

УДК 551.466.66

О расчете сейшевых колебаний средней части залива Петра Великого*

С.В. Смирнов

Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, ул. Радио, 5, Владивосток, 690041

E-mail: smirnov@iacp.dvo.ru

Смирнов С.В. О расчете сейшевых колебаний средней части залива Петра Великого // Сиб. журн. вычисл. математики / РАН. Сиб. отд-ние. — Новосибирск, 2014. — Т. 17, № 2. — С. 203–216.

С применением спектрально-разностной модели рассмотрены характеристики баротропных сейшевых колебаний средней части залива Петра Великого Японского моря. Модель основана на линеаризованной системе уравнений мелкой воды. Разностная аппроксимация выполнена на нерегулярной треугольной пространственной сетке. Численный метод включает решение задачи на собственные значения и позволяет непосредственно получить набор частот и соответствующих форм сейшевых колебаний. Сетка расчетной области покрывает исследуемые акватории и в ряде расчетов включает Японское море. Наиболее подробно на сетке описаны акватории бухты Золотой Рог и бухты Алексева. Вычислены и представлены пространственно-временные характеристики ряда сейшевых колебаний, соответствующих хорошо выраженным максимумам энергетического спектра для данных измерений уровня моря с поста «Владивосток» российской службы предупреждения о цунами. Результаты расчетов для акватории бухты Алексева острова Попова сравнивались с данными натурных измерений и результатами решения задачи Коши.

Ключевые слова: *сейши, резонансные колебания.*

Smirnov S.V. On calculation of seiche oscillations of the middle part of Peter the Great Gulf // Siberian J. Num. Math. / Sib. Branch of Russ. Acad. of Sci. — Novosibirsk, 2014. — Vol. 17, № 2. — P. 203–216.

Characteristics of barotropic seiche oscillations of the middle part of Peter the Great Gulf are considered with the use of spectral-finite difference model. The model is based on the linearized system of shallow water equations. Difference approximation is carried out on an irregular triangular spatial mesh. The numerical method involves the solution of the eigenvalue problem and is able to directly obtain a set of frequencies and the corresponding forms of seiche oscillations. The grid computational domain covers the Amurskiy gulf and the Ussuriyskiy gulf. The Zolotoy Rog bay and the Alekseev bay are described in more detail on the grid. The calculated and presented spatial-temporal characteristics of a number of seiche oscillations corresponding to well-defined peaks of the energy spectrum of the sea level data from the station “Vladivostok” of the Russian of tsunami warning service. The results of calculations for the Alekseev bay are compared to the data of natural measurements and the solutions of the Cauchy problem.

Key words: *seiches, harbour oscillations.*

1. Введение

Сейши представляют собой свободные колебания жидкости в замкнутом или полужамкнутом водоеме [1]. Сейши в заливах и бухтах могут представлять опасность для

*Работа выполнена при поддержке РФФИ и ДВО РАН (проекты № 13-01-12043, № 12-I-II-18-03, № 12-I-II-23-02, № 12-I-II-15-04 и № 12-III-A-03-038).

прибрежных инженерных сооружений и населения. Сейшевые колебания играют определяющую роль во многих процессах прибрежной волновой динамики, таких как кратковременные затопления прибрежной зоны, формирование и перестройки прибрежного и донного рельефа, изменчивость вдольбереговых течений и др. Они являются важной компонентой движений воды, производимых циклонами, движущимися в прибрежной зоне океана. При резком изменении или быстром перемещении аномалии атмосферного давления возможно образование метео-цунами. Свойства сейшевых колебаний определяются формой береговой черты, глубиной водоема и его географическим расположением. К настоящему времени выполнено большое количество натуральных, лабораторных и теоретических исследований поведения сейшевых колебаний в различных водоемах мира [2]. Тем не менее, особенности сейшевых колебаний во многих конкретных заливах и бухтах, отличающихся сложной формой рельефа дна и береговой черты, изучены еще недостаточно. В частности, это относится к заливу Петра Великого в северо-западной части Японского моря, где находятся многие порты тихоокеанского побережья России. Крупнейший из них — Владивосток занимает всю акваторию пролива Босфор Восточный и бухт, вдающихся в его берега, а также часть акватории Амурского залива. Северо-западный берег Японского моря подвержен цунами, возникающими в различных сейсмоактивных зонах Тихого океана, а также в Японском море. Необходимо изучение свойств резонансных колебаний в различных заливах и бухтах, которые могут возбуждаться проходящими волнами цунами.

В данной работе изложены основные положения применяемого численного метода, который включает решение задачи на собственные значения в линейной постановке и позволяет непосредственно получить набор частот и соответствующих форм сейшевых колебаний. Описано построение треугольной сетки со сгущениями в заданных районах счетной области. При проведении численных расчетов основное внимание уделено проявлениям сейшевых колебаний средней части залива Петра Великого в бухте Золотой Рог и бухте Алексева острова Попова. В бухте Золотой Рог, вдающейся в северный берег пролива Босфор Восточный, расположен автоматизированный пост сети наблюдения за уровнем моря российской службы предупреждения о цунами [3]. В бухте Алексева расположена экспедиционная база ТОИ ДВО РАН. Дно бухты является объектом мониторинга [4]. Эта бухта была выбрана в работе [5] как хороший пример бухты с широким входом и сравнительно простой топографией, на котором можно отчетливо показать эффекты, связанные с усилением колебаний на резонансных частотах.

2. Описание метода расчета сейш

Запишем линеаризованную относительно основного состояния покоя систему уравнений мелкой воды в сферической системе координат:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - fv = -\frac{g}{a \cos \phi} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + fu = -\frac{g}{a} \frac{\partial \eta}{\partial \phi}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{a \cos \phi} \left(\frac{\partial Hu}{\partial \lambda} + \frac{\partial Hv \cos \phi}{\partial \phi} \right) = 0. \quad (3)$$

Здесь и далее a — средний радиус Земли; λ и ϕ — географические долгота и широта; t — время; g — ускорение свободного падения; H — глубина невозмущенного слоя жидкости; f — параметр Кориолиса; u и v — компоненты вектора скорости по направлениям

