

УДК 551.466.6

Г.В. Шевченко¹, А.Г. Чернов¹, П.Д. Ковалев¹, И.И. Горин²**РЕЗОНАНСНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ЗАЛИВАХ И БУХТАХ:
НАТУРНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ**Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток²,
Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск¹

В сентябре–ноябре 2008 г. в бухте Алексеева на о. Попова (экспериментальная база ТОИ ДВО РАН) на двух донных станциях, установленных на внутренней и прилегающей акваториях, исследованы волновые процессы. Спектральный анализ материалов выявил наличие двух хорошо выраженных пиков на внутренней станции на периодах 10,5 и 2,7 мин, обусловленных резонансными колебаниями в бухте. Методами численного моделирования определена пространственная структура этих колебаний, отвечающих нулевой и первой собственным модам бассейна. Для нулевой моды, период которой соответствует диапазону периодов цунами, показана возможность многократного возрастания высоты волны в удаленной части бухты по сравнению с внешним шельфом. Данный пример подтверждает возможность резонансного усиления цунами в различных бухтах подобного типа.

Ключевые слова: измеритель придонного гидростатического давления, длинные волны, цунами, бухта, резонансные колебания, численное моделирование

Несмотря на большое число работ по исследованию собственных колебаний в заливах и бухтах, из-за большого разнообразия форм колебаний многие особенности их формирования изучены еще недостаточно. В частности, это относится к бухтам с резкими изменениями глубины в районе входа. Примером такого бассейна является бухта Алексеева на о. Попова в районе г. Владивосток. Она сравнительно простой формы, но имеет особенности рельефа в горловине, поэтому представляет собой подходящий объект для исследования. Цунами в районе г. Владивосток (мыс Басаргина, бухта Тихая) в мае 1983 г. достигали высоты 4–5 м [6, 7]. На некоторых участках побережья о. Русский высота заплесков достигала 4 м [3]. Однако в обзоре материалов обследования этих участков подобных высот не отмечалось [6]. Топография береговой черты островов Русский и Попова очень изрезана. Из-за наличия бухт различной конфигурации в некоторых из них периоды резонансных колебаний (сейш) могут оказаться близкими к периодам цунами, подходящих из открытого моря. В этом случае возможны локальные усиления волн, многократно увеличивающие их воздействие на береговые объекты. Однако большие заплески на необжитых участках могли не попасть в поле зрения специалистов, так как первостепенный интерес представляет ущерб хозяйственным объектам.

Штормовые нагоны – это крупномасштабные подъемы уровня, обусловленные падением приземного атмосферного давления и действием касательного напряжения ветра (в случае его ориентации в сторону берега) при прохождении над исследуемой областью циклона или тайфуна. Сгонно-нагонные колебания уровня моря в данном районе достаточно велики, на отдельных участках побережья они также могут значительно усиливаться за счет возбуждения сейш в заливах и бухтах.

Данные вопросы для островов Попова и Русский исследованы слабо, хотя проблема усиления колебаний в бухтах различной конфигурации по сравнению с внешним шельфом представляет значительный научный интерес и имеет выраженный прикладной аспект, связанный с оценкой риска воздействия опасных явлений на участки побережья. Организация натурных экспериментов с прямым измерением характеристик длинноволновых процессов внутри и вне изучаемого бассейна – важнейший элемент при решении подобных задач, осо-

бенно в сочетании с численным моделированием распространения волн, выполняемым с учетом реального рельефа дна и топографии береговой черты.

В связи с этим Институт морской геологии и геофизики (ИМГиГ) ДВО РАН при содействии Тихоокеанского океанологического института (ТОИ) ДВО РАН организовал пробный эксперимент с постановкой в бухте Алексеева на о. Попова двух автономных донных регистраторов волнения и уровня (АРВ), разработанных СКТБ ЭлПА (г. Углич) совместно с сотрудниками Нижегородского государственного технического университета [5]. Выбор места обусловлен тем, что это хороший пример бухты с широким входом и сравнительно простой топографией, на котором можно отчетливо показать эффекты, связанные с усилением колебаний на резонансных частотах. Кроме того, при проведении подобных экспериментов необходимо учитывать такие обстоятельства, как наличие плавсредств для постановки и подъема приборов, а также обеспечение их безопасности. Здесь расположена экспедиционная база ТОИ, благодаря помощи сотрудников которой были решены вопросы организации эксперимента и сохранности датчиков. Помимо этого, в бухте Алексеева ранее были выполнены детальные промерные работы, что позволяло использовать результаты батиметрической съемки для численного моделирования волновых процессов.

Записи продолжительностью около двух месяцев позволили детально рассмотреть усиление длинноволновых колебаний в бухте по сравнению с внешним шельфом, характер изменчивости спектра длинных волн при различных погодных условиях и таким образом оценить возможное влияние резонансных условий объекта при воздействии опасных явлений.

