прибрежной зоне длинных волн. Вальтером Манком такие волны были названы прибойными биениями [12]. Природа прибойных биений связана с групповой структурой волнения, которая, в свою очередь, обусловлена нелинейными эффектами, присущими самому волнению. Образующиеся подобным образом длинные волны имеют периоды от 0,5 до 5 мин, близкие к периодам огибающих волновых пакетов. При этом в каждом конкретном районе обычно выделяются некоторые вполне определенные периоды, связанные с характером прибрежного рельефа, а также преобладающими периодами и углами подхода волн зыби: образование длинных волн реже связано с менее регулярным и более высокочастотным ветровым волнением. Длинные волны, возникающие в результате трансформации волнения в прибрежной зоне, получили название инфраволнационных.

Второй тип волн связывают с распространяющимися вдоль берега захваченными краевыми волнами, механизм формирования

которых впервые описан Галлахером [13]. Эффект захвата волной энергии аналогичен явлению полного внутреннего отражения в оптике при распространении лучей в слоистой среде. Периоды краевых волн определяются периодом огибающей ветрового волнения, а также углом подхода ветровых волн к линии берега. Именно с краевыми волнами, имеющими периодическую вдольбереговую структуру, связано образование ритмических форм рельефа.

Краевые волны над наклонным дном создают в прибрежной области своеобразные структуры в виде ячеек, по границам которых в направлении открытого моря могут формироваться узкие струйные течения, получившие название разрывных. Интерес к этому типу волновых движений связан с тем, что они оказывают чрезвычайно сильное воздействие на прибрежную литодинамику: при определенных условиях краевые волны с периодами, равными периодам огибающих ветрового волнения, эффективно генерируются в прибрежной зоне и способствуют локальным размывам прибрежного рельефа, формированию периодических песчаных структур (фестонов, серповидных баров и т.п.). Морские трубопроводы, проложенные с промыслов на берег, подвергаются сильному воздействию литодинамических процессов на подводном береговом склоне, обусловленных совместным действием штормовых волн, развившихся в условиях глубокого моря, с обломочным материалом абразии берегов и подводного склона. Характер перемещения наносов играет существенную роль в формировании профиля подводного берегового склона и должен учитываться при расчете слоя переформирования наносов при определении глубины заложения подводных трубопроводов.

С целью изучения воздействия штормовых волн на прибрежную литодинамику авторы работы принимали участие в изучении инфрагравитационных волн в районе м. Острога [14] (пос. Взморье, о. Сахалин) и в районе протоки оз. Изменчивого [15]. Натурные эксперименты включали постановку групп автономных измерителей придонного гидростатического давления. В качестве примера на рис. 5 показаны результаты исследования гидродинамических процессов в прибрежной зоне моря, обусловленных трансформацией ветрового волнения и формированием длинных инфрагравитационных волн, выполненного в 2007 г.

в районе пос. Взморье (восточное побережье о. Сахалин).

Наиболее важный результат спектрального анализа записей – выявленный на станции № 24 мощный, хорошо выраженный пик для периода ≈ 170 с (см. рис. 5); при шторме наблюдается значительный – на полтора-два порядка – подъем уровня волновой энергии, что свидетельствует об активной генерации инфрагравитационных волн при возрастании энергии ветровых волн и зыби в прибрежном районе. На другой станции (№ 23) наблюдаются два мощных пика для периодов ≈ 170 и 70 с. Тот факт, что на одной станции второй пик четко выделяется, а на других отсутствует, можно интерпретировать как проявление краевых волн инфрагравитационной природы. Если бы это были волны, распространяющиеся в сторону берега, то вряд ли наблюдалась бы столь выраженная пространственная изменчивость: для данного типа волновых движений она не характерна. Возможно, группа датчиков № 38–24–34 находилась вблизи линии разделения ячеек (либо вдольбереговой, либо поперечной береговой) [14].