λ и ϕ соответственно; ζ — возвышение свободной поверхности над невозмущенным положением. Положим $f = 2\Omega \sin \phi_0$, где ϕ_0 — некоторое фиксированное значение широты, Ω — угловая скорость вращения Земли. Уравнения (1)–(3) можно получить, например из уравнений теории приливов [6], отбросив слагаемые потенциала приливообразующих сил. Обозначим компоненты внешней нормали к боковой границе Γ переменными n^λ и n^ϕ . На твердой вертикальной границе Γ запишем условие непротекания

$$n^\lambda u|_\Gamma + n^\phi v|_\Gamma = 0. \quad (4)$$

Далее предполагается, что все переменные подчиняются гармоническому закону по времени:

$$\zeta(\lambda, \phi, t) = \eta(\lambda, \phi) \exp i\sigma t, \quad u(\lambda, \phi, t) = U(\lambda, \phi) \exp i\sigma t, \quad v(\lambda, \phi, t) = V(\lambda, \phi) \exp i\sigma t, \quad (5)$$

где σ — частота колебаний. Подставив выражения из (5) в (1)–(3) и исключив переменные U и V , получим известное уравнение для переменной η :

$$\sigma^3 \eta - f^2 \sigma \eta + \sigma \frac{g}{a^2 \cos \phi} \left(\frac{\partial}{\partial \lambda} \left(H \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} \right) + \frac{\partial}{\partial \phi} \left(H \cos \phi \frac{\partial \eta}{\partial \phi} \right) \right) - if \frac{g}{a^2 \cos \phi} \left(\frac{\partial H}{\partial \lambda} \frac{\partial \eta}{\partial \phi} - \frac{\partial H}{\partial \phi} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} \right) = 0. \quad (6)$$

Реализация расчета сейшевых колебаний на треугольной сетке во многом аналогична изложенной в работе [7], где рассматривался случай приближения f -плоскости. Опишем пространственную дискретизацию задачи на треугольной сетке. Размещение сеточных узлов показано на рис. 1(а). Узлы сеточной функции η_n , обозначенные символом \blacksquare ,

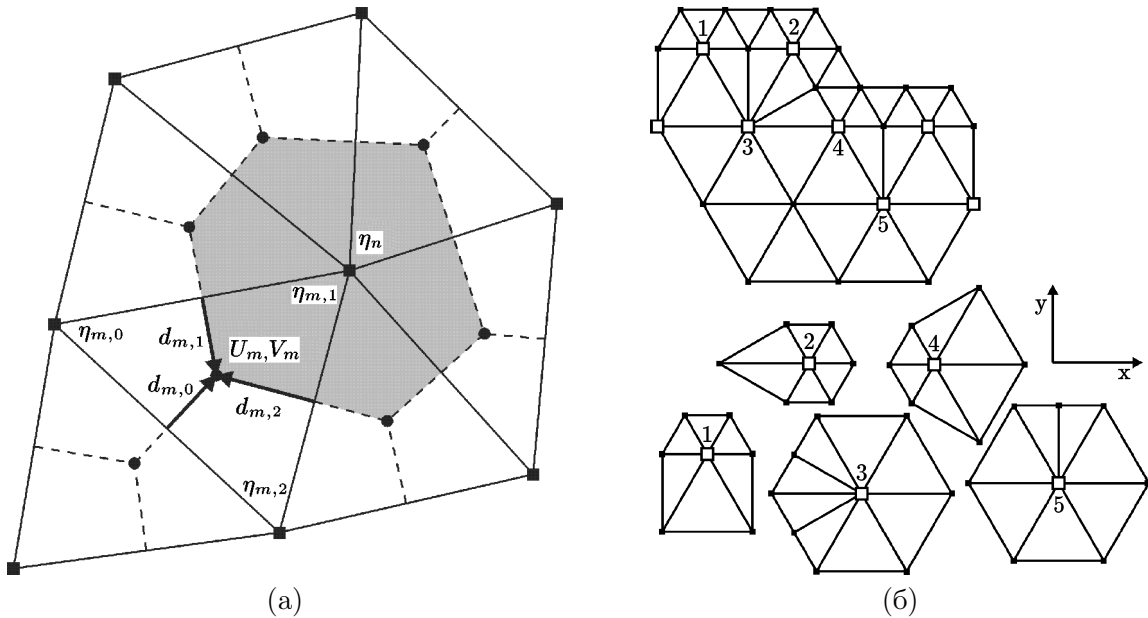


Рис. 1. (а) размещение узлов U_m , V_m и η_n на сферическо-геодезической треугольной сетке; (б) сеточные шаблоны в отдельных узлах переходной области

расположены в вершинах сферических треугольников с координатами (λ_n, ϕ_n) , узлы сеточных функций U_m и V_m , обозначенные символом \bullet , расположены в центрах описанных около треугольников окружностей с координатами (λ_m, ϕ_m) .

Обозначим Δ_m — площадь треугольника с номером m . Обходя контуры треугольников по часовой стрелке, последовательно пронумеруем целыми индексами 0, 1 и 2 вершины и середины сторон треугольника. Полагаем, что на середине стороны треугольника между вершинами с индексами 2 и 0 расположена точка с индексом 0. Если, например, j — значение индекса некоторой вершины, значения индексов предыдущей и последующей вершин равны $|j-1|_3$ и $|j+1|_3$ в терминах арифметических операций по модулю 3. Обозначим значения номера узла n и сеточной функции η_n в вершине j треугольника с номером m переменными $n_{m,j}$ и $\eta_{m,j}$ соответственно. Например, на рис. 1(а) переменные η_n и $\eta_{m,1}$ относятся к одному узлу и, следовательно, имеют одинаковые значения. В серединах сторон треугольника m зададим три вектора $d_{m,k} = (d^\lambda, d^\phi)_{m,k}$ — касательные к дугам больших окружностей, соединяющим середины сторон треугольника с индексами k с узлом скорости m и равные по величине длинам соответствующих дуг. Вектор $d_{m,k}$ будем применять как внутреннюю нормаль к стороне k для треугольника m . Спектрально-разностные аналоги уравнений (1) и (2) запишем в следующем виде:

$$i\sigma U_m - fV_m = -\frac{g}{\Delta_m} \sum_{j=0}^2 \eta_{m,j} \left(d_{m,|j+1|_3}^\phi - d_{m,j}^\phi \right), \quad (7)$$

$$i\sigma V_m + fU_m = -\frac{g}{\Delta_m} \sum_{j=0}^2 \eta_{m,j} \left(d_{m,j}^\lambda - d_{m,|j+1|_3}^\lambda \right). \quad (8)$$