1. Организация эксперимента и характеристика полученных материалов

Бухта Алексеева расположена в северо-западной части о. Попова, представляет собой бассейн почти прямоугольной формы протяженностью около 1600 м, максимальной шириной около 600 м. Широкий вход ориентирован в Амурский залив, глубины в кутовой части сравнительно небольшие (3–8 м), но резко увеличиваются по мере приближения к горловине. Для водоемов подобной формы характерно интенсивное проявление нулевой моды собственных колебаний, четверть длины которой укладывается в бухте, а узловая линия находится вблизи входа [8, 9]. Одноузловая продольная сейша, обычно играющая важную роль в формировании колебаний уровня в заливах, вряд ли может быть существенной в данном случае из-за слабого отражения на открытой границе.



Рис. 1. Батиметрическая карта района проведения работ.

Врезка – батиметрическая карта бухты Алексеева:

♦ – размещение автономных регистраторов волнения и уровня

Инструментальные измерения начались 18 сентября 2008 г. и производились с частотой 1 Гц, погрешность составляла 6 см. Приборы были выставлены при помощи моторной лодки в двух точках: С – в кутовой части ($42^{\circ}59,0'$ с.ш., $131^{\circ}43,7'$ в.д.) на глубине около 5 м; F – на внешнем шельфе, на некотором удалении от открытой границы бухты ($42^{\circ}59,4'$ с.ш., $131^{\circ}42,8'$ в.д.) на глубине около 25 м (рис. 1). Расстояние между станциями составило около $0,9'$ по долготе и $0,4'$ по широте, или примерно 1136 м по прямой. Приборы подняты 23 ноября 2008 г. и заменены новыми для продолжения исследований в зимних условиях.

Таким образом, получены записи волновых процессов продолжительностью чуть более двух месяцев осеннего сезона, для которого типично усиление вариаций приземного атмосферного давления и возрастание скорости ветра. Поэтому можно было рассчитывать на выявление интересных особенностей волнового режима в бухте и на подходах к ней в различных погодных условиях.

Основное внимание в данной работе уделено длинноволновым процессам, в частности резонансным колебаниям уровня в бухте – сейшам. Для их выделения из материалов измерений с дискретностью 1 с, содержащих ветровое волнение, данные осреднялись с временным окном 1 мин и весовыми коэффициентами фильтра Кайзера–Бесселя. Это позволяет уменьшить погрешность одного отсчета до $0,1$ см и снизить влияние волнения, которое может быть весьма значительным при стандартном прямоугольном фильтре. Исследованию характеристик ветрового волнения внутри и вне бухты, которое возможно на основе измерений придонного давления [2], предполагается посвятить отдельную работу.

В записях доминировали приливные колебания уровня, хотя в данном районе они сравнительно невелики, их характерный размах составлял 25–30 см. Устойчивая регистрация приливных вариаций, а также надежная оценка гармонических постоянных основных приливных волн, подтверждаемая сравнением с известными оценками для этого участка, являются индикатором высокого качества исследования. В остаточных рядах, полученных путем вычитания из исходных значений предвычисленного прилива, периодическая компонента не проявляется (рис. 2).

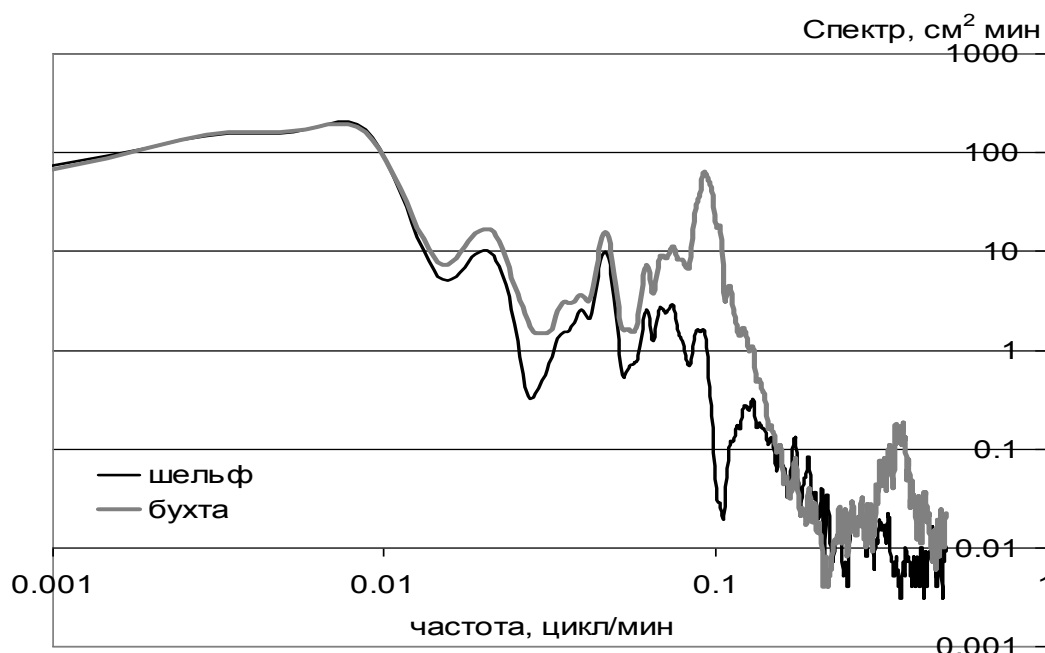


Рис. 2. Графики спектральной плотности колебаний на станциях С (1) и F (2), рассчитанные по отрезкам записи в спокойную погоду 20–21 октября 2008 г. и в штормовую 17–18 ноября 2008 г. Число степеней свободы равно 22