Для вычисления пространственного размера ячейки использовались данные спутникового альтиметрического цифрового атласа GEBCO1 об угле наклона дна в районе измерений, который по профилю составил $1,3^\circ$, и для периода волн 70 с была получена длина

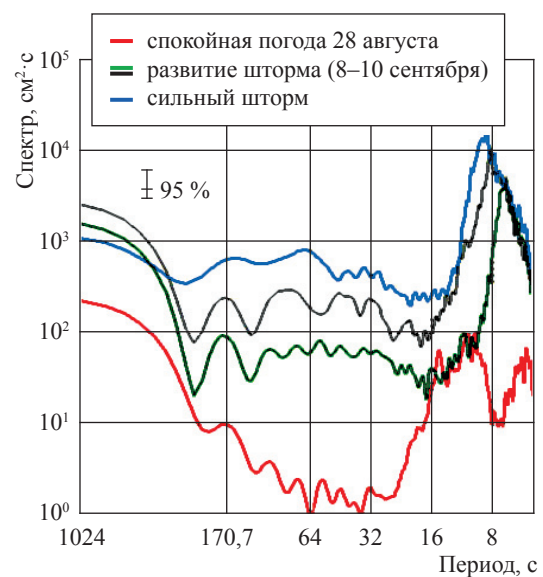


Рис. 5. Спектры записей придонного гидростатического давления (пос. Взморье, датчик № 24) в 2007 г.: 34 степени свободы

волны ≈ 1300 м. Вдольбереговой размер ячейки равен половине длины волны, т.е. ~ 650 м. Это согласуется с визуально наблюдаемыми ритмическими формами рельефа в районе проведения измерений.

Тягун в портах Сахалинской области

Известно, что даже в «хорошо защищенных» портах наблюдаются сильные возвратно-поступательные движения воды, которые приводят к соударениям судов с причалом или друг с другом, обрыву швартовых и нарушению погрузо-разгрузочных операций [6, 16]. Это явление в отечественной литературе получило название тягуна. Тягун наблюдается обычно у приглубых берегов – там, где портовые сооружения вынесены в открытое море [17]. 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 [6]. Установлено, что этому явлению практически всегда сопутствуют штормовое волнение или сильная зыбь на подходе к гавани. Измерения колебаний уровня моря в гаванях [6] показали, что характерные периоды тягуна составляют 0,5–4 мин, хотя в отдельных случаях наблюдались периоды ≈ 20 мин.

Тягун серьезно осложняет работу крупнейших торговых портов Сахалина – Корсакова и Холмска, а также небольших и менее значимых, но активно используемых, таких, например, как Углегорск и Южно-Курильск. С целью выявления механизмов генерации и условий существования тягуна авторами проведено его изучение в этих портах [18].

Тягун в порту Корсакова первоначально изучался по данным кабельного измерителя за 1999–2000 гг. [19]. К сожалению, по техническим причинам не удалось поставить прибор внутри гавани, где возможны четко выраженные резонансные колебания. Его установили с внешнего края северного пирса, т.е. вне гавани, поэтому наблюдается повышение энергии колебаний в достаточно широкой по частоте области спектра.

Для активного периода (сентября) по данным колебаний уровня рассчитана диаграмма текущего спектра, которая показала, что волнение на акватории порта Корсакова определялось главным образом волнами зыби с периодами 7–8 с. Более высокочастотные волны

отмечены на небольших интервалах времени только в октябре. На спектрах также выделяются устойчивые, хотя и не очень мощные, максимумы (полосы на диаграмме) для периодов 12–15 с, отвечающие, вероятно, длиннопериодной океанской зыби. В диапазоне существования тягуна наблюдается достаточно высокий уровень энергии, однако четко выраженных максимумов, за исключением периода $\approx 1,5$ мин, не выделяется. Это связано, скорее всего, с неудачным расположением прибора вдали от наиболее вероятного положения пучностей резонансных мод.