Каждому узлу η_n поставим в соответствие элемент поверхности сферы и обозначим через S_n его площадь. Для примера на рис. 1(а) один из элементов поверхности выделен заливкой. Внутри каждого треугольника находятся три участка границ между парами элементов, соответствующих вершинам треугольника. На рис. 1(а) границы между элементами показаны пунктирными линиями. Каждый участок представляет собой дугу из узла скорости к середине стороны треугольника. Таким образом, граница элемента η_n составлена из дуг, лежащих внутри треугольников, имеющих общую вершину с координатами (x_n, y_n) . Значения индексов m этих треугольников таковы, что при некоторых $j \in \{0, 1, 2\}$ выполняется условие $n_{m,j} = n$. Если узел расположен на границе счетной области, граница элемента включает участки сторон треугольников, примыкающих к границе. Запишем спектрально-разностный аналог уравнения (3):

$$i\sigma \eta_n + \frac{1}{S_n} \sum_{\{m,j\}_{n_{m,j}=n}} H_m \left(\left(d_{m,|j+1|_3}^\phi - d_{m,j}^\phi \right) U_m + \left(d_{m,j}^\lambda - d_{m,|j+1|_3}^\lambda \right) V_m \right) = 0, \quad (9)$$

где суммирование производится по всем треугольникам, имеющим общую вершину. Можно показать, что в случае замкнутой области для системы уравнений (7)–(9) выполняются разностные аналоги законов сохранения объема и энергии.

Обозначим переменной N количество узлов η_n . Из уравнений (7) и (8) выразим U_m и V_m через сеточную функцию η_n и подставим полученные выражения в (9). Получим уравнение для сеточной функции η_n , являющееся разностной аппроксимацией уравнения (6). Систему уравнений для η_n на сетке можно представить в матричном виде:

$$\sigma \xi = A \xi, \quad (10)$$

где A — квадратная матрица порядка $3N$, значения элементов вектора-столбца ξ равны

$$\xi_n = \eta_n, \quad \xi_{n+N} = \sigma \eta_n, \quad \xi_{n+2N} = \sigma^2 \eta_n, \quad 1 \leq n \leq N. \quad (11)$$

При решении задачи на собственные значения (10) используется пакет линейной алгебры [8, 9]. Изложенный способ относится к группе “решение спектральной задачи разностными методами” [10].

Построение треугольной сеточной области производится с применением меркаторской проекции. Сначала на поверхность цилиндра меркаторской проекции отображается береговая линия, и во внутренней части двумерной области размещаются примыкающие к границе равносторонние плоские треугольники некоторого размера. Затем остальная внутренняя часть заполняется треугольниками, размеры сторон которых увеличиваются по мере удаления от границы до некоторого постоянного значения. Заполнение внутренней части производится преимущественно равносторонними треугольниками. Узкие переходные области, расположенные между участками регулярных сеток с различными размерами треугольников, покрываются нерегулярной сеткой. Выполнив обратное отображение на сферу, получаем сферическо-геодезическую сетку, составленную из сферических треугольников. Вопросы, связанные с аппроксимацией уравнений мелкой воды на сферическо-геодезических сетках, покрывающих сферу почти равносторонними треугольниками, изложены в работе [11]. Разностное уравнение для η_m на квазиоднородной сферическо-геодезической сетке имеет первый порядок аппроксимации, а в некоторых узлах узких переходных областей — нулевой порядок аппроксимации.

Для мелкой сетки, расположенной на поверхности цилиндра меркаторской проекции, можно рассматривать свойства упрощенного варианта разностной схемы (7)–(9), записанного в декартовых координатах x и y . На рис. 1(б) показан пример переходной области для случая, когда размеры треугольников на регулярных сетках различаются в два раза. Узлы, в которых разностное уравнение для η_m имеет нулевой порядок аппроксимации, помечены символом \square и обозначены номерами от 1 до 5. Для каждого из этих узлов показан шаблон разностной схемы. Можно показать, что в случае ровного дна и отсутствия вращения в центральных узлах (x_m, y_m) шаблонов, аппроксимируется уравнение вида

$$\sigma^2 \eta + gH_0 \left(A_m \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + B_m \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) = 0, \quad m = 1, 2, \dots, 5, \quad (12)$$

где $A_1 = \frac{11}{10}, B_1 = \frac{9}{10}; A_2 = \frac{5}{7}, B_2 = \frac{9}{7}; A_3 = \frac{23}{22}, B_3 = \frac{21}{22}; A_4 = \frac{14}{13}, B_4 = \frac{12}{13}; A_5 = \frac{22}{23}, B_5 = \frac{24}{23}$. Из уравнения (12) и $A_m \neq B_m$ следует, что свойства сеточной гравитационной волны зависят от взаимной ориентации шаблона и направления распространения волны.

Для построения цифрового рельефа дна применяется векторная технология, основные положения которой описаны, например, в работе [12]. В этом подходе в памяти содержатся географические координаты точечных объектов или точек вдоль линейных объектов. Применяются абсолютные географические координаты, т. е. географическая широта и географическая долгота. Точечные объекты включают значения глубин, линейные объекты предназначены для описания береговой черты. Для вычисления значений глубин в сеточных узлах численной модели применяется триангуляция по узлам глубин цифрового рельефа дна. Значения глубин H_m получены усреднением поля глубин H по площадям треугольников вычислительной сетки. Основой для построения цифрового рельефа дна прибрежной зоны залива Петра Великого являются фрагменты морских навигационных карт атласа [14]. Для остальной части акватории Японского моря применяются данные ЕТОРО1 [15].

3. Результаты расчета сейшевых колебаний

3.1. Описание исследуемой области

Исследуемая область охватывает среднюю часть залива Петра Великого Японского моря [13] и включает Амурский и Уссурийский заливы, разделенные полуостровом Муравьев-Амурский, на берегах которого раскинулся город Владивосток. Рельеф дна показан на рис. 2. Берега полуострова Муравьев-Амурский преимущественно высокие и обрывистые. Северо-западный и юго-восточный берега полуострова Муравьев-Амурский