На фоне приливов не наблюдается сколько-нибудь значимых сгонно-нагонных вариаций уровня, очевидно, погодные условия в период измерений были стабильны, над районом

не проходили глубокие циклоны или тайфуны, которые вызвали бы существенный штормовой нагон. Наиболее выраженные отклонения волнового режима от стационарного наблюдались во второй декаде октября.

2. Анализ материалов натуральных экспериментов

Из записей непериодических колебаний уровня моря для детального спектрального анализа отобраны пять синхронных отрезков продолжительностью 2 сут.: за 20–21 сентября, 7–8, 20–21 и 22–23 октября, 17–18 ноября. Интенсивность волновых процессов в эти периоды заметно различалась, что, скорее всего, обусловлено погодными условиями, так как основным источником непериодических колебаний является воздействие на морскую поверхность переменного приземного атмосферного давления и напряжения ветра. По этим отрезкам рассчитывались спектральные и взаимоспектральные характеристики записей. Рассмотрим более подробно две ситуации: 20–21 октября и 17–18 ноября, когда различия спектральных характеристик проявились в наибольшей степени.

Первая из них отвечала самому низкому уровню энергии колебаний в диапазоне периодов проявления цунами (от 2 мин до 2 ч), которому в данной работе уделялось основное внимание. Вероятно, это было обусловлено спокойными погодными условиями, хотя измерения метеорологических параметров не делались, и данное утверждение не является точным. Расчеты производились по отрезку длительностью 8 ч с половинными сдвигами, число степеней свободы 22.

Значения спектральной плотности по измерениям внутри бухты существенно выше, чем на более мористой станции. В наибольшей степени это проявилось на периодах 2,5–3 мин, 8–12 мин и 25–60 мин. Особенно значимое различие отмечено на периодах наиболее выраженного пика (10,5 мин) и двойного пика в высокочастотной части спектра (2,6–2,8 мин). Примечательно, что на периоде 10,5 мин в спектре колебаний на удаленной станции также отмечен слабый максимум, при этом уже на периоде 10 мин – глубокий минимум. Скорее всего, последний экстремум отвечает нулевой моде собственных колебаний бухты, он может иметь отклик в прилегающей акватории – аналогичный эффект наблюдался, например, в Малокурильской бухте на о. Шикотан [1]. Причем в бассейне с широким входом, к которому относится рассматриваемый объект, это особенно вероятно. Для собственных мод, имеющих узловые линии внутри бухты, связь с открытым морем обычно отсутствует, и на периоде максимума около 2,7 мин на внешней станции нет никакого, даже слабого, пика.

В спектрах колебаний на обеих станциях имеется также хорошо выраженный максимум с периодом около 20,5 мин. Этот период слишком большой, чтобы быть связанным с собственными колебаниями бухты. Вероятно, он зависит от резонансных условий прилегающего участка шельфа (так называемой шельфовой сейшей, когда стоячие колебания образуются в результате отражения волн от берега и кромки шельфа).

На внешней станции отмечен хорошо выраженный пик с периодом около 48 мин, однако внутри бухты, где уровень энергии колебаний существенно выше в диапазоне 25–60 мин, данный максимум выделяется в меньшей степени. Скорее всего, он связан с одноузловой поперечной сейшей Амурского залива.

Можно также отметить слабый максимум с периодом около 2 ч.

Функция когерентности имеет высокие значения в диапазонах периодов 100–120; 20–21; 10,5–16; 6–8 и 3,5–4 мин (рис. 3). Весьма примечателен резко выраженный минимум на периодах 9–10 мин, на котором было выявлено существенное различие в спектрах колебаний на разных станциях.

Фазовый спектр на периодах более 20 мин практически не имеет наклона, который бы указывал на распространение длинных волн от внешней станции к внутренней (рис. 3). Слабый наклон отмечен на периодах от 10 до 20 мин, но оценить по нему фазовую скорость затруднительно, так как когерентность на данном участке недостаточно высокая. На периоде

главного максимума (10,5 мин) фаза составляет около $7\pi/4$, затем на периоде 10 мин скачком меняется на π , после чего скорость распространения длинных волн несколько увеличивается.