Изучение тягуна в Холмской бухте представляло большой интерес в связи с возможным нарушением работы паромной переправы [20]. Здесь тягун обусловлен наиболее ярко выраженными резонансными колебаниями с периодом около 3 мин (рис. 6). Для этих колебаний к тому же характерно особенно значимое усиление при развитом волнении по сравнению со спокойной погодой, хотя 16 и 26 ноября данный пик также хорошо выражен.

Экспериментальные измерения волновых процессов в Холмской бухте сопровождались регистрацией приземного атмосферного давления и скорости ветра. В районе проведения эксперимента воздушные потоки имеют

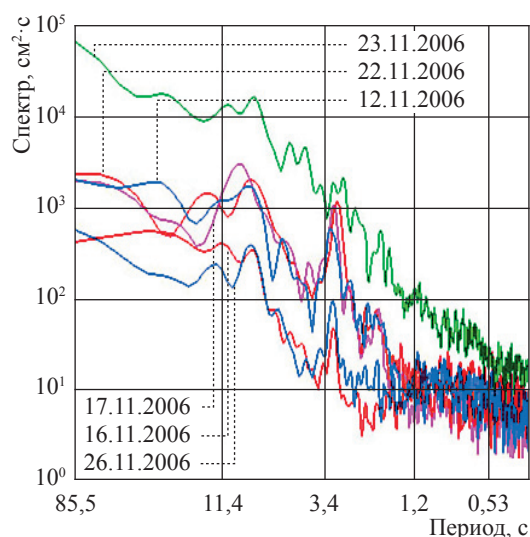


Рис. 6. Энергетические спектры колебаний уровня в бухте порта г. Холмска для различных волнений на море в ноябре 2006 г.: 16 и 26 ноября – тихая погода; 17 ноября – 2,5-метровая волна; 12 и 22 ноября – 3,5-метровая волна; 23 ноября – сильный шторм. Число степеней свободы – 32

преимущественно меридиональный характер, что обусловлено орографическим влиянием: вблизи Холмска местность гористая, а берег имеет меридиональную ориентацию. Анализ скорости ветра в районе наблюдений показал, что развитию штормовых волн высотой 2,5–3,5 м, а также и усилению тягуна предшествует продолжительный – от 6 до 10 ч – ветер вдольберегового направления скоростью 3–7 м/с и выше. При более слабых ветрах амплитуда сейши с периодом 3 мин невелика и тягун не представляет опасности для находящихся в порту судов. Таким образом, анализ продолжительности и силы ветра позволяет определять дальнейшее развитие волнения на море, а значит, предопределять действия по обеспечению безопасности мореходства.

В 2003–2005 гг. эксперименты в Южно-Курильской бухте около п. Горячий пляж и у причала Южно-Курильска позволили выявить особенности проявления резонансных колебаний на различных участках исследуемой акватории [21]. В диапазоне существования тягуна были обнаружены мощные колебания с периодом около 1 мин. Наиболее вероятно, они связаны с групповой структурой волнения и отвечают образованию инфрагравитационных волн. Причем пик с периодом около 1 мин связан с некоторой весьма устойчивой причиной, скорее всего, с резонансными особенностями акватории, и является проявлением тягуна на данной акватории. Следует также отметить интересную черту проявления тягуна: не всегда более сильному шторму соответствует большая энергия тягуна. Это обстоятельство обусловлено, по-видимому, направлением ветра, а значит, подхода волн к причалу. Хотя в большинстве случаев существенное увеличение энергии колебаний на периодах около 1 мин связано именно с усилением волнения на море.

Экспериментальные наблюдения за волнением проведены и в порту г. Углегорска летом 2008 г. Интенсивность проявления тягуна здесь достаточно высокая. Анализ диаграммы текущего спектра колебаний уровня, вычисленной по записи волнения в порту Углегорска, имеющего четкую прямоугольную форму, позволяет легко оценить периоды собственных мод.