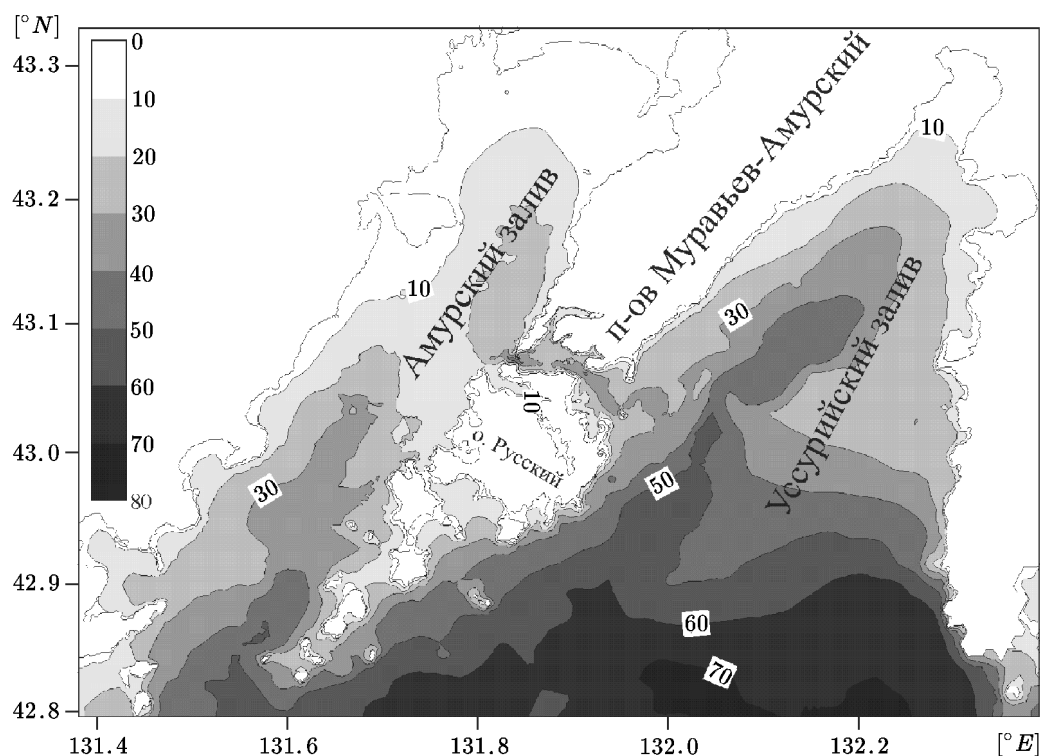


Рис. 2. Рельеф дна средней части залива Петра Великого (глубины с интервалом 10 м)

изрезаны незначительно. К юго-западу расположен остров Русский, отделенный от полуострова проливом Босфор Восточный. Пролив Босфор Восточный показан на рис. 3. Южный берег полуострова изрезан бухтами, из которых наибольшее значение имеет бухта Золотой Рог. Бухта Золотой Рог, защищенная от всех ветров, кроме штормовых, и волнения, вдается в северный берег пролива Босфор Восточный. Берега бухты Золотой Рог почти на всем протяжении укреплены стенками, оборудованы причалами и пирсами. Глубины во входе в бухту Золотой Рог 20–27 м. Далее к вершине бухты они постепенно уменьшаются. На рис. 3 символом ■ отмечено положение автоматизированного поста сети наблюдения за уровнем моря в бухте Золотой Рог. С автоматизированного поста поступают данные измерений уровня с дискретностью 1 мин.

Амурский залив представляет собой северо-западную часть залива Петра Великого. С востока он ограничен полуостровом Муравьев-Амурский и островами Русский, Попова, Рейнеке и Рикорда, являющимися как бы продолжением этого полуострова в юго-западном направлении. Рельеф дна в Амурском заливе сравнительно ровный. От берегов вершины залива простираются обширные отмели. От северо-западного берега

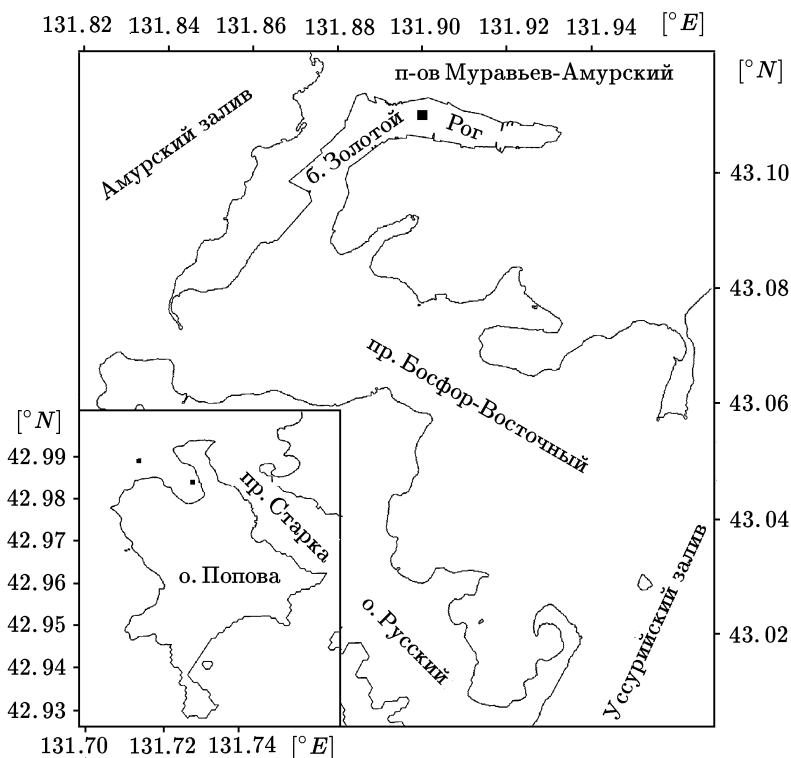


Рис. 3. Карта пролива Босфор Восточный. На вставке карта острова Попова

острова Русский до противоположного берега залива тянется подводный порог с глубинами 13–15 м. В северо-западный берег Амурского залива вдается Славянский залив и несколько бухт. Остров Попова показан на вставке рис. 3, он находится к юго-западу от острова Русский и отделен от него узким проливом Старка. Бухта Алексева вдается в северо-западный берег острова Попова. Размещение автономных регистраторов уровня [5] показано символами ■ на вставке рис. 3.

Уссурийский залив занимает северо-восточную часть залива Петра Великого. С северо-запада он ограничен полуостровом Муравьев-Амурский, островом Русский и островами, лежащими к юго-западу от острова Русский. С востока залив ограничен материковым берегом и островом Аскольд. Глубины в Уссурийском заливе по мере приближения к его вершине постепенно уменьшаются. Восточный берег Уссурийского залива извилистый, в него вдается ряд бухт.

3.2. Проявление сейшевых колебаний в бухте Золотой Рог пролива Босфор Восточный

По данным за январь и февраль 2013 г. были вычислены спектральные характеристики пятисуточных серий измерений уровня. В качестве примера выбран спектр серии с началом в 00:00 12.02.2013. График энергетического спектра для периодов от 5 до 60 мин представлен на рис. 4. По оси абсцисс — значения периодов в минутах. На графике отчетливо выделяются группы пиков с периодами в окрестности 12.5; 33 и 48 мин.