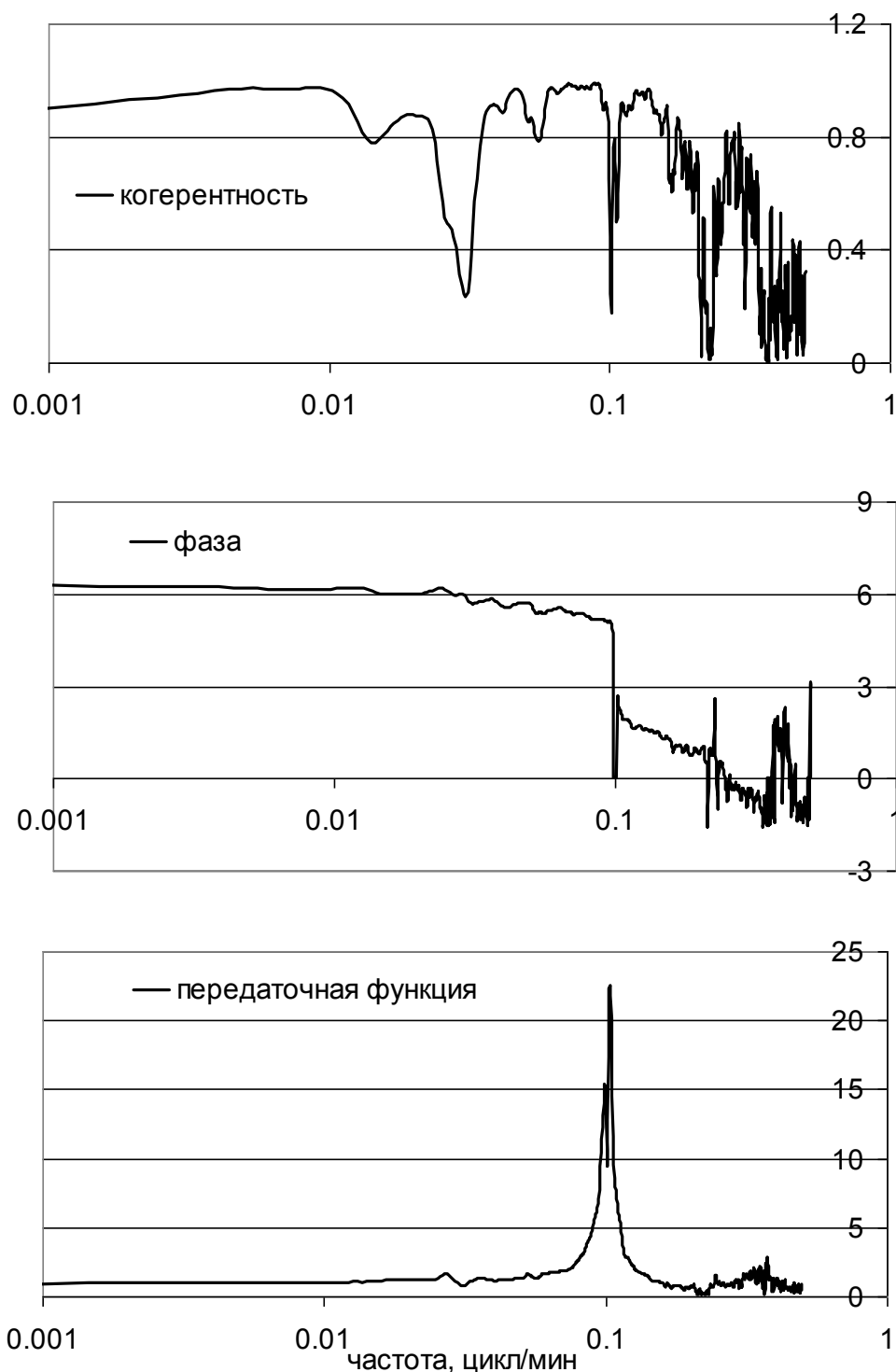


Рис. 3. Когерентность фазовый сдвиг (в радианах) и передаточная функция от станции F к C в спокойную погоду 20–21 октября 2008 г

Наибольший интерес представляет передаточная функция, отражающая среднее по анализируемой записи изменение амплитуды колебаний на внутренней станции по сравнению с внешней. Здесь резко выделяется двоянный максимум на периодах около 10,5 и 10 мин, от-

вечающий нулевой моде собственных колебаний бухты Алексеева. Усиление на периоде главного максимума очень велико, примерно вдвое выше, чем на периоде основной моды собственных колебаний Малокурильской бухты [1]. Здесь рельефно проявляются различия между нулевыми модами колебаний для бухт с узким и широким входами. Для случая узкого входа колебания в бухте определяются соотношением между площадью ее зеркала и поперечным сечением в горловине, и пространственные вариации амплитуды на внутренней акватории сравнительно невелики. Для бухт с широким входом (а именно к таким относится бухта Алексеева) характерно значительное увеличение амплитуды колебаний по мере удаления от открытой границы внутрь бассейна, и в его кутовой части возможно резкое усиление цунами.

На периодах, отвечающих максимумам в спектре на внутренней станции с периодами 2,6–2,8 мин, коэффициенты усиления составляли 2,9 и 3,2 соответственно.