Наиболее характерной особенностью текущего спектра является наличие четырех горизонтальных линий с более высокими значениями спектральной амплитуды, которые

отвечают резонансным модам бассейна. Выделяются максимумы с периодами около 113, 54, 30 и 15 с. Средняя скорость длинных волн на акватории порта составляет ≈ 5 м/с, таким образом, эти периоды неплохо согласуются с оценками периодов одно- и двухузловых продольной и поперечной сейш гавани. Значения выделенных периодов не зависят от исследуемого временного интервала: на протяжении четырех месяцев непрерывных наблюдений они оставались одинаковыми.

Кратность периодов и их стабильность указывают на то, что соответствующие им волновые процессы обусловлены резонансными свойствами ковша порта. Именно эти волны и ответственны за явление тягуна в порту Углегорска. Отметим, что рассчитанный по методике РД 31.33.02-81¹ период тягуна (0,84 мин) близок к периоду низкочастотных колебаний, обнаруженных по натурным данным.

График энергетических спектров колебаний уровня воды также свидетельствует, что усиление собственных колебаний в ковше связано с возрастанием интенсивности ветрового волнения. Результаты анализа указывают на высокую вероятность возникновения тягуна в порту Углегорска.

Подобная картина характерна для всех портов западного побережья о. 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. Колебания напрямую связаны с явлением тягуна – периодическими движениями воды в портах, бухтах и гаванях, вызывающими циклические перемещения стоящих у причалов судов, существенно затрудняющие их эксплуатацию, особенно погрузку-разгрузку.

Исследования опасных морских явлений в местах возможного выхода подводных трубопроводов на побережье, а также динамики волнового поля подтвердили свою важность для обеспечения безопасности жизнедеятельности человека в прибрежной зоне. Анализ данных наблюдений в районах населенных пунктов южных Курильских островов, юго-западного

¹ РД 31.33.02-81. Методические указания по определению ветровых и волновых условий при проектировании морских портов / Союзморниипроект. – 1981.

и южного побережий о. Сахалин продемонстрировал, что в прибрежной зоне наблюдаются системы хорошо выраженных резонансных колебаний, которые резко усиливаются при морских опасных явлениях – цунами и штормовых нагонах. Собственные частоты сейшевых колебаний, их интенсивность и характер определяются физико-географическими условиями акваторий. Знание добротности резонансной системы конкретной акватории позволяет прогнозировать возможное усиление приходящей на вход бухты волны цунами, а также оценить, на сколько и за какое время после этого события уменьшатся амплитуды возбужденных сейшевых колебаний в конкретной бухте и как долго они будут продолжаться, т.е. когда можно будет давать отбой тревоге цунами, что очень важно, поскольку угрозу могут представлять не только первые волны.

Экспериментальные исследования в основных портах Сахалинской области – Холмске, Корсакове, Углегорске и Южно-Курильске – показали, 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. В то же время, обнаружено существенное увеличение энергии колебаний уровня: более чем на порядок в диапазоне существования явления тягуна, в частности, для периодов 3 и 1,5 мин (Холмская бухта), 1,5–3 мин (порт Корсаков), ~ 1 мин (Южно-Курильская бухта) и 1,9; 1; 0,5 и 0,25 мин (Углегорск). Интенсивность этих колебаний значительно возрастает в штормовую погоду, что указывает на их инфрагравитационную природу вследствие наличия явной связи с волнением на море. Очевидно, что эти пики отвечают собственным колебаниям бухт и свидетельствуют о существовании явления тягуна в данных портах, которое обнаруживается, как правило, при увеличении интенсивности волнения на внешней акватории.

Результаты исследований волнения в прибрежной зоне о. Сахалин позволяют заключить, что поле инфрагравитационных волн

при штормовом волнении средней интенсивности (высота волн – до 3 м) формируется преимущественно низшими модами краевых волн и оказывает чрезвычайно сильное воздействие на прибрежную литодинамику: при определенных условиях краевые волны с периодами, равными периодам огибающих ветрового волнения, эффективно генерируются в прибрежной зоне и способствуют локальным размывам прибрежного рельефа, формированию периодических песчаных структур (фестонов, серповидных баров и т.п.). Именно с краевыми волнами, имеющими периодическую вдольбереговую структуру, связано образование ритмических форм рельефа.