Модельную акваторию бухты Золотой Рог покрывает треугольная сетка с шагом ~ 20 м, у береговой линии шаг сетки ~ 5 м. На акватории пролива Босфор Восточный шаг сетки ~ 40 м, у берега ~ 20 м. На остальной акватории Амурского и Уссурийского заливов шаг сетки ~ 300 м, у берега ~ 75 м. На рис. 5, 6 и 7 представлены решения с периодами 12.9; 33.2 и 47.8 мин соответственно. Решения, представленные на рис. 5 и 6 получены для расчетной области, ограниченной с южной стороны широтой 42.7°N . Для вычисления решения, представленного на рис. 7, сеточная область продолжена сначала на всю акваторию залива Петра Великого треугольной сеткой с шагом ~ 1250 м и далее на всю акваторию Японского моря треугольной сеткой с шагом ~ 5 км. На всех границах заданы условия непротекания.

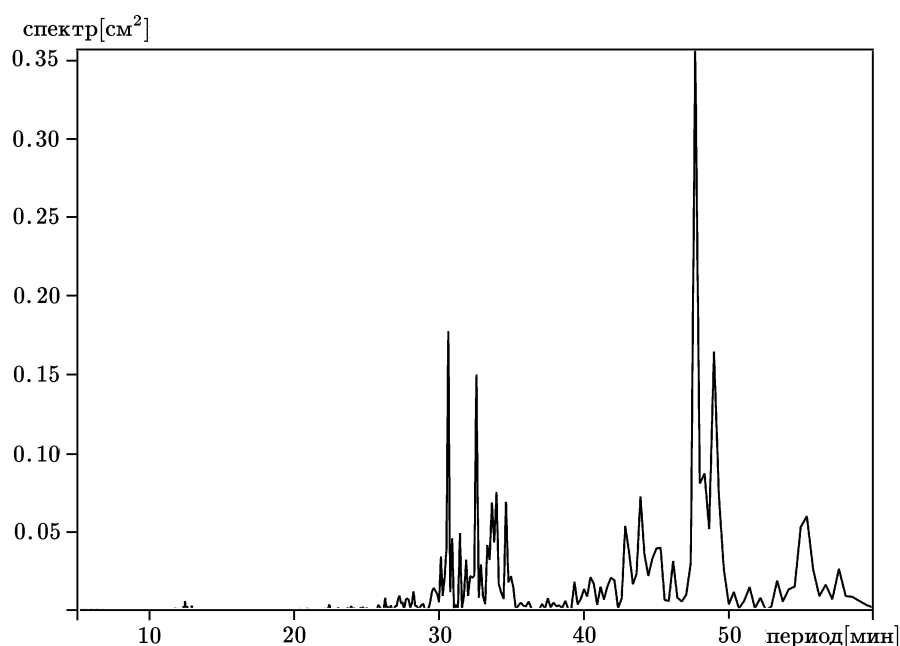


Рис. 4. Энергетический спектр пятисуточной серии с началом в 00:00 12.02.2013

В решении с периодом 12.9 мин, представленном на рис. 5, проявляется первая продольная мода бухты Золотой Рог. На акватории бухты расположена одна узловая линия, удаленная от входа примерно на $2/3$ длины бухты. В решении с периодом 33.2 мин, представленном на рис. 6, проявляется низшая продольная мода бухты Золотой Рог, соответствующая нулевому номеру, когда на акватории бухты узловых линий нет. Отметим, что в представленных на рис. 5 и 6 решениях присутствуют узловые линии у входа в бухту Золотой Рог.

Решение с периодом 47.8 мин, представленное на рис. 7, по-видимому, имеет черты второй поперечной сейши средней части залива Петра Великого. В волновом движении задействованы водные массы пролива Босфор Восточный, Уссурийского и Амурского заливов. Одна узловая линия достигает середины Уссурийского залива, вторая — Амурского. Если в качестве оценок поперечного масштаба и средней глубины принять значения 50 км и 30 м, то по формуле Мериана [1] оценка значения периода равна 48.6 мин.