При усилении колебаний в штормовую погоду 17–18 ноября наблюдались заметные различия спектральных и взаимоспектральных характеристик записей (рис. 2, б, 3). Значительно вырос уровень энергии колебаний на обеих станциях, в особенности на периоде высокочастотного максимума на С – в данном случае выделяется один максимум на периоде около 2,7 мин, и значение спектральной плотности в 30 раз выше, чем при спокойной погоде. Для сравнения: на периоде 10,5 мин отмечено увеличение примерно в шесть раз.

На периодах более 20 мин различие в спектрах между ближней и удаленной станциями, по сравнению с рассмотренным выше случаем, значительно уменьшилось, при этом максимум на периоде около 48 мин стал более выраженным, в особенности внутри бухты. Максимум с периодом около 20,5 мин, как и ранее, четко выделяется на спектрах обеих станций.

Значения функции когерентности значительно возросли при штормовых условиях, особенно в низкочастотной области, где по данным на 20–21 октября наблюдался значительный минимум (рис. 3). Резко выраженные минимумы когерентности сохранились, но стали более узкими (периоды 4,5–5; 9–10 и 30–40 мин).

Существенно изменился по сравнению со спокойной погодой и фазовый спектр (рис. 3). Заметный наклон отмечен на периодах от 10 до 60 мин, где ранее практически отсутствовал. Несмотря на провал функции когерентности в отмеченном выше диапазоне периодов, оцененная скорость распространения волн между станциями по формуле

$$c = L (\omega_2 - \omega_1) / (\varphi_2 - \varphi_1),$$

где L – расстояние между станциями (1136 м), φ_i и ω_i – значения фазы и частоты для двух точек фазового спектра. Для указанного интервала получаем значение фазовой скорости около 14,4 м/с, что отвечает скорости длинных волн в акватории со средней глубиной около 20 м, это неплохо согласуется с реальными глубинами в изучаемом районе. На периоде около 10 мин сдвиг фаз резко изменяется и становится равным нулю, затем также резко возрастает до $3\pi/4$, и далее наклон линии фазового спектра заметно увеличивается, что отвечает уменьшению фазовой скорости до 13,6 м/с. Эти различия могут быть обусловлены длинноволновой дисперсией, а также, что на наш взгляд более вероятно, вариациями направления распространения длинных волн из области открытого моря в сторону бухты при спокойных и штормовых условиях, особенно заметными в диапазоне периодов 3–10 мин (исключая неустойчивые значения фазового сдвига в диапазоне периодов, отвечающего провалу функции когерентности). На периоде высокочастотного максимума на внутренней станции сдвиг фаз составляет $\pi/2$.

Структура передаточной функции практически не изменилась по сравнению со спокойными погодными условиями, лишь немного увеличилось значение коэффициента усиления на периоде главного максимума (рис. 3).

В остальных рассмотренных ситуациях спектральные характеристики занимали промежуточное положение. Так, значения функции когерентности по измерениям 20–21 сентября и 22–23 октября были выше, чем 20–21 октября, но ниже, чем 17–18 ноября. Наклоны фазового спектра при спокойной погоде также были наименьшими, а при штормовой – наиболее крутыми.

3. Численное моделирование длинноволновых колебаний

Для изучения пространственной структуры резонансных колебаний в бухте Алексеева было выполнено численное моделирование длинноволновых процессов на всей акватории Амурского залива. Необходимость этого связана с тем, что при исследовании нулевой моды собственных колебаний нельзя ограничиться моделированием волновых процессов только во внутренней акватории. Помимо этого значительный интерес представляла интерпретация натуральных наблюдений резонансных пиков на периодах 20,5 и 8 мин. Использовалась численная модель на основе уравнений мелкой воды, записанных в декартовых координатах [4]:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

где η – смещение уровня моря; D – полная глубина бассейна; g – ускорение силы тяжести; n – коэффициент шероховатости дна. В расчетах принималось значение $n = 0,0025 \text{ м}^{-1/3}\text{с}$, характерное для естественного дна (песок, мелкая галька). M и N – компоненты расхода воды (интегрированного по глубине) вдоль широтного и меридионального направлений соответственно:

$$M = u(h + \eta), \quad (4)$$

$$N = v(h + \eta), \quad (5)$$

где u и v – компоненты горизонтальных скоростей частиц воды.

Использовалась конечно-разностная реализация данной модели, входящая в состав исследовательского комплекса NAMI-DANCE [4], предназначенного для моделирования цунами и являющегося модификацией известного японского кода TUNAMI. Комплекс был доработан для решения задач моделирования свободных колебаний в заливах и бухтах.