Обнаружено, что прохождение циклона над северной частью о. Сахалин и снижение его скорости 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 побережье острова и нагона на юго-западном побережье. Анализ продолжительности и силы ветра позволяет определять дальнейшее развитие волнения на море, а значит, прогнозировать действия по обеспечению безопасности мореходства и населения, проживающего в прибрежных зонах.

В работе рассмотрены основные морские явления, которые могут представлять угрозу прибрежным районам дальневосточных морей. Установлена их опасность с точки зрения эксплуатации шельфовых и прибрежных инженерных сооружений, а также жизнедеятельности населения прибрежных территорий. При этом надо учитывать, что такие явления преимущественно локальны и в значительной мере определяются батиметрическими особенностями конкретных акваторий, поэтому для оценки их опасности нельзя использовать усредненные по району характеристики. Для обеспечения безопасности в местах предполагаемых работ в прибрежной зоне и на шельфе необходимо проводить предварительные измерения морского волнения и метеорологической обстановки.

Список литературы

1. Климат Южно-Сахалинска. – Л.: Гидрометеиздат, 1982. – 257 с.
2. Шевченко Г.В. Проявления штормовых нагонов в южной части острова Сахалин: препринт / Г.В. Шевченко, Ю.В. Любичкий, Л.Н. Като. – Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 1994. – 44 с.
3. Като Э. Штормовые нагоны на побережье острова Сахалин в конце XX века / Э. Като, О.А. Миськов, Г.В. Шевченко // Динамические процессы на шельфе Сахалина и Курильских островов: сб. ст. – Южно-Сахалинск, 2001. – С. 160–176.
4. Като Л.Н. Оценка экстремальных значений сгонно-нагонных колебаний уровня моря на юго-восточном побережье о. Сахалин / Л.Н. Като, Ю.В. Любичкий, Г.В. Шевченко // Колебания уровня в морях: сб. ст. / Российский государственный гидрометеорологический университет. – СПб.: РГГМУ, 2003. – С. 111–128.
5. Ковалёв Д.П. Экстремальный сгон у юго-восточного побережья о. Сахалин / Д.П. Ковалёв // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2013. – Т. 6. – № 1. – С. 52–56.
6. Рабинович А.Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение / А.Б. Рабинович. – Л.: Гидрометеиздат, 1993. – 240 с.
7. Ковалёв П.Д. Особенности сейшевых колебаний в заливах и бухтах Дальнего Востока: Приморья, Сахалина, южных Курильских островов / П.Д. Ковалёв, Д.П. Ковалёв // Вестник Тамбовского университета. Естественные и тех. науки. – 2013. – Т. 18. – Вып. 4. – С. 1377–1382.
8. Ковалёв П.Д. Технические средства для измерения длинных волн в океане / П.Д. Ковалёв. – Владивосток: ДВО РАН, 1993. – 149 с.
9. Рабинович А.Б. Влияние сейшевых колебаний на формирование спектра длинных волн у побережья Южных Курил / А.Б. Рабинович, А.С. Левянт // Океанология. – 1992. – Т. 32. – № 1. – С. 29–38.
10. Зернов Н.В. Теория радиотехнических цепей / Н.В. Зернов, В.Г. Карпов. – Л.: Энергия, 1972. – 816 с.
11. Шевченко Г.В. Резонансные колебания в заливах и бухтах: натурные эксперименты и численное моделирование / Г.В. Шевченко, А.Г. Чернов, П.Д. Ковалёв и др. // Труды Нижегородского технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2010. – № 1 (80). – С. 52–62.
12. Munk W.H. Surf beats / W.H. Munk // Trans. Amer. Geophys. Union. – 1949. – V. 30. – № 6. – P. 849–854.
13. Gallagher B. Generation of surf beat by non-linear wave interactions / B. Gallagher // J. Fluid Mech. – 1971. – V. 49. – P. 1–20.
14. Ковалёв П.Д. Исследование трансформации волн у юго-восточного побережья острова Сахалин / П.Д. Ковалёв, Г.В. Шевченко, Д.П. Ковалёв // Современные методы и средства океанологических исследований: материалы VI Международной научно-технической конференции. – М.: ИОРАН, 2000. – С. 153–156.
15. Ковалёв П.Д. Исследование особенностей гидродинамических условий прилегающего к озеру Изменчивое участка взморья / П.Д. Ковалёв, Г.В. Шевченко, А.А. Куркин и др. // Известия АИН им. А.М. Прохорова. Прикладная математика и механика. – Н. Новгород: НГТУ, 2007. – Т. 20. – С. 8–16.
16. Ветер, волны и морские порты / под ред. Ю.М. Крылова. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 264 с.
17. Бычков В.С. Морские нерегулярные волны / В.С. Бычков, С.С. Стрекалов. – М.: Наука, 1971. – 132 с.
18. Ковалёв Д.П. Экспериментальные исследования явления тягуна в основных портах Сахалинской области / Д.П. Ковалёв // Известия АИН им. А.М. Прохорова. Прикладная математика и механика. – Н. Новгород: НГТУ, 2007. – Т. 20. – С. 8–16.
19. Ковалёв П.Д. Изучение опасных морских явлений в порту города Корсаков / П.Д. Ковалёв, Г.В. Шевченко, Д.П. Ковалёв // Динамические процессы на шельфе Сахалина и Курильских островов: сб. ст. – Южно-Сахалинск, 2001. – С. 138–145.
20. Ковалёв П.Д. Экспериментальные исследования явления тягуна в порту г. Холмск / П.Д. Ковалёв, Г.В. Шевченко, Д.П. Ковалёв // Известия АИН им. А.М. Прохорова. Прикладная математика и механика. – Н. Новгород: НГТУ, 2007. – Т. 20. – С. 106–112.
21. Kovalev P.D. Investigation of the sea level fluctuations in the Yuzhno-Kurilskaya Bay / P.D. Kovalev, G.V. Shevchenko, D.P. Kovalev // Proc. of the 20th International symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice. – Mombetsu, Hokkaido, Japan, 2005. – P. 261–266.