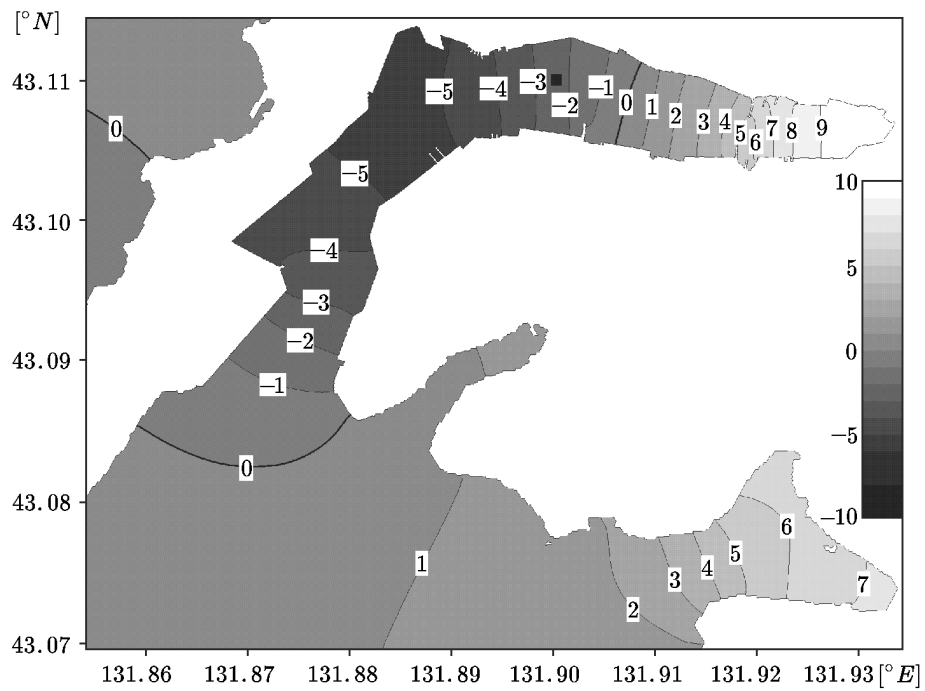


Рис. 5. Первая продольная мода бухты Золотой Рог в решении с периодом 12.9 мин

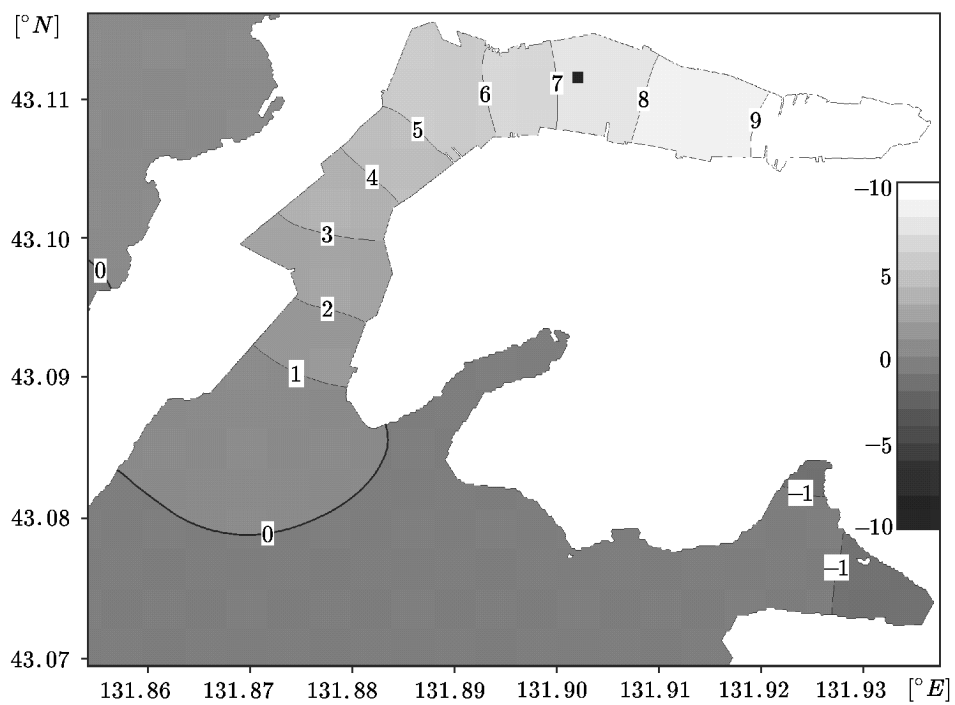
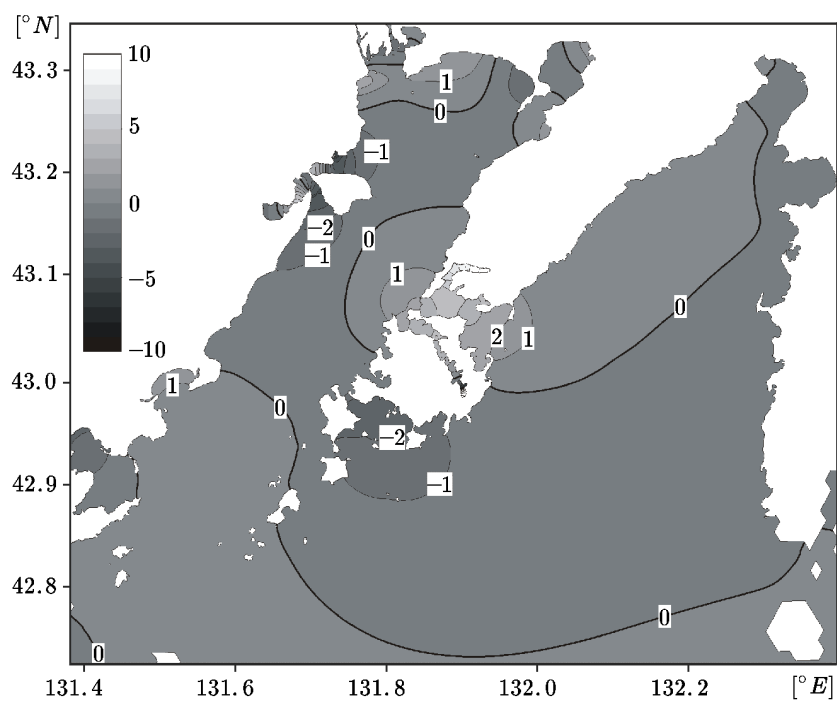
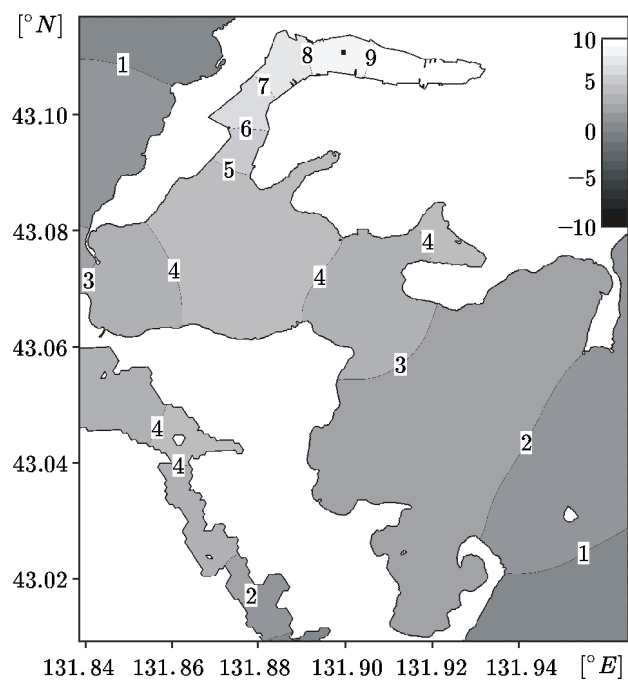


Рис. 6. Низшая продольная мода бухты Золотой Рог в решении с периодом 33.2 мин



(a)



(б)

Рис. 7. Форма сейшевого колебания с периодом 47.8 мин: (а) в средней части залива Петра Великого; (б) на акватории пролива Босфор Восточный

3.3. Сейши в бухте Алексева острова Попова

Расчеты сейшевых колебаний для модельной акватории бухты Алексева проведены с целью сравнения с опубликованными в [5] результатами обработки натурных измерений на двух донных станциях, установленных на внутренней и прилегающей акваториях, и расчетов собственных колебаний по методике, основанной на решении задачи Коши. Спектральный анализ материалов в [5] выявил наличие двух хорошо выраженных пи-