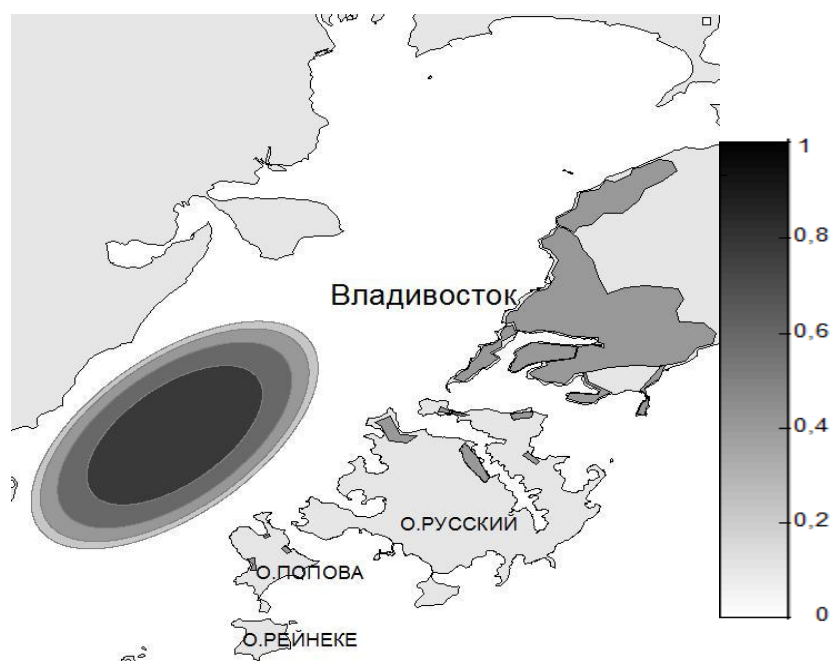


Рис. 4. Начальное возмущение при моделировании длинноволновых процессов в исследуемом районе

Для расчетов использовался метод вложенных сеток, внутри бухты пространственный шаг составлял 25 м. Надежно определить характеристики расчетных волн можно для периодов, превышающих тот, при котором шаг сетки равен половине длины волны при минимальной глубине моря 0,5 м, что составляет около 20 с. Для моделирования волновых движений в Амурском заливе использовался шаг 150 м. В качестве начальных условий для модели задавалось положительное возвышение водной поверхности эллиптического типа:

$$\eta(x, y, t = 0) = H \sqrt{1 - \frac{x^2}{(x_0 - d_1)^2} - \frac{y^2}{(y_0 - d_2)^2}}, \quad (6)$$

расположенное в центре Амурского залива с максимальной высотой 0,5 м (рис. 4). На морских границах (проливах) ставилось условие свободного ухода, точное в рамках линейной теории мелкой воды, простейшей геометрии и отсутствия диссипации:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \sqrt{gh} \frac{\partial \eta}{\partial n} = 0. \quad (7)$$

Пространственная производная от уровня вычисляется по нормали к внешней границе расчетной области. На береговой границе (на глубине 0,5 м в последних морских точках) задавалось условие полного отражения:

$$u = 0 \text{ или } \frac{\partial \eta}{\partial n} = 0. \quad (8)$$

Временной шаг для расчета выбирался из условия Куранта для конечно-разностных схем:

$$\frac{\Delta x}{\Delta t}, \frac{\Delta y}{\Delta t} > \sqrt{gh_{\max}}, \quad (9)$$

где Δx и Δy – шаг расчетной сетки по осям x и y (в наших расчетах расстояния между узлами сетки по оси x и y одинаковые); Δt – шаг по времени; h_{\max} – максимальная глубина бассейна. Была задана равномерная сетка цифровых мареографов – точек, в которых сохранялось возвышение свободной поверхности воды η на каждом шаге по времени. Мареографы устанавливались на глубинах более 2 м. Необходимо отметить, что глубины в бухте Алексеева, несмотря на ее симметричную форму, распределены неравномерно, и северо-восточная часть имеет меньшую глубину, чем юго-западная. Из-за этого на рисунках с пространственным распределением спектральных амплитуд наблюдается некоторое смещение пучностей к юго-западному берегу бухты.

Расчет проводился на 12 ч реального времени. С целью уменьшения влияния начального источника из расчетных волнограмм удалялась «первая волна», рассматривались только хвостовые отрезки записей. Записи цифровых мареографов приводились к секундной дискретности, и для каждой рассчитывалась оценка спектральной плотности. Размер окна выбирался исходя из гипотезы об ожидаемых периодах собственных колебаний. Для представленных результатов размер окна составлял 2048 с (~34 мин). Оценки сравнивались с результатами спектрального анализа натуральных данных в соответствующих точках (F и C). По результатам численного моделирования также были выделены резонансные пики в спектре на периодах около 10 и 2,7 мин, для наиболее наглядного представления пространственной структуры этих собственных мод вычислялась средняя спектральная амплитуда

$$\bar{A}^2(\omega_j) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} S(\omega) d\omega, \quad (10)$$

где $S(\omega)$ – рассчитанная спектральная плотность; ω_j – резонансная частота; $\omega_{1,2} = \omega_j \pm \Delta$ – окрестность пика. Интегрирование проводилось численно, методом трапеций по пяти соседним точкам.