Dangerous marine waves in the areas of possible onshore exit of underwater pipelines and offshore installation of oil-extracting platforms

P.D. Kovalev^{1*}, D.P. Kovalev¹

¹ Institute of marine geology and geophysics, Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, Bld. 1B, Nauki street, Yuzhno-Sakhalinsk, 693022, Russian Federation

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

Abstract. Possibility of exploratory drilling and production of hydrocarbons on the shelf, as well as construction of underwater pipelines with exit to the coast depend on the wave mode of a water area. There are several types of sea waves that can pose a serious danger to engineering shelf and coastal structures. Therefore, the preliminary study of the wave mode in venues of operations is necessary.

Based on the research performed by the authors, the main types of disturbance that determine the safety of activities are considered. Storm surges, which are non-periodic variations in sea level caused by such meteorological phenomena as fluctuations in surface atmospheric pressure and wind speed, are also a great threat. In this case sea level rise may exceed one meter, and surges being higher than half a meter are considered dangerous. On such a background, influence of wind waves and storm surges considerably increases.

Seiches also play an important role in the dynamics of bays and gulfs and significantly affect conditions of activities in ports and other coastal industrial facilities. For most bays, their own resonant periods are close to the periods of tsunami waves, as a result in these bays the tsunami waves show themselves like heavy increase of seiches as primarily.

In the coastal zone and at the shelf infragravity waves are generated due to nonlinear interaction of wind waves and swell, which are responsible for the destruction of the shores. These waves also lead to generation of harbor oscillations as strong reciprocating movements of water in open bays, which lead to collision of vessels with a berth or among themselves, to breaking of mooring lines and to disruption of loading and unloading operations.