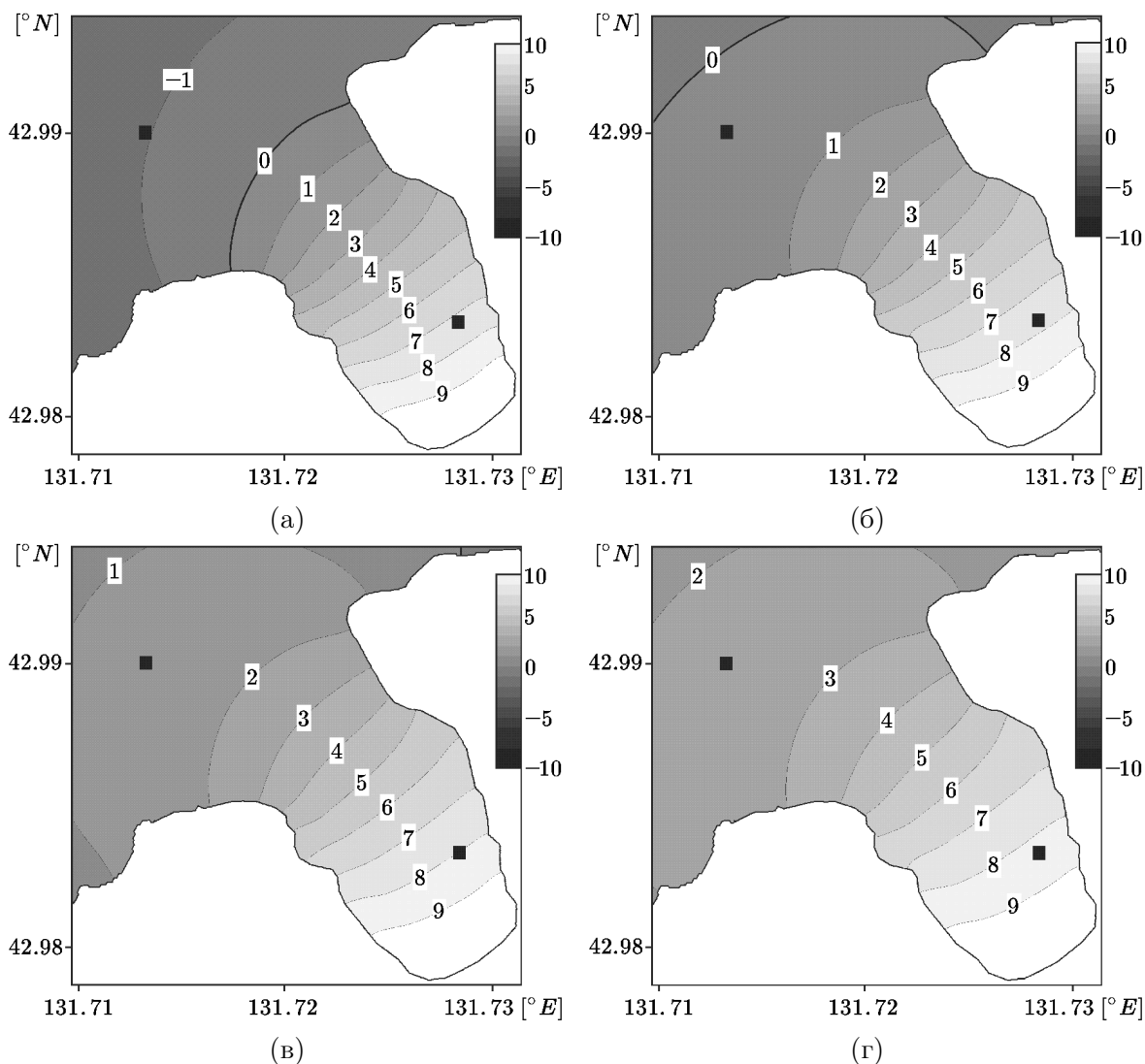


Рис. 8. Сейшевые колебания в бухте Алексева с периодами: (а) 9.1 мин; (б) 10 мин; (в) 10.8 мин; (г) 11.8 мин

ков на внутренней станции на периодах 10.5 и 2.7 мин, обусловленных резонансными колебаниями в бухте. Акваторию бухты Алексева покрывает треугольная сетка с шагом ~ 20 м. С приближением к границе расчетной области шаг сетки постепенно увеличивается до ~ 150 м. Расчетная область задана в виде квадрата со стороной 30 км. Бухта Алексева расположена в центре расчетной области.

На рис. 8 представлены формы сейшевых колебаний с периодами: (а) 9.1 мин; (б) 10 мин; (в) 10.8 мин; (г) 11.8 мин. В представленных примерах видно, что с увеличением периода узловая линия отодвигается от входа в бухту, при этом увеличивается

область примыкающего шельфа, в которой происходит синфазное колебание с бухтой Алексеева. В [5, рис. 5а] представлено решение с периодом 10.5 мин и отмечено, что узловая линия проходит рядом со входом в бухту. Необходимо уточнить, что показанная в [5] узловая линия подходит к береговой черте только с одной стороны входа в бухту.

На графике спектральной плотности для внешней станции, представленном в [5, рис. 2], наблюдается узкий провал в диапазоне периодов около 10 мин. По-видимому, эту особенность можно объяснить близким к узловой линии расположением внешней станции. Сейшевая компонента уровня преобладает на внутренней станции и мала на внешней станции. Этим можно объяснить выявленное в [5] существенное различие в спектрах колебаний на разных станциях, которому соответствует резко выраженный минимум функции когерентности на периодах 9–10 мин.

На рис. 9(а) и 9(б) представлены два примера пространственных форм сейш с периодами 3 и 2.9 мин соответственно. Структура решения на рис. 9(а) соответствует поперечной моде, а на рис. 9(б) — продольной. При отсутствии внешнего воздействия быстрее затухает продольная сейша, медленнее — поперечная, поскольку градиент глубин в бухте Алексеева ограничивает излучение волновой энергии поперечной сейши. Пространственное распределение средней амплитуды колебаний для резонансного периода 2.7 мин представлено в [5, рис. 5]. При этом отмечено, что полученную моду сложно назвать продольной или поперечной. По-видимому, представленное в [5] решение является некоторой комбинацией продольной и поперечной мод.