Пространственное распределение средней амплитуды колебаний для основного пика с периодом 10,5 мин показано на рис. 5, а. Из рисунка видно, что оно хорошо согласуется с представлениями о структуре колебаний нулевой моды резонансных колебаний в бухте с широким входом – узловая линия находится вблизи открытой границы (несколько смещена во внешнюю часть акватории), станция F – на незначительном удалении от нее. Наблюдается значительная интенсивность колебаний во внутренней части бухты. Именно здесь можно ожидать наиболее резкого роста высот волн цунами, если их период будет близок к 10 мин, что весьма вероятно. Таким образом, экспедиционная база ТОИ находится в наиболее опасном месте бухты.

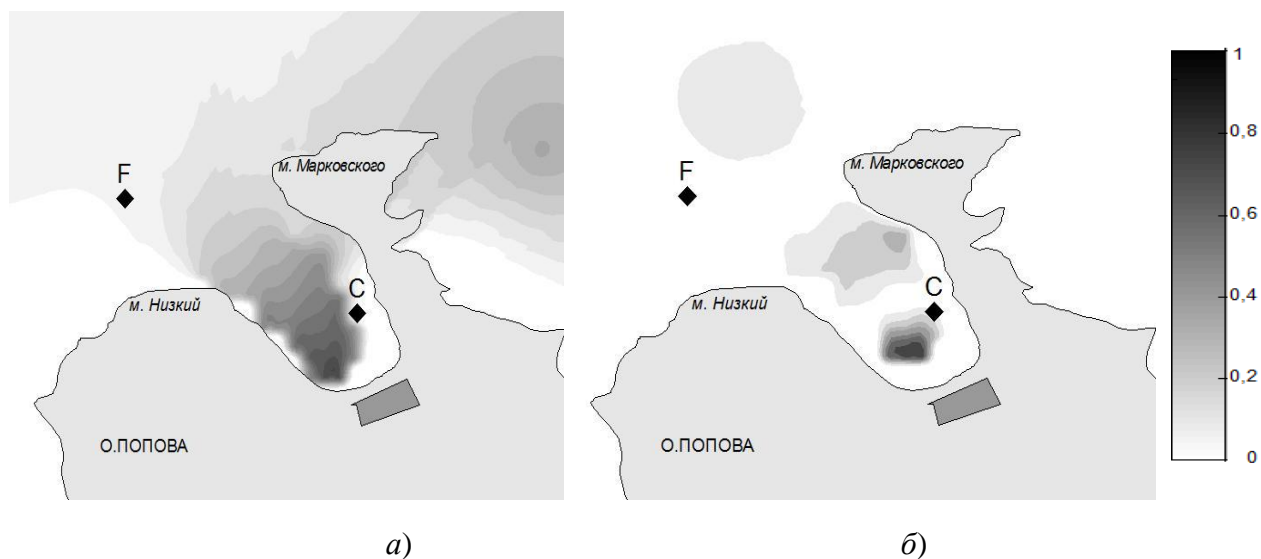


Рис. 5. Пространственное распределение средней амплитуды колебаний для резонансных периодов 10,5 (а) и 2,7 мин (б)

На данном периоде выделяется еще одна область с заметным усилением интенсивности колебаний, расположенная на небольшом удалении от исследуемой бухты, в проливе между островами Русский и Попова. Вероятность некоторой связи между колебаниями в проливе и бухте существует, однако определить ее характер по результатам только вычислительного эксперимента нам не удалось.

Пространственная структура средней амплитуды для резонансного периода 2,7 мин выглядит несколько необычно. Данная мода имеет две пучности: одна, более выраженная, расположена в глубине бухты, ближе к ее южному приглубому берегу, вторая, более слабая, – к северу от нее, в районе изгиба линии берега. Узловая линия одна, она имеет ориентацию восток–северо-восток – запад–юго-запад. Таким образом, указанный период отвечает одноузловой сейше бухты, правда, ее сложно назвать продольной или поперечной, так как в некотором смысле ее структура соответствует стоячим колебаниям по диагонали бухты. Станция С расположена в зоне с умеренной интенсивностью колебаний, следовательно, в точках к югу и юго-западу амплитуды волн могут быть значительно выше. Вероятность возбуждения цунами на периоде 2,7 мин мала, скорее всего, эти колебания могут заметно усиливаться в штормовую погоду.

Заключение

В результате анализа материалов измерений волновых процессов, полученных в сентябре–ноябре 2008 г. в бухте Алексева (о. Попова), выявлено наличие двух хорошо выраженных пиков на внутренней станции на периодах 10,5 и 2,7 мин. Эти пики обусловлены резонансными колебаниями данного бассейна – соответственно нулевой и первой моды. На станции, установленной на внешнем шельфе, присутствует слабый пик на периоде 10,5 мин, более высокочастотный пик отсутствует.