Keywords: onshore engineering constructions, safety, wave conditions of waters, storm surge, seiche, infragravity wave.

References

1. *Climate of Yuzhno-Sakhalinsk* [Klimat Yuzhno-Sakhalinska]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982. (Russ.).
2. SHEVCHENKO, G.V., Yu.V. LUYBITSKIY, L.N. KATO. *Manifestations of storm upsurges in the southern part of the Sakhalin island* [Proyavleniye shtormovykh nagonov v yuzhnoy chasti ostrova Sakhalin]: preprint. Yuzhno-Sakhalinsk: Institute of Marine Geology and Geophysics, Far-Eastern branch of RAS, 1994. (Russ.).
3. KATO, E., O.A. MISKOV, G.V. SHEVCHENKO. Storm upsurges at the Sakhalin coastline in the end of the XX century [Shtormovyye nagony na poberezhye ostrova Sakhalin v kontse XX veka]. In: *Dynamic processes offshore Sakhalin and Kuril Islands* [Dinamicheskiye protsessy na shelfe Sakhalina i Kurilskikh ostrovov]: collected papers. Yuzhno-Sakhalinsk, 2001, pp. 160–176. (Russ.).
4. KATO, L.N., Yu.V. LUYBITSKIY, G.V. SHEVCHENKO. Estimation of sea surging extremums at the south-eastern coast of Sakhalin [Otsenka ekstremalnykh znacheniy sgonno-nagonnykh kolebaniy urovnya moray na yugo-vostochnom poberezhye o. Sakhalin]. In: *Fluctuations in sea level* [Kolebaniya urovnya v moryakh]: collected papers. St-Petersburg: Russian State Hydrometeorological University, 2003, pp. 111–128. (Russ.).
5. KOVALEV, D.P. Extremal downsurge at the south-eastern coast of Sakhalin [Ekstremalnyy sgon u yugo-vostochnogo poberezhya o. Sakhalin]. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2013, vol. 6, no. 1, pp. 52–56. ISSN 2073-6673. (Russ.).
6. RABINOVICH, A.B. *Long gravity waves in ocean: capture, resonance, emission* [Dlinnyye gravitatsionnyye volny v okeane: zakhvat, rezonans, izlucheniye]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1993. (Russ.).
7. KOVALEV, P.D. and D.P. KOVALEV. Peculiar features of seiche oscillations in the gulfs and bays of the Far East: at Primorye, Sakhalin, Southern Kuril Islands [Osobennosti seyshevnykh kolebaniy v zalivakh i bukhtakh Dalnego Vostoka: Primorya, Sakhalina, yuzhnykh Kurilskikh ostrovov]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Estestvennyye i tekhnicheskiye nauki*. 2013, vol. 18, iss. 4, pp. 1377–1382. ISSN 1810-0198. (Russ.).
8. KOVALEV, P.D. *Machinery for measuring of ocean long waves* [Tekhnicheskiye sredstva dlya izmereniya dlinnykh voln v okeane]. Vladivostok: Far East branch of RAS 1993. (Russ.).
9. RABINOVICH, A.B. and A.S. LEVYANT. Impact of seiche oscillations to generation of the long wave spectrum nearby the coastal line of the Southern Kuril Islands [Vliyaniye seyshevnykh kolebaniy na formirovaniye spectra dlinnykh voln u poberezhya Yuzhnykh Kuril]. *Okeanologiya*. 1992, vol. 32, no. 1, pp. 29–38. ISSN 0030-1574. (Russ.).
10. ZERNOV, N.V. and V.G. KARPOV. *Theory of radio circuits* [Teoriya radiotekhnicheskikh tsepey]. Leningrad: Energiya, 1972. (Russ.).