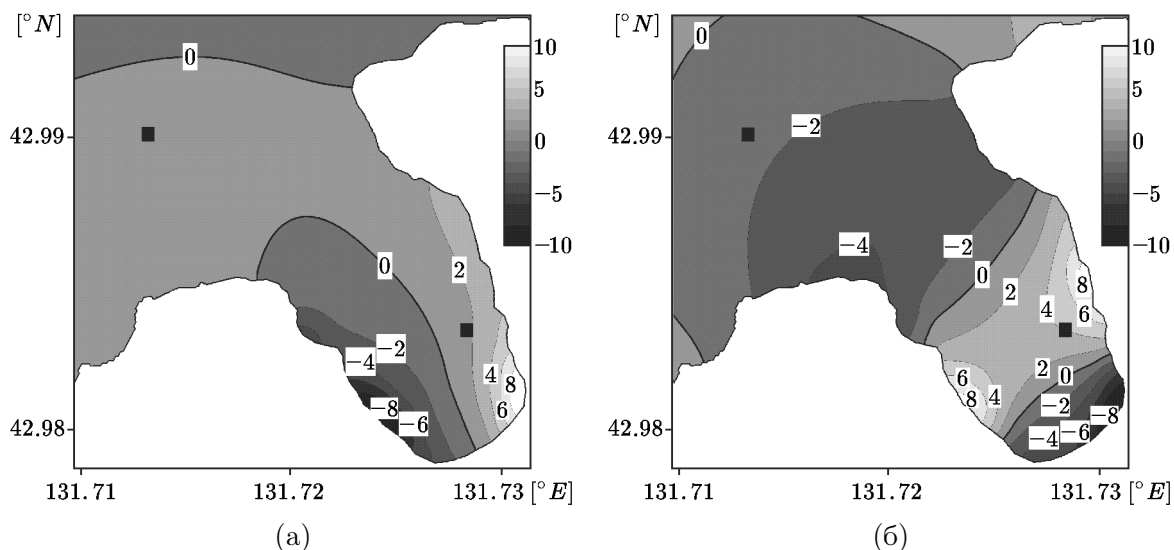


Рис. 9. Сейшевые колебания в бухте Алексеева: (а) поперечная мода с периодом 3 мин; (б) продольная мода с периодом 2.9 мин

4. Заключение

Представлена спектрально-разностная модель, базирующаяся на линеаризованной системе уравнений мелкой воды. Разностная аппроксимация выполнена на нерегулярной треугольной пространственной сетке. Рассмотрены характеристики баротропных сейшевых колебаний средней части залива Петра Великого Японского моря, включающей акватории Амурского и Уссурийского заливов. Сетка расчетной области покрывает ис-

следуемые акватории и в ряде расчетов включает Японское море. Наиболее подробно на сетке описаны акватории бухты Золотой Рог и бухты Алексева. Численный метод включает решение задачи на собственные значения и позволяет непосредственно получить набор частот и соответствующих форм сейшевых колебаний.

С применением спектрально-разностной модели исследована пространственная структура ряда колебаний, выделенных при анализе материалов измерений уровня в бухте Золотой Рог в январе и феврале 2013 г. Выявлено наличие хорошо выделенных групп пиков с периодами в окрестности 12.5, 33 и 48 мин. Показано, что колебания с периодами в окрестности 12.5 и 33 мин сопровождаются первой и нулевой модами резонансных колебаний бухты Золотой Рог. Колебания с периодами в окрестности 48 мин связаны со второй поперечной сейшей средней части залива Петра Великого. Амплитуда центральной пучности сейши максимальна в вершине бухты Золотой Рог.

Получен ряд решений для сейшевых колебаний в бухте Алексева с периодами около 10 мин. С увеличением периода узловая линия отодвигается от входа в бухту, при этом увеличивается область примыкающего шельфа, в которой происходит синфазное колебание с бухтой Алексева. Получены решения для поперечной моды с периодом 3 мин и близкой к ней продольной моды с периодом 2.9 мин. При отсутствии внешнего воздействия быстрее затухает продольная сейша, медленнее — поперечная, поскольку градиент глубин в бухте Алексева ограничивает излучение волновой энергии поперечной сейши. По-видимому, колебания с периодами около 2.7 мин могут быть некоторой комбинацией продольной и поперечной мод, зависящей от условий на входе в бухту.

Представленная спектрально-разностная модель может быть полезна при исследованиях акваторий со сложной формой рельефа дна и береговой черты, когда для определения пространственных характеристик сейшевых колебаний необходимо применять численный метод.

Литература

1. **Wilson B.W.** Seiches // *Advances in hydrosciences / Ven Te Chow.* — Academic Press., 1972. — Vol. 8. — P. 1–94.
2. **Rabinovich A.B.** Seiches and harbor oscillations // *Handbook of Coastal and Ocean Engineering / Y.C. Kim.* — Singapore: World Scientific Publ., 2009. — Chapter 9. — P. 193–236.
3. **Фролов А.В., Камаев Д.А., Мартыщенко В.А., Шершаков В.М.** Опыт модернизации российской системы предупреждения о цунами // *Метеорология и гидрология.* — 2012. — № 6. — С. 5–21.
4. **Жариков В.В., Преображенский Б.В.** Ландшафтный мониторинг бухты Алексева залива Петра Великого // *Подводные исследования и робототехника.* — 2010. — № 2. — С. 72–84.
5. **Шевченко Г.В., Чернов А.Г., Ковалев П.Д., Горин И.И.** Резонансные колебания в заливах и бухтах: натурные эксперименты и численное моделирование // *Тр. Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева.* — 2010. — № 1. — С. 52–62.
6. **Ламб Г.** Гидродинамика. Перевод с 6-го англ. издания / Н.А. Слезкин. — М.-Л.: Гостехиздат, 1947.
7. **Долгих Г.И., Долгих С.Г., Смирнов С.В., Чупин В.А., Швец В.А., Яковенко С.В.** Инфразвуковые колебания Японского моря // *ДАН.* — 2011. — Т. 441, № 1. — С. 98–102.
8. **Balay S., Buschelman K., Eijkhout V., Gropp W., Kaushik D., Knepley M., McInnes L.C., Smith B., and Zhang H.** PETSc Users Manual. — USA, Illinois, Argonne National Laboratory, 2008. — (Technical Report № ANL-95/11.)

9. **Hernandez V., Roman J.E., and Vidal V.** SLEPc: A scalable and flexible toolkit for the solution of eigenvalue problems // ACM Trans. Math. Software. — 2005. — Vol. 31. — P. 351–362.
10. **Марчук Г.И., Каган Б.А.** Динамика океанских приливов. — Л.: Гидрометеиздат, 1991.
11. **Вильямсон Д.** Разностные аппроксимации уравнений движения жидкости на сфере / Численные методы, используемые в атмосферных моделях. Перевод с англ. — Л.: Гидрометеиздат, 1982.
12. **Марчук Ан.Г.** Применение географических информационных систем для моделирования природных и антропогенных катастроф // Вычислительные технологии. — 1996. — Т. 1, № 3. — С. 57–65.
13. Лоция северо-западного берега Японского моря. — ГУНиО, 1984.
14. Атлас залива Петра Великого и северо-западного берега Японского моря до бухты Соколовская (для маломерного флота). — Владивосток: Гидрографическая служба ТОФ, 2003.
15. **Amante C., Eakins B.W.** ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis // NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. — Colorado, Boulder, 2009.

*Поступила в редакцию 25 марта 2013 г.,
в окончательном варианте 21 июня 2013 г.*