Методами численного моделирования исследована пространственная структура этих колебаний, имеющих узловые линии на открытой границе и посередине бухты, и пучности в ее кутовой части. Доказана возможность существования продольной одноузловой сейши между входом и удаленной частью бухты в полуоткрытых бассейнах, когда градиент глубин на открытой границе ограничивает излучение волновой энергии в океан.

Для нулевой моды, период которой отвечает диапазону периодов цунами, подтверждена возможность многократного (в 8-10 раз) усиления высоты волны в удаленной части бухты по сравнению с внешним шельфом. Таким образом, если подходяще цунами представляет собой цуг волн с периодом около 10 минут и амплитудой 20 см, она представляет реальную опасность для расположенных на берегу бухты объектов.

Возбуждение при цунами более высокочастотной первой моды резонансных колебаний представляется маловероятным, их эффективная генерация может быть связана с интенсивным ветровым волнением [8, 9]. На это указывает значительное, примерно в 30 раз, увеличение уровня спектральной плотности на периоде 2,7 мин при усилении волнения 17-18 ноября по сравнению со спокойными погодными условиями. Для сравнения, на периоде основной моды уровень энергии колебаний вырос в 6 раз, таким образом, при штормовых ситуациях могут возбуждаться обе моды собственных колебаний, но вклад более высокочастотной составляющей существенно выше.

СКБ САМИ А.И. Зайцеву за помощь в расчетах.

Работа Авторы благодарны заместителю директора В.Б.Лобанову и начальнику экспериментальной базы П.С.Зимину (ТОИ ДВО РАН) за поддержку и помощь в организации исследований, а также заведующему лабораторией вычислительной гидродинамики выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ 09-05-00591-а, 09-05-00971-а, 09-05-90706-моб_ст, 09-05-91222-СТ_a.

Библиографический список

1. Джумагалиев, В.А. Теоретическая и экспериментальная оценка передаточных особенностей побережья Малокурильской бухты, о. Шикотан / В.А. Джумагалиев, А.Б. Рабинович, И.В. Файн // Изв. АН. Физика атмосферы и океана. 1994. Т. 30. № 5. С. 711–717.
2. Опыт эксплуатации волнографа-мареографа ВМ-04 / И.М. Кабатченко [и др.] // Океанология. 2007. Т. 47/ № 1. С. 150–155.
3. Геолого-географические, экологические и культурно-исторические предпосылки освоения и развития территории острова Русский в связи с подготовкой проведения форума АТЭС и последующей эксплуатацией территории / Г.Л. Кофф [и др.]. – М.: ВСЕГЕИ, 2008. – 109 с.
4. Модифицированный вычислительный комплекс «ЦУНАМИ» для оценки рисков, связанных с цунами / А.А. Куркин [и др.] // Известия АИН. Прикладная математика и механика. 2004. Т. 9. С. 88–100.
5. Проблемы создания аппаратно-программного комплекса для исследования гидродинамики шельфовой зоны / А.О. Лухнов [и др.] // Изв. АИН. Прикладная математика и механика. 2006. Т. 18. С. 120–123.
6. Полякова, А.М. Характеристика процессов волнения в заливе Петра Великого // Современное состояние и тенденции изменения природной среды залива Петра Великого Японского моря / А.М. Полякова. – М.: ГЕОС, 2008. С. 110–133.

7. **Полякова, А.М.** Цунами в Приморье 26 мая 1983 года и его последствия / А.М. Полякова. – Владивосток: ТОИ ДВНЦ, 1988. – 40 с.
8. **Рабинович, А.Б.** Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение / А.Б. Рабинович. – Л.: Гидрометеиздат, 1993. – 240 с.
9. **Rabinovich, A.B.** Seiches an harbor oscillations // Handbook of Coastal and Ocean Engineering; ed. Y.C. Kim. Chapter 9, World Scientific Publ., Singapoure, 2009. P. 193–236.

*Дата поступления
в редакцию 29.01.2010*

G.V. Shevchenko, A.G. Chernov, P.D. Kovalev, I.I. Gorin

**RESONANT OSCILLATIONS IN GULFS AND BAYS:
NATURAL EXPERIMENTS AND NUMERICAL MODELLING**

Wave processes measurements were carried out in the Alekseeva Harbor on the Popova Island (where experimental base of POI FEB RAS is located) during September-November of 2008. Two bottom stations were installed inside and outside the harbor area. Spectral analysis of obtained data discovered the existence of two well-expressed peaks on the station which placed inside the Alekseeva harbor with periods 10,5 and 2,7 min. They are caused by resonant harbor oscillations. Spatial structure of these oscillations which correspond to zeroth and first harbor resonant modes were studied by numerical modeling. For the zeroth mode oscillation, which period is typical for tsunami, possibility of wave height multiply amplification in the inner part of the harbor in comparison with adjacent shelf was shown. The possibility of resonant tsunami amplification in the different harbors of the Vladivostok's near shore area was demonstrated by this example.

Key words: bottom pressure gauge, long waves, tsunami, harbor, resonant oscillations, numerical modeling.