11. SHEVCHENKO, G.V., A.G. CHERNOV, P.D. KOVALEV et al. Resonant oscillations in gulfs and bays: full-scale experiments and numerical simulation [Rezonansnyye kolebaniya v zalivakh i bukhtakh: naturnyye eksperimenty i chislennoye modelirovaniye]. *Proc. of Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Ye. Alekseyev (NNSTU)*. 2010, no. 1(80), pp. 52–62. ISSN 1816-210X. (Russ.).
12. MUNK, W.H. Surf beats. *Trans. Amer. Geophys. Union*. 1949, vol. 30, no. 6, pp. 849–854. ISSN 0002-8606.
13. GALLAGHER, B. Generation of surf beat by non-linear wave interactions. *J. Fluid Mech.* 1971, vol. 49, pp. 1–20.
14. KOVALEV, P.D., G.V. SHEVCHENKO and D.P. KOVALEV. Studying wave transformations nearby the southeastern coast of the Sakhalin Island [Issledovaniye transformatsii voln u yugo-vostochnogo poberezhya ostrova Sakhalin]. In: *Proc. of the VI Int. sci.-tech. conference "Contemporary Methods and Means of Oceanologic Studies"*. Moscow: P.P. Shirshov Institute of Oceanology, RAS, 2000, pp. 153–156. (Russ.).
15. KOVALEV, P.D., G.V. SHEVCHENKO, A.A. KURKIN et al. Studying peculiar hydrodynamic conditions of a seashore site adjacent to the Izmenchivoye Lake [Issledovaniye osobennostey gidrodinamicheskikh usloviy prilgayushchego k ozeru Izmenchivoye uchastka vzmorya]. *Izvestiya AIN im. A.M. Prokhorova. Prikladnaya matematika i mekhanika*. Nizhniy Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Ye. Alekseyev, 2007, vol. 20, pp.8–16. ISSN 2307-163X. (Russ.).
16. KRYLOV, Yu.M. (ed.). *Wind, waves and sea ports* [Veter, volny i morskkiye porty]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. (Russ.).
17. BYCHKOV, V.S. and S.S. STREKALOV. *Irregular sea waves* [Morskkiye neregulyarnyye volny]. Moscow: Nauka, 1971. (Russ.).
18. KOVALEV, P.D. Experimental studies of the harbor oscillation phenomenon in the main ports of the Sakhalin Region [Eksperimentalnyye issledovaniya yavleniya tyaguna v osnovnykh portakh Sakhalinskoy oblasti]. *Izvestiya AIN im. A.M. Prokhorova. Prikladnaya matematika i mekhanika*. Nizhniy Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Ye. Alekseyev, 2007, vol. 20, pp. 8–16. ISSN 2307-163X. (Russ.).
19. KOVALEV, P.D., G.V. SHEVCHENKO and D.P. KOVALEV. Studying dangerous sea phenomena in the port of Korsakov town [Izucheniye opasnykh morskikh yavleniy v porty goroda Korsakov]. In: *Dynamic processes offshore Sakhalin and Kuril Islands* [Dinamicheskiye protsessy na shelfe Sakhalina i Kurilskikh ostrovov]: collected papers. Yuzhno-Sakhalinsk, 2001, pp. 138–145. (Russ.).
20. KOVALEV, P.D., G.V. SHEVCHENKO and D.P. KOVALEV. Experimental studies of the harbor oscillation phenomenon in the port of Kholmok town [Eksperimentalnyye issledovaniya yavleniya tyaguna v portu g. Kholmok]. *Izvestiya AIN im. A.M. Prokhorova. Prikladnaya matematika i mekhanika*. Nizhniy Novgorod: Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.Ye. Alekseyev, 2007, vol. 20, pp. 106–112. ISSN 2307-163X. (Russ.).
21. KOVALEV, P.D., G.V. SHEVCHENKO and D.P. KOVALEV. Investigation of the sea level fluctuations in the Yuzhno-Kurilskaya Bay. *Proc. of the 20th International symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice*. Mombetsu, Hokkaido, Japan, 2005, pp. 261–266.